Проф. А. К. АЛЕКСЕЕВ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

ОНТИ • 1937

НИБ УДУНТ (ДИТ)

Проф. А. Б. ЛЕБЕДЕВ

621.33
Л-33

~~115590~~

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

3903 +

Цена 13 руб. 50 коп.
Переплет 1 руб. 50 коп

Інститут Інж... Транспорту
Учбовий відділ
БІБЛІОТЕКИ
ім.Л.М. ...ановича

ОНТИ — НКТП — СССР
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
ЛЕНИНГРАД — 1937 — МОСКВА

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ЭЭ—60—5—2
ТКК № 43

Книга излагает теоретические и конструктивные основы важнейших элементов рельсовых электрических железных дорог. В ней даются описания принципов действия и конструкции тяговых электродвигателей, аппаратов управления, подвижного состава и сетей электрических железных дорог. В книге даются основные законы движения электрического поезда с особым рассмотрением вопросов разгона и торможения поезда, основы тяговых расчетов и расчетов рабочей сети электрических железных дорог. Книга рассчитана на инженеров и студентов втузов по специальностям электрической тяги.

НБ
УДУНТ
(ДІІТ)

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Предлагаемая книга имеет своим назначением изложить теоретические и конструктивные основы важнейших элементов рельсовых электрических железных дорог По мнению автора объединение теоретических и конструктивных основ в одном обобщающем изложении должно содействовать более углубленному и более сознательному изучению трактуемых вопросов. Вместе с тем автор стремился построить книгу таким образом, чтобы ее можно было полностью использовать и в случае изучения одной только теории электрической тяги. В этом случае можно выпустить из нее соответствующие главы, легко выделяемые без нарушения связи изложения.

При составлении книги, подобной данной, угрожает опасность впасть в чрезмерную деталировку изложения отдельных вопросов, которая может затемнить основные положения и связь между ними. Для предотвращения этого автор пришел к выводу о целесообразности выделения частных вопросов, вытекающих из основных положений и особенно числовых примеров и задач, в отдельные книги, которые должны являться вспомогательными пособиями при изучении излагаемых здесь вопросов. Например, по вопросам расчетов и общего проектирования автор предполагает переиздать свою книгу „Расчеты элементов электрических ж. д.“, подвергнув ее изменениям и дополнениям в соответствии с последними достижениями транспортной техники.

При изложении конструктивных основ также пришлось быть осторожным в отношении объема излагаемого материала. В книге преимущественно сосредоточено внимание на конструкции основных элементов оборудования. Более мелкие детали и расчеты конструкций должны быть по мнению автора сосредоточены также в специальных пособиях или конспектах.

Данное руководство выходит из печати в эпоху расцвета стахановского движения, когда каждый день нам приносит новые достижения, новые перекрытия норм. При приведении данных о достижениях нашей и заграничной транспортной техники автор проводит мысль, что эти достижения проходящие и должны быть превзойдены при дальнейшем развитии у нас стахановского движения, при дальнейшем прогрессе нашей техники.

Издание данной книги потребовало большой технической работы. За техническую помощь мне при печатании ее приношу благадарность инженеру Б. А. Борейше.

А. Лебедев.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

СОДЕРЖАНИЕ.

ОТДЕЛ ПЕРВЫЙ.

Введение к изучению электрической тяги.

Стр.

1. Краткая история развития электрической тяги 1
2. Классификация железных дорог . . 4
3. Сравнение преимуществ и недостатков паровой и электрической тяги 6
4. Системы электрической тяги . . . 9
5. Основные принципы устройства и действия электрических ж. д. 12

ОТДЕЛ ВТОРОЙ.

Тяговые электродвигатели.

I. Двигатели постоянного тока 15
1. Конструктивные формы двигателей 15
Подвесноосевые двигатели. Опорнорамные двигатели. Якорноосевые двигатели.
2. Характеристики тяговых электродвигателей . 27
3. Особенности коммутации тяговых двигателей . . 30
4. Основные тенденции в строительстве тяговых двигателей постоянного тока 33
5. Весовые характеристики тяговых двигателей . 42
II. Коллекторные двигатели однофазного тока 44
1. Основные принципы работы коллекторных двигателей 44
2. Последовательные коллекторные двигатели . 47
Схема соединения последовательных двигателей. Диаграмма напряжения и э. д. с. последовательных двигателей. Рабочая диаграмма.
3. Репульсионные двигатели со статорным возбуждением 49
4. Репульсионные двигатели с роторным возбуждением 52
5. Коллекторные однофазные двигатели двойного питания . 54
6. Конструктивные формы однофазных коллекторных двигателей и их деталей . 55
7. Характеристики тяговых коллекторных двигателей однофазного тока 60
8. Процесс коммутации однофазных коллекторных двигателей 61
9. Основные расчетные данные коллекторных однофазных двигателей 67
III. Трехфазные асинхронные двигатели. 71
1. Основные принципы работы асинхронных многофазных двигателей 71
2. Конструктивные формы тяговых асинхронных двигателей 76
3. Каскадное включение асинхронных двигателей . 77
Диаграмма напряжения и э. д. с. каскадного включения. Диаграмма тока каскада. Соотношение моментов и мощностей.
4. Переключение полюсов . 81
5. Характеристики асинхронных двигателей 86
6. Основные тенденции в строительстве асинхронных тяговых двигателей . 87
IV. Методы искусственного охлаждения тяговых электродвигателей. 89
1. Основные законы вентилирования 89
2. Типы вентиляции тяговых двигателей 92
V. Нагревание тяговых электродвигателей. 97
1. Основные законы нагрева двигателей, как однородных тел . 97
2. Тепловые характеристики тяговых двигателей . 104
3. Теория двухступенчатого нагрева тяговых двигателей 105
4. Нагрев тягового двигателя, как эквивалентного однородного тела . 110
5. Определение нагрева тяговых двигателей при переменном режиме работы . . 117
6. Тепловой баланс и допустимые температуры нагрева тяговых электродвигателей 120

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ОТДЕЛ ТРЕТИЙ.

Системы управления электрическим поездом.

I. Теоретические основы управления поездом 123
1. Общая постановка вопроса о пуске и разгоне поезда . 123
2. Управление поездом при постоянном токе . 124
Расчет пусковых реостатов и схемы пуска. Количество пусковых ступеней реостатов. Способы включения отдельных секций реостатов. Типы реостатов. Особые случаи расчета реостатов. Способы перехода с последовательного на параллельное включение двигателей. Способы безреостатного разгона поезда. Схема парижского метрополитена. Способ динамотора. Безреостатный разгон поезда с помощью метадина.
3. Управление поездом при однофазном токе . . 138
Пусковые трансформаторы и расчет пусковых ступеней трансформаторов. Схемы включения трансформаторов. Конструктивные формы трансформаторов.
4. Управление поездом при трехфазной тяге . 143
Основные положения. Расчет пусковых реостатов. Типы реостатов для трехфазных двигателей. Область применения пусковых трансформаторов. Экономика управления трехфазными двигателями.
II. Аппараты и схемы управления электрическим поездом 148
1. Основные принципы работы систем управления . . 148
Построение схемы управления. Системы управления по схеме многих единиц. Принципы автоматизации управления.
2. Условия работы аппаратов управления . 150
Явления при разрыве тока. Средства борьбы с вольтовыми дугами.
3. Управление поездом с помощью контроллеров . . . 152
Барабанные контроллеры трамвайного типа. Барабанные контроллеры для больших мощностей. Барабанные контроллеры специального назначения. Барабанные инверсоры. Контроллеры управления. Контроллеры ползунного типа. Контакторные контроллеры. Системы многих единиц и автоматизация при контроллерном управлении.
4. Групповые контакторные системы управления . 164
Механические контакторы. Электропневматический привод со связанными поршнями. Кулачковый привод с независимыми цилиндрами. Фиксаторы кулачковых приводов. Схемы управления при кулачковых приводах. Кулачковый привод с электрическим сервомотором. Рычажно-кулачковая групповая система кулачкового управления.
5. Системы управления с индивидуальными контакторами . 173
Электромагнитные контакторы. Электропневматические контакторы. Блокировка в схемах индивидуальными контакторами. Схемы соединений при индивидуальных контакторных системах постоянного тока. Схемы соединений при индивидуальных контакторных системах однофазного тока. Особенности схем управления при трехфазной системе.
6. Защитные и вспомогательные аппараты электрического оборудования подвижного состава. 200
Защитные аппараты от сверхтоков и перенапряжений. Вспомогательные машины и аппараты.
7. Области применения различных систем управления 203

ОТДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ.

Системы торможения поезда.

I. Механические способы торможения 205
1. Тормозная сила . 205
2. Ручные тормоза 206
3. Пневматические тормоза 207
4. Способы передачи и производства тормозных усилий 213
II. Электрическое торможение поезда . 216
1. Тормозные схемы . . 216
2. Расчет тормозных реостатов 221
III. Электромагнитный соленоидный тормоз 223
IV. Электромагнитный рельсовый тормоз. 224
V. Рекуперативные системы торможения 226

НБ УНТУНТ (ДІІТ)

1. Основные принципы рекуперативного торможения 226
2. Рекуперативное торможение при постоянном токе 228
Системы с последовательным соединением якорных и возбудительных обмоток тяговых машин. Рекуперативное торможение при независимом возбуждении тяговых машин. Рекуперация энергии с противокомпаундными генераторами.
3. Рекуперативное торможение при однофазной тяге 236
Схемы при последовательном соединении роторных и возбудительных обмоток. Рекуперация энергии при независимом возбуждении однофазных коллекторных машин.
4. Рекуперация энергии при трехфазной тяге . . 244
VI. Общее заключение о системах торможения поезда 244

ОТДЕЛ ПЯТЫЙ.

Особые системы электрической тяги.

I. Однофазно-многофазные системы тяги 247
1. Американская система расщепленной фазы 247
2. Однофазно трехфазная система Kando 251
3. Система Krupp'a 256
II. Системы тяги однофазно-постоянного тока 258
1. Электровозы с мотор-генераторами и со ртутными выпрямителями 258
2. Электровозы с вентильными двигателями 260
3. Умфорный электровоз системы Grabner-Pawelka 264
III. Аккумуляторная тяга 266

ОТДЕЛ ШЕСТОЙ.

Основы движения поезда и тяговые расчеты.

I. Основные задачи тягового расчета . 269
II. Сопротивления движению поезда 269
1. Сопротивление пути 269
2. Внутренние сопротивления подвижного состава . 272
3. Сопротивления воздушной среды 275
4. Общие сопротивления движению . . 277
Сопротивления движению пассажирских поездов. Сопротивление движению товарных поездов при двухосных вагонах. Сопротивления движению четырехосных вагонов. Сопротивления движению электровозов. Сопротивление движению моторвагонных поездов эл. ж. д. Сопротивления движению трамвайных поездов. Сопротивления движению в тоннелях.
5. Влияние температуры на сопротивление движению 283
6. Дополнительные сопротивления движению на кривых . 283
7. Влияние уклонов на сопротивление движению 284
III. Определение силы инерции поезда. 284
IV. Условия нормального движения поезда. Законы сцепления. 288
V. Общий анализ уравнения движения и методы его интегрирования. 295
1. Общий анализ уравнения движения поезда . . 295
2. Интегрирование уравнения движения методом конечных приращений Malloux 296
Построение кривых для отдельных периодов движения. Построение кривой $v = f(t)$ для заданного перегона. Построение $v = f(l)$.
3. Графические методы интегрирования 300
Построение кривой $v = f(t)$ методом Desdouits. Построение кривой $v = f(t)$ по методу Дегтярева-Müller'a. Построение кривой $v = f(l)$. Построение кривой $l = f(t)$ при предварительно построенной кривой $v = f(t)$. Построение кривой $l = f(t)$ при известной кривой $v = f(l)$. Учет изменения профиля при графических методах.
4. Методы аналитического интегрирования уравнения движения . 307
5. Определение времени хода поезда методом установившихся скоростей 310
VI. Определения потребления тока и энергии на движение. 311
1. Определение потребления тока 311
2. Определение расхода энергии 313
Определение расхода энергии при данной зависимости $l = f(t)$. Определение расхода энергии методом работы.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

VII. Методы понижения расхода энергии на движение 317
VIII. Выбор тягового электродвигателя . 321
1. Преимущества и недостатки двигателей с последовательной, шунтовой и компаундной характеристиками . 321
2. Определение пригодности двигателя в отношении нагрева при работе его на линии . 327
Методы непосредственного определения температуры нагрева. Определение пригодности двигателя по методу средне-нагревательного тока.
3. Методы предварительного установления мощности тяговых электродвигателей 331
Метод пусковой мощности. Метод определения мощности по руководящему подъему. Метод работы.

ОТДЕЛ СЕДЬМОЙ.

Подвижной состав электрических ж. д.

I. Процесс движения подвижного состава по рельсовому пути 338
1. Общие уравнения колебания подвижного состава 338
2. Галопирование подвижного состава . 341
3. Боковая качка подвижного состава 344
4. Волнообразное движение поезда . 345
5. Особенности движения подвижного состава на кривых 347
II. Передача движения от вала двигателя к ведущей оси 351
1. Зубчатые передачи . 351
Системы зубчатых колес, применяемых в тяге. Зубчатая передача простого типа. Системы зубчатых передач с полым валом. Зубчатая передача системы Buchli. Зубчатые передачи при вертикальных двигателях. Двухступенчатые зубчатые передачи. Карданные передачи.
2. Распределение сил в подвижном составе при зубчатых передачах . 367
3. Рычажные передачи . 375
Рычажные передачи с отбойным валом. Рычажные передачи без отбойного вала.
4. Зубчато-рычажные передачи 378
5. Силы, действующие в групповых приводах 380
Зубчато-рычажные передачи. Рычажные передачи.
6. Паразитные колебательные процессы в рычажных и зубчато-рычажных передачах 387
7. Непосредственная насадка двигателей на ведущие оси 397
8. Сравнительная оценка различных систем передач 397
Зубчатая передача с осевой подвеской двигателей. Передача с полым валом. Передача Buchli. Передачи зубчато-рычажные. Рычажные передачи. Якорно-осевые двигатели.
III. Конструкция подвижного состава электрических железных дорог. 405
1. Классификация подвижного состава . 405
2. Вагоны электрических железных дорог 406
Типы кузовов вагонов электрических железных дорог. Системы рессор вагонов. Вагоны без тележек на свободных осях. Вагоны на двухосных тележках с жесткой базой. Вагоны на тележках с поворотными осями. Одноосные поворотные тележки. Двухосные поворотные тележки. Тележки максимальной тяги. Специальные типы тележек с карданными передачами. Рамы тележек. Буксы. Колесные пары. Упряжь вагонов. Отопление и освещение вагонов. Современное состояние строительства вагонов
3. Электровозы . 434
Основные типы электровозов. Рессорная подвеска электровозов. Рамы электровозов. Бегунки и бегунковые тележки. Отдельные детали ходовых частей и кузовов электровоза. Компановка оборудования электровозов. Течения в строительстве электровозов.

ОТДЕЛ ВОСЬМОЙ.

Рабочая сеть электрических железных дорог.

I. Системы подводки тока к подвижному составу 469
1. Верхний контактный провод . 469
Основные условия работы контактных систем подводки тока. Материалы и профили сечений контактных проводов. Процесс токособирания.
2. Простые подвески контактного провода 474
3 Ценные подвески контактного провода . 478
4. Изоляционные материалы и типы изоляторов . 492

НБ УПУНТ (ДІІТ)

5. Опоры и поперечные крепления проводов 494
6. Токоприемники при верхнем контактном проводе 499
7. Оценка различных систем контактных подвесок 504
8. Третий контактный рельс 504
9. Щелевые контактные системы 507
10. Контакторные системы 508
II. Основы механического расчета контактной системы 509
1. Общая постановка вопроса о механическом расчете 509
2. Главнейшие законы работы контактных проводов при простых подвесках . 510
Работа провода при постоянной температуре. Уравнения работы провода при температурных колебаниях. Случай несимметрично подвешенного провода. Влияние изменения расстояния между точками подвеса на работу провода.
3. Особенности расчета цепных подвесок 514
4. Учет влияния ветровых отклонений подвесок . 517
5. Дополнительные напряжения в контактных подвесках 522
6. Общая постановка вопроса о расчете опор и поперечных креплений 524
III. Возврат тока от подвижного состава 526
1. Общая теория блуждающих токов при тяге на постоянном токе . 526
2. Блуждающие токи при однофазной тяге 529
3. Электролитический эффект, порождаемый блуждающими токами 532
4. Меры борьбы с блуждающими токами . 533
IV. Электрический расчет рабочей сети . 536
1. Основные принципы расчета . . 536
2. Расчет рабочей сети по методу сечения графика движения 539
3. Метод подвижных нагрузок . . 541
Определение падений напряжения до токоприемника. Определение падений напряжения до точек токораздела. Пределы точности аналитических формул. Определение потерь в проводах. Определение наибольшего падения напряжения в рабочей сети. Расчет сложных рабочих сетей.
4. Аналитический расчет падения напряжения при учете профиля и изменения скоростей. 553
5. Применение к расчету рабочих сетей методов теории вероятности 554
6. Определение постоянных рабочей сети 556
7. Особенности расчета рабочей сети при переменном токе 559
8. Влияние блуждающих токов на падение напряжения 565
9. Влияние токов рабочей сети на слаботочные провода . 569

ОТДЕЛ ДЕВЯТЫЙ.

Системы питания электрических железных дорог.

I Схемы электрических соединений рабочих сетей . 576
1. Секционирование сетей . 576
2. Схемы питательных и отсасывающих сетей . 576
3. Устройство отсасывающих и питательных пунктов 585
II. Тяговые подстанции 587
1. Типы тяговых подстанций 587
2. Трансформаторные подстанции . 587
3. Подстанции для преобразования переменного тока одного вида в другой 588
4. Подстанции для преобразования переменного тока в постоянный 589
5. Схемы соединений тяговых подстанций . 594
6. Общие методы расчета мощностей подстанций 600

Приложение.

Сокращенные названия. 605
Указатель литературы 607
Принятые обозначения. 614

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ОТДЕЛ ПЕРВЫЙ.

ВВЕДЕНИЕ К ИЗУЧЕНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ.

1. Краткая история развития электрических железных дорог.

Первые попытки применить электричество для тяги следует отнести к 1834 году. В этом году американец Thomas Davenport положил начало электрической тяге, приведя в движение с помощью гальванических элементов и крайне несовершенного магнито-электрического двигателя небольшой вагончик. Почти одновременно с ним русский физик Якоби применил тот же самый метод для приведения в движение небольшой моторной лодки на Неве. После этого попытки применить электричество для тяги неоднократно повторялись в самых разнообразных формах, но все они, естественно, не могли иметь практического значения, пока не была усовершенствована электрическая машина.

В 1864 году итальянец Pacinnoti дал тип современной электрической машины, доведенной вскоре трудами Werner'a Siemens'a, Gramme'a и последующего за ними целого ряда выдающихся электротехников до высокой степени совершенства. Вслед за этим электричество начинает быстро проникать в самые разнообразные отрасли промышленности. Вскоре оно заняло ответственное место и в области тяги.

В 1879 году фирма Siemens & Halske на промышленной выставке в Берлине впервые демонстрировала небольшой электрический поезд, служивший для увеселения публики, посещавшей выставку. Поезд состоял из миниатюрных электровоза и трех вагонов-платформ. Приводился он в движение двигателем мощностью в 3 PS и получал ток от изолированного рельса с напряжением 130 V. Первый опыт носил примитивный характер, но самая идея электрической тяги была в нем схвачена совершенно правильно, и в основе она сохранилась и до настоящего времени.

В 1881 году та же фирма соорудила первую железную дорогу, предназначенную для практических целей. Дорога была проложена между Берлином и местечком Gross — Lichterfelde протяженностью около 2,5 km. Движение производилось с помощью вагонов на 24 пассажира со скоростями, доходившими до 19 km/h. В 1883 году Siemens & Halske построила дорогу в Ирландии около Patrush'a, протяженностью 9,6 km и в 1884 г. в Германии между городами Frankfurt — Offenbach. На последней дороге, а также и на построенной в тот же период 1883—1884 годов на линии Mödling в Австрии была применена для подводки тока к подвижному составу верхняя контактная система. Она состояла из подвешенной к опорам трубы с нижним прорезом в которой скользил контактный челнок, соединенный через прорезь с вагоном.

Почти одновременно с опытами в Европе начались попытки применения электричества для тяги и в Америке. В 1880 году американцы Field и Edisson берут патенты на осуществление идеи электрической тяги. Войдя в соглашение, они образуют в 1883 году специальное общество электрических железных дорог — „Electric Railway Company".

В 1884 году были построены первые американские электрические железные дороги в Cleveland'e и Kansas-City. Следующий год ознаменовался крупным событием в области электрической тяги — сооружением по идее бельгийца Van Depoele в канадском городе Torronto трамвайной линии, носившей все основные черты современных устройств этого типа. Характерной особенностью этой установки явилось применение верхнего контактного провода для подводки тока и использование ходовых рельсов в качестве обратных проводов.

После отмеченных достижений и в Европе и особенно в Америке начинается энергичное строительство электрических трамваев. Следует отметить, что в Европе

НБ УДУНТ (ДІІТ)

одним из первых наиболее крупных сооружений этого рода был трамвай в Киеве, постройка которого была начата в 1889 году. Следующий русский трамвай был построен для города Казани в 1894 году, и, начиная с этого момента, все наши крупнейшие города приступили к сооружению у себя трамвайных установок: Москва открыла трамвайное движение в 1903 и Ленинград в 1907 году.

Вскоре после практического оформления принципа электрической тяги техническая мысль пришла к заключению об особой целесообразности применения его для метрополитенов, особенно подземного типа. На это еще в 1880 году указывал Werner Siemens, рекомендовавший тогда же применить электрическую тягу для окружной Берлинской дороги. В 1890 году была открыта первая подземная железная дорога в Лондоне, применившая электрическую тягу, и, начиная с этого момента, все вновь строющиеся метрополитены исключительно выполняются по типу электрических железных дорог. В настоящее время метрополитены имеют Лондон, Париж, Берлин, Гамбург, Нью-Йорк и ряд других наиболее крупных центров Европы и Америки. Особо следует отметить метрополитен Москвы, построенный по самому последнему слову строительной техники.

Начало применения электричества для тяжелой и полутяжелой тяги относится к 1895 году. Первой дорогой, начавшей у себя электрификацию, была американская магистраль Baltimore & Ohio (B. O. R.), электрифицировавшая свой головной участок с тоннелем около города Baltimore. Наиболее оживленный период электрификации жел. дор. имел место в период 1906—1913 годов. За это время было электрифицировано особенно много дорог пригородного типа и головных участков магистралей. Из наиболее выдающихся в настоящее время жел. дор. США следует указать на следующие: New-York Central Railroad (N. C. R. R.), New-York & New-Haven & Hartford R. R. (N. H. H. R.), Pennsylvania R. R. (P. R. R.), Norfolk & Western R. R. (N. W. R. R.), Virginia R. R. (V. R. R.), Bütte & Anaconda & Pacific R. (B. A. P. R.), Chikago & Milwaukee & St. Paul R. (Ch. M. St. P. R.) и Detroit & Toledo & Ironton R. (D. T. I. R.).

Большинство приведенных дорог обладает сильно развитым движением. Характерно, что многие из них многопутные и при относительно небольшой протяженности имеют большую длину рельсовых путей. Дороги N. C. R. R. имеют общую протяженность около 90 km и длину рельсов 520 km. Сеть N. H. H. R. имеет протяженность около 140 km и длину рельсов 1 100 km. Общая протяженность пенсильванских дорог 525 km, и длина их рельсов 1 050 km. Из американских жел. дор., работающих на электрической тяге, особый интерес представляет дорога Ch. M. St. P. R. Электрифицированные линии этой сети составляют большие звенья крупнейшей магистрали, связывающей воды Тихого и Атлантического океанов. В настоящее время на этой магистрали электрифицированы участки от Seattle до Othello протяженностью 340 km и от Avery до Harlowton'a длиною 710 km. Линии эти разделяются участком на паровой тяге Othello-Avery длиною 364 km. На электрифицированной части дороги имеются уклоны, доходящие до $22^0/_{00}$.

В Европе первой дорогой тяжелого типа с электрической тягой была швейцарская линия Borgdorf — Thun, открытая в 1899 году. Следующей дорогой была итальянская линия Valtelino, начавшая работу в 1901 году. Наиболее интенсивный период электрификации европейских дорог начался после окончания мировой войны. До войны электрифицировались только отдельные линии, носившие часто экспериментальный характер. После войны положение существенно изменилось. Война вскрыла важнейшие дефекты энергетических баз многих стран. Импорт топлива, к которому приходится прибегать многим европейским государствам, ставит их в тяжелую зависимость от стран экспортирующих, особенно сильно осложняющуюся в периоды военных столкновений. Ввиду этого в настоящее время, помимо технических и экономических соображений, делающих выгодной электрификацию отдельных линий в каждом конкретном случае, многие страны начали разрешать проблему электрификации своих дорог с общегосударственной точки зрения, исходя из своих энергетических ресурсов. Во многих государствах были образованы специальные государственные комиссии для общей разработки и планировки этой проблемы.

Из европейских стран, ставящих в своем относительном масштабе наиболее широко проблему электрификации жел. дор., первой следует поставить Швейцарию, решившую произвести полную электрификацию всех своих дорог. К 1935 году она уже перевела на электрическую тягу около 50% всех своих железнодорожных путей и стала перевозить по этим путям больше 65% всего своего грузооборота. Из отдельных электрических дорог Швейцарии следует обратить внимание на сеть государ-

НТБ УИИНТ (ДІІТ)

ственных дорог Schweizerische Bundesbahn (S. B. B.), из которых особый интерес представляет Сен-Готтардская линия Luzern — Chiasso. Из дорог частных обществ обращают на себя внимание Лечбергская, Bern — Lötschberg — Simplon (B. L. S. B.), и Рэтийская, Rätische Bahn (R. B.). В настоящее время Швейцария продолжает энергично проводить в жизнь намеченную программу электрификации всех своих дорог.

Вслед за Швейцарией по темпу перевода на электрическую тягу своих дорог идет Италия. Наиболее энергично она развивает электрификацию своей сети в северных горных провинциях, хотя в последнее время начала ее и в центральных и южных областях. Из дорог Италии, наиболее часто цитируемых в литературе, нужно указать на уже отмеченную Вальтелинскую, Valtelino, и линию Джови, Giovie — Linie. В настоящее время в Италии издан декрет о полном переходе на электрическую тягу.

Очень большая программа по электрификации дорог намечена Францией, поставившей задачу перевести на электрическую тягу свыше 8 000 km своей сети. К электрификации дорог правительством привлечены три крупнейших железнодорожных общества Франции: общество Южно-французских жел. дор., Chemins de fer du Midi (Ch. d. f. d. M.), общество Париж — Орлеан, Paris — Orléans (P. O.). и Париж — Лион — Средиземное море, Paris — Lyon — Méditerranée (P. L. M.). Наиболее интенсивно электрификацию проводят Южно-французские жел. дор., уже электрифицировавшие около 1 700 km и приступившие к электрификации следующих 700 km своих линий.

Германия, производящая опыты с электрической тягой, очень широко ставит вопрос об электрификации дорог в Баварии, где уже электрифицировано к 1935 году около 1 500 km. Из других дорог в Германии следует указать на линию Magdebourg — Halle — Leipzig (M. H. L.) и горные дороги в Силезии, имеющие соответственно длину 184 и 212 km. Большую деятельность в отношении электрификации своих дорог проявляет Швеция Из ее дорог обращает на себя внимание линия Kiruna — Rinsgränsen (K. R.) с прилегающими к ней ветвями на Svarton, Nottavaar'y и Narvik, общей протяженностью около 430 km. Несмотря на свое тяжелое экономическое положение, энергично электрифицирует свои дороги Австрия. Очень интересны австрийские горные линии Arlbergstrecke — Innsbruck Buchs (A. I. B.), длиною 171 km и Salzkammergeŝtrecke (S. B.) — 107 km.

Электрификация железных дорог не ограничивается приведенными государствами. Она захватила в настоящее время почти все страны мира. В Европе — Англия, Бельгия, Голландия, Норвегия, Испания, Чехословакия, Венгрия, Польша и Югославия, в Америке — Канада, Мексика, Бразилия, Чили, Аргентина, остров Куба — все в большей или меньшей степени электрифицируют свои дороги. Из Европы и Америки уже давно электрификация перенесена в Австралию, Японию и за последнее время в Индию, на юг Африки и в Марокко.

Очень широко ставит вопрос об электрификации своего транспорта СССР. Исключительный рост промышленности заставляет Советский Союз неизбежно искать способов поставить на должную высоту свой транспорт. Без надлежащего развития провозной способности железнодорожной сети невозможно должным образом обеспечить и дальнейшее развитие общей хозяйственной жизни страны. В условиях Советского Союза электрификация транспорта должна дать особенно большой эффект. Прежде всего с помощью электрификации можно резко повысить провозную способность существующих линий. При относительно недостаточно пока развитой железнодорожной сети Союза такая возможность имеет особенно большое значение. С точки зрения энергетической электрификация транспорта должна также дать большой эффект. При огромной территории Союза чрезвычайно важно использовать местные топливные ресурсы. Это дает возможность освободить сеть железных дорог от больших перевозок топлива для нужд транспорта и направить высокие сорта топлива в такие производства, где без них действительно обойтись не представляется возможным. Союз богат топливом, но и для него важно его экономить, особенно высокие сорта. С технической точки зрения электрификация транспорта для Союза имеет также исключительно важное значение. Особенно здесь ценно то, что при электрической тяге требуется меньшая затрата рабочей силы, и, кроме того, работа рабочего персонала протекает в общем в гораздо лучшей обстановке, чем при тяге паровой. Первой дорогой, переведенной на электрическую тягу в СССР, является линия Баку — Сабунчи. Второй вступила в работу пригородная линия Северных железных дорог Московского узла. Из тяжелых дорог первым был электрифицирован. Сурамский участок Закавказских железных дорог.

БГУИР (ДІТ)

В настоящее время работает на электрической тяге Луньевская линия Уральской железнодорожной сети. Вступили в работу также участки Закавказской магистрали, примыкающие к Тифлису. Электрифицирована одна из важнейших линий Сталинской железной дороги, ст. им. Кагановича — Запорожье. Открыто движение на линии Свердловск — Гора Благодатская. Закончена электрификация участка Кировской магистрали, Кандалакша — Апатиты. Переведены также на электрическую тягу пригородные участки Московско-Казанской железной дороги, Горьковской линии Московско-Курской железной дороги, Ораниенбаумской линии и линии Лигово — Красное село Октябрьской железной дороги.

В ближайшие годы электрификация транспорта должна развиваться с исключительною интенсивностью. В текущую пятилетку намечено электрифицировать 5 700 km путей. Предположено произвести широкую электрификацию Уральских железных дорог, дорог Донбасса, Закавказья, Сибири и ряда других дорог. Особенно заслуживает внимания начавшаяся электрификация Кировской магистрали.

Широко также намечено развитие электрического городского транспорта. Намечены большие планы по развитию существующих трамваев и постройка новых в ряде городов. Начато сооружение Московского метрополитена второй очереди.

Очень большие работы предстоят по электрификации индустриально-промышленного транспорта Союза. Гиганты-заводы и заводские комбинаты требуют наиболее технически совершенного транспорта. Таковым несомненно является электрическая тяга, способная в условиях производства проявить в полной мере свои технические и экономические преимущества. Электрификация крупных заводов, фабрик и рудников является ближайщей задачей нащей промышленности. Магнитогорский комбинат в этом отношении может служить весьма показательным примером.

Союзные органы правительства и партия придают делу электрификации транспорта исключительно важное значение. Много внимания этому делу было уделено на июньском пленуме ЦК ВКП(б) 1931 г., на XVII партийной конференции и на XVII Съезде ВКП(б). Особенно важно отметить постановление июньского пленума ЦК ВКП(б) 1931 г., на котором было признано, что в процессе реконструкции союзного транспорта руководящим звеном должен быть электровоз (Л. 49).

2. Классификация электрических железных дорог.

По роду выполняемых перевозок электрические железные дороги подразделяются на дороги магистральные, междугородные, подъездные пути, пригородные, городские и индустриальные.

Магистралями называются дороги, имеющие общегосударственное значение. Характеризуются они наличием на них движения поездов различного типа — товарных и пассажирских, с подразделением последних по большей части на почтовые, скорые и курьерские. Движение на магистралях не приурочивается к каким-либо определенным часам суток, а совершается во все часы суток. Скорости движения часто достигают высоких значений, доходя до 150 km. Магистрали, имеющие особо важное государственное значение и предназначаемые для выполнения специальных массовых перевозок, носят название сверхмагистралей.

Междугородные железные дороги имеют целью обеспечить удобное сообщение между отдельными административными или промышленными центрами, если таковые по тем или другим причинам не находятся на магистрали. Движение здесь чаще доминирует пассажирское с поездами несколько облегченного типа. Очень часто оно производится в определенные часы суток, удобные для выезда и прибытия пассажиров. Скорости берутся высокими, приближающимися к магистральным.

Подъездные пути предназначаются для установления железнодорожной связи между крупными промышленными или вообще хозяйственными центрами с магистралью. Движение здесь преимущественно товарное с низкими скоростями. Среди этих дорог много с узкой колеей и с относительно слабым рельсовым путем.

Пригородные дороги обслуживают интересы пригородов, тяготеющих к большим городам. Преимущественно этот тип дорог служит для перевозки рабочих и служащих из загородных мест жилья к месту службы. К этой же категории дорог относятся и специальные дачные линии Дороги пригородного типа чаще всего обслуживаются поездами, состоящими из комбинаций моторных и прицепных вагонов. Поезда с электровозами здесь применяются относительно редко. Интенсивность движения на пригородных и дачных линиях по большей части резко колеблется,

НТБ УИУНТ (ДІІТ)

давая в определенные дни и часы суток ярко выраженные пики. Наибольшие скорости доходят до 110 km/h, и средние нормально колеблются в пределах 35—60 k m/h.

Городские железные дороги разбиваются на две основные группы. К первой относятся дороги с рельсовым путем, уложенным в уровне поверхности улиц. Этот тип носит название трамваев. Ко второй категории принадлежат дороги с собственным полотном, называемые метрополитенами. Они бывают двух типов — подземные и надземные. Первые прокладываются в особых тоннелях Вторые идут на эстакадах, приподнятых над уровнем земли. Подземные дороги могут быть проведены в какой угодно части города, надземные же могут быть применены только на окраинах или вообще на таких улицах, где допустимо соорудить эстакаду. Стоимость постройки метрополитенов, особенно подземных, чрезвычайно велика. Ввиду этого к ним прибегают наиболее богатые мировые центры, имеющие многокилометровую городскую периферию и такие пассажирские потоки, с которыми справиться трамвай не в силах.

На трамвайных линиях обращаются поезда, состоящие из одного моторного вагона или моторного с прицепным, или иногда моторного с двумя прицепными. Наибольшие скорости трамвайного движения не превосходят 30—40 km/h, и средние колеблются от 13 до 20 km/h. Метрополитены обслуживаются поездными составами, формирующимися из моторных и прицепных вагонов. Скорости движения доходят до 70 km/h. Средние скорости передвижения пассажиров достигают 30—40 km/h. При таких условиях даже в очень больших городах пассажиры могут быстро перебрасываться из одной части города в другую.

Особую категорию железных дорог составляют дороги индустриального типа, предназначаемые для обслуживания промышленных предприятий. Дороги эти могут быть разбиты на два основных класса: на фабрично-заводские и горно-рудничные. Первый тип дорог имеет назначением обслуживать внутризаводской транспорт путем установления связи между отдельными цехами и складами, между цехами, складами и сортировочными станциями. Горно-рудничные железные дороги имеют своим назначением обслуживать рудное и угольное производство. Дороги эти разделяются на надземные и подземные.

По характеру осуществления движения электрические железные дороги могут быть разбиты на дороги нормально рельсовые, зубчато-рельсовые и безрельсовые. Зубчато-рельсовые дороги конструируются с прокладкой между ходовыми рельсами особой зубчатой рейки, сцепляющейся с зубчатым колесом, помещенным в электровозе или моторном вагоне и приводимым в движение тяговыми двигателями. Зубчатые дороги применяются в тех случаях, когда приходится осуществлять движение на крутых подъемах, преодолеть которые при нормальной тяге не представляется возможным.

При безрельсовых дорогах движение осуществляется без рельсового пути непосредственно по мостовой или шоссе. Этот тип движения отличается от обычного автобусного тем, что в данном случае автобусы, называемые троллейбусами, приводятся в движение двигателями, питающимися током через особую контактную систему. Последняя состоит из прямого и обратного верхних контактных проводов, по которым скользят специальные токоприемники, шарнирно связанные с вагоном и потому позволяющие последнему в определенных пределах свободно маневрировать по ширине улицы или шоссе. Применение безрельсовых железных дорог на практике осуществляется, главным образом, в случаях недостаточно интенсивного движения, когда сооружение рельсового пути из-за его большой стоимости становится нерентабельным. При интенсивном же движении применение безрельсовых дорог оказывается преимущественно рациональным там, где по местным условиям, например, при недостаточной ширине улиц не целесообразно иметь рельсовый путь, или где один рельсовый транспорт не справляется с перевозками. Эксплоатация безрельсовых дорог может быть надежна только при наличии хороших мостовых и шоссе.

Особый тип передвижения составляют подвесные электрические железные дороги. В данном случае движение осуществляется с помощью специальных вагонеток, подвешенных к расположенным над ними тележкам. Последние перемещаются по металлическим тросам, поддерживаемым специальными опорами. Подвесные дороги применяются, главным образом, для индустриальных целей, а также в ряде случаев для передвижения через болота, пропасти и вообще трудно доступные местности.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

По способу производства и получения энергии для движения электрические дороги делятся на питающиеся энергией от центральных электрических станций и на производящие ее в локомотиве, вагоне или вообще поезде. Первый тип дорог работает с той или другой контактной системой подводки тока. Второй тип является несвязанным с ней. В последнем случае тяговые двигатели работают от поездной электрической станции, состоящей из генераторов, приводимых в движение механическими двигателями, чаще всего двигателями внутреннего сгорания. Из различных типов самоходов подобного рода, выполняемых и в виде вагонов и в виде локомотивов, наибольшее значение в настоящее время начинают получать тепловозы, представляющие собою дизель-электрические локомотивы. Обращает на себя внимание также применение быстроходных вагонов-самоходов для движения со скоростями, которые удалось довести до 205,3 km/h.

Промежуточное место между рассмотренными системами занимает аккумуляторная тяга. Энергия для движения здесь доставляется аккумуляторами, находящимися в поезде, и потому аккумуляторные дороги свободны от контактных систем подводки тока. Однако, они связаны со стационарными электрическими станциями, от которых приходится заряжать тяговые батареи. Аккумуляторная железнодорожная тяга осуществляется или с помощью вагонов-самоходов, или с помощью аккумуляторных электровозов.

3. Сравнение преимуществ и недостатков паровой и электрической тяги.

Основное преимущество электрической тяги обусловливается способом производства энергии для движения поездов. При паровой тяге движение производится за счет энергии пара, вырабатываемого в самом локомотиве. Для осуществления этого необходимо иметь запасы топлива, воды, возить с собой котел и тендер. Все это увеличивает мертвый груз поезда и отражается на расходе энергии. Помимо этого, паровоз на остановочных пунктах и при движении с выключенными машинами бывает вынужден длительное время находиться непроизводительно под парами.

При электрической тяге производство электрической энергии сосредоточивается на центральных станциях. Помещать последние можно в местах наиболее удобных с точки зрения доставки топлива и организации водоснабжения. При стационарном производстве энергии, особенно при больших мощностях, представляется возможным применять наиболее совершенные типы станционных машин и использовать наиболее совершенные методы производства пара. Коэфициент полезного действия современных мощных центральных электрических станций достигает 22—24%. Паровозы же дают его не выше 6—7% и, главное, требуют топлива высокого качества, между тем как центральные станции могут работать на дешевом горючем — низкосортном угле, угольной пыли и торфе. Особенно выгодной электрическая тяга становится при использовании водных сил страны для выработки энергии.

ТАБЛИЦА 1.

Расход топлива на движение при паровой и электрической тяге.

Дороги	Расход угля на tkm в kg	
	Пар. тяга	Электр. тяга
N. H. H. R.	0,072	0,037
S. B. B.	0,078	0,037
B. L. S. B	0,085	0,047
R. B.	0,104	0,056

Благодаря более высокому коэфициенту полезного действия центральных электрических станций по сравнению с паровозами, общий расход топлива при прочих равных условиях значительно ниже при электрической тяге, чем при паровой. Характерно, что это имеет место, несмотря на ряд потерь энергии в промежуточных звеньях электрических железных дорог, в линиях передачи, подстанциях и контактных системах. Табл. 1, приведенная на основании данных H. Stockar'a (Л. 4), показывает, какой количественный эффект в сбережении топлива был получен путем перехода некоторых паровых железных дорог на электрическую тягу. Расход топлива в ней дан в килограммах угля, потребного для перевозки одной тонны брутто груза на расстоянии одного километра.

Такие же благоприятные результаты были получены и на ряде других дорог, перешедших на электрическую тягу. Перевод на электрическую тягу германских дорог в Силезии дал экономию в топливе на 40%. Немцы подсчитали, что если бы все прусские железные дороги перевести на электрическую тягу, то можно

НБ УНИНТ (ДІІТ)

было бы вместо потребляемых теперь 13 миллионов тонн угля расходовать всего 5 миллионов тонн. Приведенные цифры показывают, что государства, производящие электрификацию железных дорог в общегосударственном масштабе, могут добиться решительного переворота в балансе своих энергетических ресурсов. Это положение становится особенно очевидным, если учесть, что современные передовые страны затрачивают на транспорт до 15—35% от всего топлива, ими потребляемого.

Второе важное преимущество электрической тяги обусловлено тяговыми свойствами электровоза и паровоза. В целях рационального производства движения выгодно иметь локомотивы, позволяющие варьировать скорости движения поездов и, главное, допускающие достаточно длительные и большие перегрузки своих машин. Мощность паровоза определяется, главным образом, паропроизводительностью его котла. Она, по условиям экономики расхода топлива, нормально устанавливается из расчета в потребности пара для средних условий движения. Ввиду этого при паровой тяге приходится претерпевать очень большие затруднения в тех случаях, когда нужно получать от паровоза мощности, значительно превышающие средне-расчетные, особенно если их требуется иметь длительно. При организации движения большие перегрузки локомотивов требуются для преодоления больших подъемов и для получения высоких ускорений при разгоне поезда. Особенно большие затруднения при паровой тяге получаются в условиях горных профилей. Опыт паровых дорог показывает, что паровозы на подъемах и вообще тяжелых местах профиля сильно снижают скорость движения. По тем же причинам они не могут развивать достаточно интенсивных начальных ускорений, что особенно важно для поездов, вынужденных делать частые остановки. Отмеченные свойства паровозов влекут за собою сильное снижение пропускной способности дорог, а при малых расстояниях между станциями и сильное снижение средних скоростей.

Электровоз в этом отношении обладает более благоприятными свойствами. Энергию он берет от таких мощных по большей части центральных электрических станций, которые могут давать для единичных поездов столько энергии, сколько ее нужно для рациональной постановки движения. Перегрузки современных тяговых двигателей допускаются до 100% от их номинальных мощностей. Важно отметить, что к.п.д. у них достигает больших значений и держится устойчиво на высокой величине в широком диапазоне изменения скоростей. При таких условиях электрические поезда на подъемах могут развивать большие скорости, а при разгоне — большие ускорения, что обеспечивает и большие пропускные способности и большие средние скорости движения. Лучшие типы современных электровозов позволяют варьировать скорости поездов так, как это оказывается выгодным по совокупности условий рациональной организации движения.

В отношении рабочей выносливости электрические локомотивы значительно превосходят паровые. Электровозы не имеют парового котла, являющегося наиболее слабою частью паровоза. Технические осмотры и ремонт требуют при них значительно меньше времени, чем при паровозах. Общая стоимость содержания локомотивного состава при электрической тяге, как общее правило, значительно ниже, чем при паровой. То же наблюдается и в отношении годовых пробегов локомотивов, характеризующих собою степень их использования.

Годовые пробеги электровозов по большей части получаются выше паровозов в зависимости от типа движения на 50—100%.

Из прочих расходов эксплоатации при переходе на электрическую тягу нормально значительно снижается стоимость содержания локомотивных и кондукторских бригад. Паровоз для своего обслуживания и управления требует не меньше двух-трех человек, а электровоз — не больше двух, а в случае товарного движения нередко ограничивается и одним. Стоимость содержания кондукторских бригад при электрической тяге понижается, главным образом, благодаря увеличению средних скоростей движения и составов поездов.

Большим преимуществом электрической тяги является возможность осуществления при ней электрического торможения поезда с отдачей энергии в сеть. Данный метод торможения, называемый рекуперативным или регенеративным, основывается на принципе обратимости электрических машин. Для производства торможения тяговые двигатели переводятся на работу генераторами, посылающими энергию в сеть и развивающими за счет генераторного эффекта тормозные усилия на осях локомотива. Рекуперативное торможение дает возможность значительно

НВ УДУНТ (ДІІТ)

снижать расход энергии на движение и, главное, устранять торможение колодками, представляющее большие затруднения в эксплоатации, особенно в условиях горных дорог.

Следует также обратить внимание и на такие преимущества электрической тяги, как отсутствия дыма, гари и искр, что особенно важно при организации движения в населенных пунктах.

Приведенные преимущества электрической тяги делают понятным широкое применение ее на современных железных дорогах. Особенно большие преимущества она дает в условиях городского движения. Здесь электричество в настоящее время имеет доминирующее применение, и отсюда пар вытеснен окончательно. В условиях тяжелой тяги вопрос обстоит несколько иначе. Здесь пока паровая тяга удерживает свое преобладающее положение. Это объясняется, главным образом, тем, что перевод паровых железных дорог на электрическую тягу требует вложения новых капиталов, на что частные общества и даже государства в условиях капиталистического строя идут с неохотой, предпочитая эксплоатировать хотя бы и с меньшим эффектом старые вложения. Следует также отметить, что первоначальная стоимость сооружения электрических дорог получается в среднем несколько выше стоимости сооружения паровых, что влечет за собой и более высокие расходы по амортизации имущества и по вложенным капиталам. Ввиду этого электрическая тяга становится выгодной только при определенной густоте движения, когда значение прямых эксплоатационных расходов, получающихся при ней значительно более низкими, начинает преобладать над расходами косвенными. Чем интенсивнее движение, тем выгоднее становится электрическая тяга.

ТАБЛИЦА 2.
Эксплоатационные расходы дороги Ch. M. St. P. R.

Статьи расхода	Расходы в центах на 1 000 tkm брутто	
	Пар. тяга	Электр. тяга
Содержание и ремонт линий передачи энергии и контакт. проводов	—	2,3
То же подстанций . . .	—	0,7
То же локомотивов	30,5	10,9
Содержание электровозных бригад .	19,1	10,6
То же кондукторских	18,0	11,1
Стоимость топлива, или энергии . .	40,9	28,1
Прочие расходы, зависящие от типа тяги . .	28,4	19,1
Итого	136,9	82,8

ТАБЛИЦА 3.
Эксплоатационные расходы Баварских железных дорог.

Статьи расхода	Общие расходы в золотых марках	
	Пар. тяга	Электр. тяга
Топливо или энергия .	11 054 250	2 627 000
Смазка локомотивов	92 320	60 850
Водоснабжение	114 000	——
Содержание и ремонт локомотивов .	6 740 000	4 178 800
Электровозные бригады	2 143 020	1 632 000
Электрич. сети сильного и слабого токов	225 000	470 000
Освещение вокзалов и мастерских .	1 129 000	210 000
Амортизация .	1 336 940	1 940 000
Итого .	22 834 530	11 118 650

Как было только что отмечено, стоимость сооружения дороги при электрической тяге получается выше стоимости дорог при паровой тяге. Однако, иногда получается и обратная картина. Особенно часто это может иметь место при сооружении горных дорог. Электрическая тяга допускает значительно более высокие предельные подъемы, что во многих случаях дает возможность прокладывать линии по более прямым направлениям и этим самым, сокращая длину, уменьшать стоимость их сооружения. Это уменьшение бывает настолько значительным, что и общая стоимость сооружения дороги при электрической тяге, несмотря на добавочное электрическое оборудование, может получаться ниже, чем при паровой тяге.

Для выяснения перспектив, на которые можно рассчитывать при переходе на электрическую тягу, приведены таблицы 2 и 3, дающие сравнительные данные эксплоатации при паровой и электрической тяге. Табл. 2 приводит результаты эксплоатации дороги Ch. M. St. P. R.

Общий эффект электрификации дороги Ch. M. St. P. R.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

оказался настолько значительным, что из чистой прибыли, обусловленной переходом на электрическую тягу, удалось в течение первых восьми лет эксплоатации покрыть 80% первоначальных в нее вложений. Это было достигнуто, несмотря на то, что действительный грузооборот дороги оказался значительно ниже предполагаемого.

Табл. 3 дает картину эксплоатации при паровой и электрической тяге Баварских железных дорог, получающих энергию от гидравлических станций (Л. 17).

На капитал, вложенный в электрификацию Баварских железных дорог, было получено 9,6% прибыли, хотя, как и в предыдущем случае, вследствие послевоенной депрессии интенсивность перевозок оказалась ниже чем она была до войны.

Данные, приведенные в табл. 2 и 3, подтверждаются результатами эксплоатации ряда других ж. д. Европы и Америки. По общим данным американских ж. д., при переходе на электрическую тягу снижение прямых эксплоатационных расходов в большинстве случаев достигает 30—60%. Результаты эксплоатации электрифицированных дорог СССР получаются также весьма благоприятными. Особенно следует отметить возрастание при электрификации пропускной и провозной способности дорог. Весьма также показательно получаемое повышение скоростей движения поездов, значительно превосходящих скорости при тяге паровой.

Кроме паровоза и электровоза, в настоящее время начинают получать применение тепловозы. Последние представляют собою локомотивы, главной машиной у которых является дизель. Тепловозы разбиваются на два основных типа. В первом—дизель является тяговым двигателем, приводящим в движение сцепные оси с помощью различного рода приводов. Во втором—дизель работает на динамомашину, производящую ток для питания тяговых электродвигателей, работающих на том же принципе, как и в обычном электровозе. Основное достоинство тепловозов заключается в высоком коэфициенте полезного действия дизелей. Общий к.п.д. тепловоза с электрическим приводом нужно определить в 23—26%. Естественно, что с точки зрения энергетики тепловоз не знает соперников. Кроме того, тепловоз, не имея парового котла, требует относительно мало воды, потребляемой им только для охлаждения цилиндров дизелей.

Основным недостатком тепловозов является сложность оборудования, большая первоначальная стоимость и дороговизна эксплоатации. Дизель по своему существу является машиной сложной, требующей тщательного ухода. Как показывает экономика, тепловозы выгодны, главным образом, для местностей безводных или удаленных на большие расстояния от мест добычи топлива и особенно для линий подобного типа с относительно мало интенсивным движением. В условиях СССР тепловозная тяга в указанных условиях получает значительное распространение.

В отдельных случаях тепловоз оказывается серьезным конкурентом электровозу. Однако, при организации перевозок в общегосударственном масштабе он с электровозом конкурировать не может.

4. Системы электрической тяги.

Системы тяги с электрической точки зрения классифицируются по роду тока, применяемого для производства движения. В настоящее время дороги работают на токе постоянном, однофазном, трехфазном, а также применяются и системы, основанные на комбинациях этих трех основных.

Системы тяги на постоянном токе применяются в двух вариантах. В первом варианте на генераторных станциях вырабатывается такой же ток, какой берется и для питания тяговых двигателей. Во втором случае генераторные станции производят ток трехфазный, который затем преобразуется на подстанциях в ток постоянный. На практике наиболее часто применяется вторая система, причем частоту трехфазного тока предпочитают брать той же самой, как и для промышленно-осветительных сетей, т. е. в Европе 50 Hz, в Америке 60 Hz. При этих условиях получается возможность объединять питание дорог с питанием промышленно-осветительных установок, что представляет большие выгоды с точки зрения производства и передачи энергии. Нужно указать, что в Америке, имеющей, кроме сетей с 60 Hz, большие сети с 25 Hz, много дорог постоянного тока питается от сетей последнего типа.

Напряжение постоянного тока, применяемого для тяговых целей, берется от 500 до 4000 V. Для трамваев оно колеблется в пределах 500—600 V, на метрополитенах 600—900, на пригородных дорогах 600—3000 и на дорогах дальнего движения от 1500 до 4000 V.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Системы тяги на однофазном токе в настоящее время выполняются в различных формах. Чаще всего частота тока на генераторных станциях и в контактной системе берется одной и той же. В Европе ее берут равной $16^2/_3$ Hz, в Америке — 25 Hz. Такие низкие частоты объясняются тем, что однофазные тяговые двигатели пока не удается удовлетворительно сконструировать на частоты более высокие Большим недостатком подобной системы является невозможность при ней объединить питание дорог с питанием общепромышленных установок. Для устранения этого недочета иногда прибегают к различным родам тока для линий передачи и для контактных систем. При такой схеме генераторные станции и линии передачи работают на трехфазном токе промышленной частоты, который затем на подстанциях преобразуют в ток низкочастотный. Для этого, вместо трансформаторных подстанций, применяемых в первой схеме, приходится строить подстанции с дорогими и мало экономичными преобразователями, что сильно умаляет достоинства этой системы. Напряжение в контактной системе при однофазном токе берут в пределах от 11 000 до 22 000 V. В Европе почти исключительно работают на 15 000—16 000 V, в Америке же чаще применяют 11 000 V.

Дороги трехфазного тока, как и однофазного, наиболее часто работают на токах низких частот, применяемых как на генераторных станциях, так и в контактных системах. Появление подобных систем объясняется стремлением получить при низких частотах меньшее падение напряжения в линиях и улучшить коэфициент мощности установки. Отчасти здесь также имело значение мнение, теперь уже устаревшее, о преимуществах электровозов без зубчатых передач между валом двигателя и осями. Для таких электровозов по конструктивным соображениям выгоднее иметь двигатели, питаемые токами низких частот. С общеэнергетической точки зрения применяемые системы трехфазной тяги, как не дающие возможности объединять электроснабжение дорог и промышленно-осветительных установок, имеют существенные недостатки. Для их устранения за последнее время в Италии начали производить опыты с трехфазными дорогами, работающими на токе с промышленной частотой, равной там 45 Hz. Опыты позволяют надеяться на благоприятные результаты. При современных условиях, помимо энергетических выгод, подобные системы могут обеспечить и несколько более дешевое электрическое оборудование дорог

Напряжение при трехфазной тяге чаще всего берется около 3 000—3 600 V, и в таких случаях электровозы работают без трансформаторов. Для частот промышленных, в целях уменьшения падения напряжения в линиях, это напряжение повышается до 10 000 V, и тогда применяют в электровозах трансформаторы. Снабжение энергией производится или непосредственно от генераторных станций, или с применением промежуточных понижающих подстанций.

Комбинированные системы электрической тяги применяются в двух основных видах. Первая система имеет в контактной рабочей сети однофазный ток напряжением от 11 000 до 22 000 V, который затем в электровозе преобразуется в ток многофазный. По второй схеме тот же самый однофазный ток преобразуется на электровозе в ток постоянный. При комбинированных системах напряжение в контактной рабочей сети берется от 11 000 до 22 000 V и частота тока от 25 до 50 Hz. Появление комбинированных систем вызвано желанием соединить выгоды однофазного тока высокого напряжения в контактной системе с выгодами применения для тяги трехфазных асинхронных двигателей или двигателей постоянного тока, как более дешевых и более надежных в эксплоатации по сравнению с однофазными коллекторными двигателями, применяющимися при нормальной однофазной тяге.

Какая из разобранных систем тяги является наиболее выгодной, окончательно сказать не представляется пока возможным. Все попытки международных железнодорожных конгрессов установить единую стандартную систему тяги до сего времени не привели к положительным результатам. Сущность окончательных выводов конгрессов сводилась к тому, что вопрос о выгоде применения той или другой системы следует решать индивидуально, применительно к местным условиям того или другого государства.

При выборе рода тяги необходимо учитывать, что каждой системе свойственны свои достоинства и свои недостатки. Главные преимущества постоянного тока заключаются в легком и дешевом подвижном составе. Недостатки его — в несколько усложненном способе преобразования энергии и относительно невысоких напряжениях в рабочей сети, что требует частого расположения подстанций и больших сече-

НВ УДУНТ (ДІІТ)

ний проводов. Постоянный ток особенно выгоден в условиях интенсивного движения, когда стоимость подвижного состава доминирует над стоимостями прочего оборудования дороги.

Однофазная тяга имеет преимущества в отношении возможности применения меньших сечений контактных проводов и меньшего числа подстанций, а в случае подстанций трансформаторных — и в отношении более дешевой их конструкции. Недостатки ее — в дорогом подвижном составе.

Трехфазная тяга характеризуется легким и дешевым подвижным составом. Основной недочет ее в сложной контактной системе. Современное ее выполнение требует при использовании ходовых рельсов для одной из фаз двух воздушных проводов для остальных фаз. Воздушные провода идут на близком расстоянии друг от друга, и их очень трудно изолировать, особенно при разветвленных сетях. В эксплоатации такая система мало надежна. Помимо этого, трехфазные электровозы имеют мало удовлетворительную тяговую характеристику, трудно поддающуюся регулированию. Большим недостатком трехфазной тяги являются и плохие коэфициенты мощности установки, не превышающие в среднем 0,6—0,7.

Преимущества комбинированных систем тяги—в легкой контактной сети и дешевых подстанциях. Недостатки — в сложной конструкции электровозов, в необходимости иметь на них специальные преобразователи. Комбинированные системы наиболее пригодны для тяжелых поездов и мощных электровозов, так как в этом случае весовые соотношения последних получаются наиболее приемлемыми.

К числу недостатков, свойственных всем дорогам, работающим на переменных токах, необходимо отнести влияние рабочих проводов на слаботочные линии. В некоторых случаях это влияние чрезвычайно осложняет работу дорог и требует больших затрат по его ликвидации. При постоянном токе борьба с этим влиянием, происходящим здесь благодаря действию только гармоник, или неустановившихся режимов, особых затруднений не представляет.

Анализ количественного распространения основных систем тяги по отдельным странам и государствам показывает, что наибольшим распространением теперь пользуется тяга на постоянном токе. Городские дороги во всех государствах работают исключительно на этой системе. Для магистральных и пригородных дорог в общегосударственном масштабе тяга на постоянном токе принята за основу во Франции, Бельгии, Англии, Голландии, Чехословакии, Польше, Югославии, Испании, Японии, Канаде, Индии, Австралии, латинской Америке и Африке. В отношении напряжения большинство перечисленных стран предпочитает брать 1 500 V. Напряжение в 3 000 V принято в латинских странах Америки, в Африке, в Польше, в Италии и частично в Испании. Однофазная тяга, как основная, имеет место в Германии, Швейцарии, Австрии и Скандинавии.

Трехфазная тяга применяется почти исключительно в Италии и, главным образом, в ее северных провинциях. В центральных и южных своих частях Италия предпочитает работать на постоянном токе.

Комбинированные системы пока встречаются на отдельных линиях, и только Венгрия ставит теперь вопрос о широком применении однофазно-трехфазной тяги по системе Kando.

Наиболее разнообразно вопрос о системах тяги решают США. Здесь имеют место все основные типы. Примерами могут служить наиболее известные американские дороги. Магистраль Ch. M. St. P. R. работает на постоянном токе при напряжении 3 000 V. Сеть N. H. H. R. — на однофазном токе. Дороги N. W. R. R. и V. R. R. — на однофазно-трехфазной тяге. Линия Форда D. T. I. R. — на системе однофазно-постоянной. Количественно в Америке преобладают дороги постоянного тока.

В СССР вопрос о выборе стандартной системы электрической тяги пока нельзя считать окончательно решенным. В настоящее время дороги электрифицируются на постоянном токе, причем для линии дальнего следования применяется напряжение в контактном проводе 3 000 V, а для пригородных 1 500 V. Нужно, однако, иметь в виду, что всесоюзная конференция по электрификации железнодорожного транспорта признала, что для СССР принципиально является более рациональной система однофазного тока промышленной частоты с напряжением порядка 20—22 kV. Основное преимущество этой системы, как уже было указано выше, заключается в возможности уменьшения сечения контактных проводов и понижения числа подстанций, а также в установлении одного и того же рода тока для нужд транспорта и промышленности. Однако, переход на эту систему затрудняется потому, что пока

НТБ УИИГТ (ДИГТ)

еще не имеется надежно проверенных в длительной эксплоатации электровозов, пригодных для промышленной частоты.

В настоящее время перед техническою мыслью СССР стоит задача проанализировать систему тяги на однофазном токе промышленной частоты Главное задание— сконструировать надежный, достаточно легкий и дешевый электровоз.

5. Основные принципы устройства и действия электрических железных дорог.

Нормальная схема устройства электрической железной дороги трамвайного типа приведена на рис. 1. На таких дорогах от центральной электрической станции энергия обычно кабелями высокого напряжения передается на подстанции. Здесь она

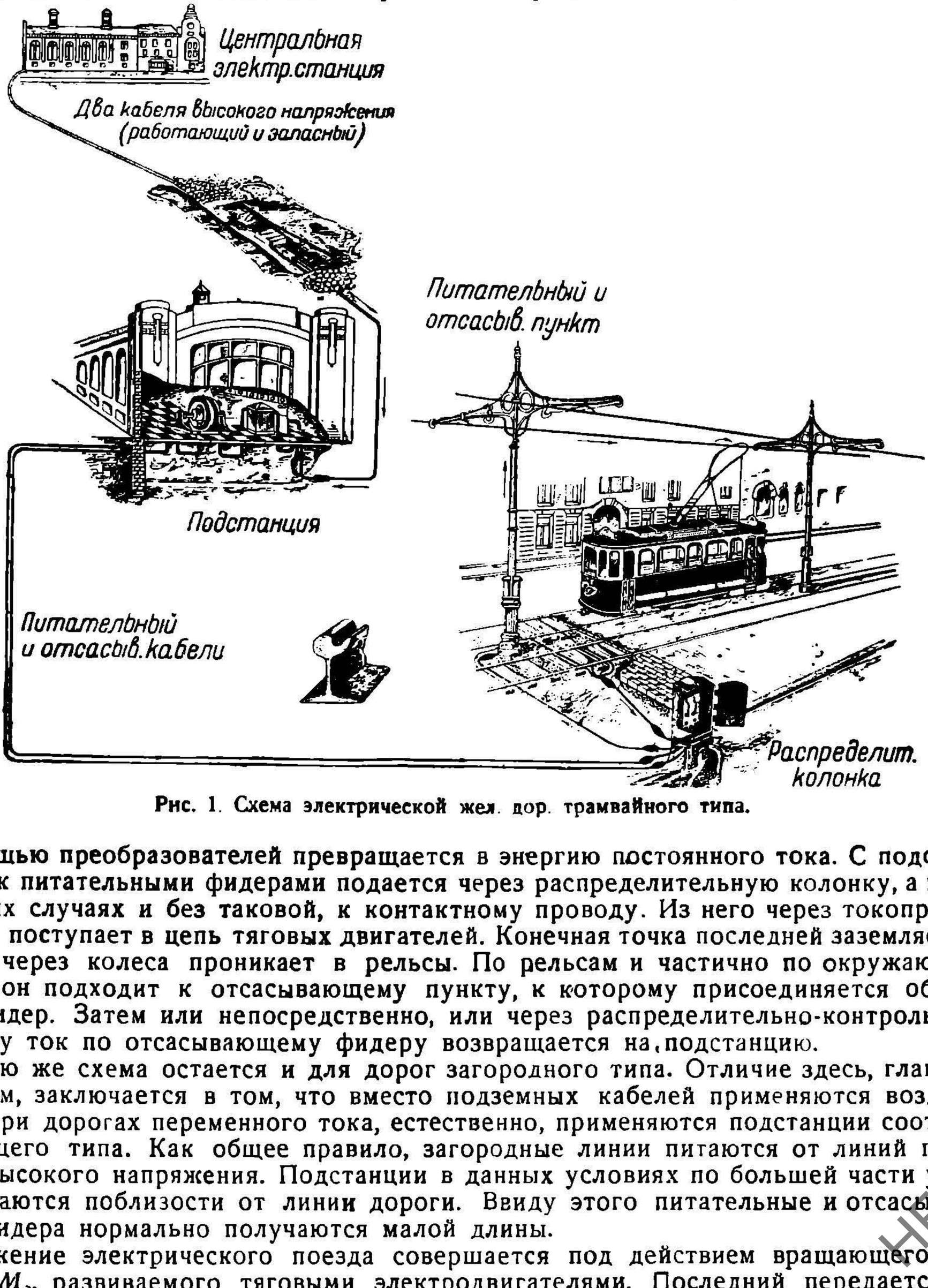


Рис. 1. Схема электрической жел. дор. трамвайного типа.

с помощью преобразователей превращается в энергию постоянного тока. С подстанции ток питательными фидерами подается через распределительную колонку, а в некоторых случаях и без таковой, к контактному проводу. Из него через токоприемник он поступает в цепь тяговых двигателей. Конечная точка последней заземляется, и ток через колеса проникает в рельсы. По рельсам и частично по окружающей почве он подходит к отсасывающему пункту, к которому присоединяется обратный фидер. Затем или непосредственно, или через распределительно-контрольную колонку ток по отсасывающему фидеру возвращается на подстанцию.

Такою же схема остается и для дорог загородного типа. Отличие здесь, главным образом, заключается в том, что вместо подземных кабелей применяются воздушные. При дорогах переменного тока, естественно, применяются подстанции соответствующего типа. Как общее правило, загородные линии питаются от линий передачи высокого напряжения. Подстанции в данных условиях по большей части устанавливаются поблизости от линии дороги. Ввиду этого питательные и отсасывающие фидера нормально получаются малой длины.

Движение электрического поезда совершается под действием вращающего момента M_∂, развиваемого тяговыми электродвигателями. Последний передается на ось или непосредственно, или же с помощью передаточного механизма. На рис. 2

НВ УДУНТ (ДІІТ)

приведен наиболее часто встречающийся случай зубчатой передачи. Если обозначить через $k_з$ передаточное число зубчатой передачи и через $\eta_з$ его к.п.д., то момент M_0, передающийся на ось, может быть определен выражением:

$$M_0 = \eta_з k_з M_д \qquad (1)$$

Полученный момент реализуется на оси в виде пары сил F с плечом R, равным радиусу качения колеса по рельсу. Под действием этой пары колесо стремится вращаться. Встречая в точке соприкосновения с рельсом A как бы упор, колесо получает поступательное передвижение. При взаимодействии колеса с рельсом тангенциальная сила F, компенсируется силой внутренних сопротивлений и реакцией противодействия со стороны рельсов D. В результате из двух сил пары остается активной только сила F, приложенная к оси. За счет данной силы и происходит поступательное движение поезда. В соответствии с этим она носит название силы тяги. Оси, на которых получается сила тяги, называются ведущими или сцепными. Вес, приходящийся на них, получил название сцепного. В случае нескольких электродвигателей тяговой подвижной состав характеризуется силой тяги, равной сумме составляющих, развиваемых всеми отдельными его двигателями.

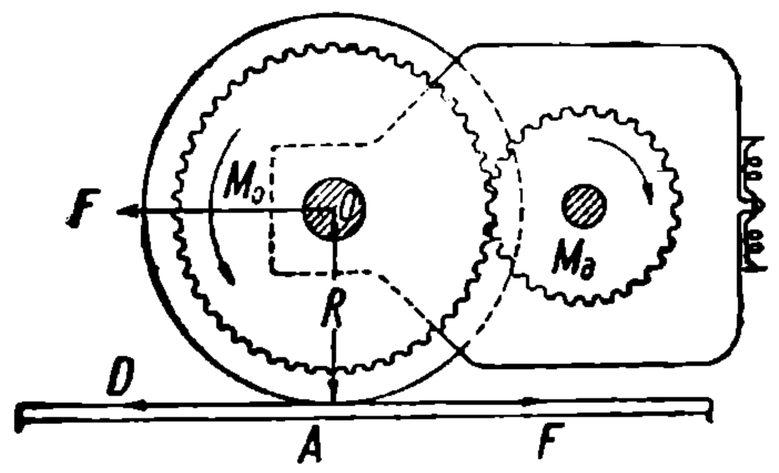


Рис. 2. Схема реализации движения электрического поезда.

Силу тяги, развиваемую двигателями, как указано, принято выражать в kg. Для общего случая движения, при наличии зубчатой передачи между валом двигателя и ведущей осью (рис. 2), выражение для силы тяги при M_0 в mkg и R в m должно получить форму:

$$F = \frac{M_0}{R}. \qquad (2)$$

Это выражение показывает, что сила тяги равняется моменту вращения на оси, деленному на радиус колеса.

Скорость поезда v, если выразить ее, как принято при тяговых расчетах, в km/h, связывается с числом оборотов вала двигателя n, совершаемых в минуту, зависимостью:

$$v = \frac{2 \times 60 \pi n R}{1\,000 k_з}. \qquad (3)$$

Мощность, развиваемая двигателями на валу в лошадиных силах, согласно общему закону, выражается соотношением:

$$PS = \frac{2\pi n M_д}{60 \times 75}. \qquad (4)$$

В соответствии с этим при учете передачи мощность на ведущей оси получает выражение:

$$PS = \frac{2\pi n \eta_з M_д}{60 \times 75} \qquad (5)$$

В теории тяги по большей части мощность двигателей выражают в зависимости от силы тяги в kg и от скорости в km/h. Для получения такого выражения следует подставить в формулу (5) для n значение из формулы (3), а $M_д$ определить из формулы (1) и (2). Указанная подстановка дает искомое выражение мощности в лошадиных силах:

$$PS = \frac{Fv}{270}. \qquad (6)$$

При выражении мощности в киловаттах, что является теперь общепринятым, получается зависимость:

$$KW = \frac{Fv}{367}. \qquad (7)$$

Здесь и в дальнейшем необходимо отличать обозначения символов мощности от единиц измерения мощности. Под символом KW нужно подразумевать символ мощности в киловаттах, а под символом kW — единицу измерения мощности, равную одному киловатту Точно так же через PS будет обозначаться мощность в лошадиных силах, а через PS — единица мощности, равная одной лошадиной силе.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

На основании законов механики движение электрического поезда, как и всякого сложного тела, может быть подчинено уравнению:

$$F - \Sigma R = M_n \frac{dv}{dt}. \tag{8}$$

Обозначения:

F — сила тяги, развиваемая двигателем, в kg;

ΣR — сопротивление движению поезда в kg;

M_n — приведенная масса поезда, учитывающая действие как поступательно движущихся масс, так и вращающихся, в $\frac{\text{kg}}{\text{m/sec}^2}$;

$\frac{dv}{dt}$ — ускорение или замедление поезда в m/sec^2.

Уравнение работы движущегося поезда согласно принципам механики принимает вид:

$$\int_0^l F dl - \int_0^l \Sigma R dl = M_n \frac{v^2 - v_0^2}{2 \times 3{,}6^2} \tag{9}$$

Обозначения:

l — путь, на котором рассматривается движение, в метрах (m);

v_0 и v — скорости в начале и в конце рассматриваемого участка пути в километр-часах (km/h).

В уравнении (9) коэфициент $3{,}6^2$ введен для перевода единиц измерений скоростей из km/h в m/sec.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ОТДЕЛ ВТОРОЙ.

ТЯГОВЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ.

I. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

1. Конструктивные формы двигателей.

Подвесноосевые двигатели. Тяговые двигатели в отношении своей конструкции значительно отличаются от обычных стационарных машин. Объясняется это условиями работы двигателей в поезде, что влечет за собою большие ограничения в выборе их размеров и очень часто вызывает неизбежность особых мероприятий по защите их от пыли, грязи и влаги. По своим конструктивным формам двигатели постоянного тока могут быть разбиты на три основные группы: подвесноосевые, опорнорамные и якорноосевые.

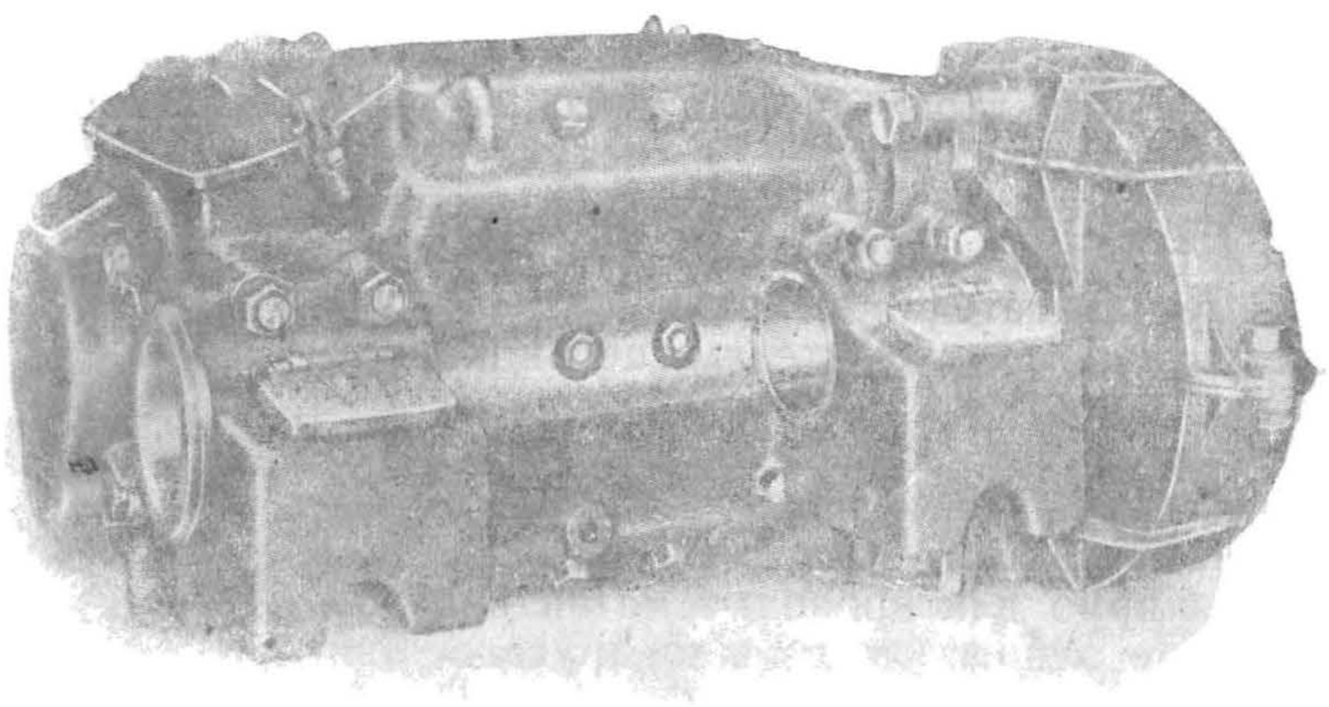


Рис. 3. Общий вид трамвайного двигателя.

На рис. 3, 4, 5 и 6 приведены основные типы подвесноосевых двигателей. Характерной особенностью этой системы является расположение двигателя под кузовом подвижного состава. Двигатель имеет двухстороннюю подвеску. С одной стороны при помощи спиральных пружин он подвешивается к раме тележки или кузова подвижного состава, а с другой стороны он опирается с помощью специальных осевых подшипников на ведущие оси.

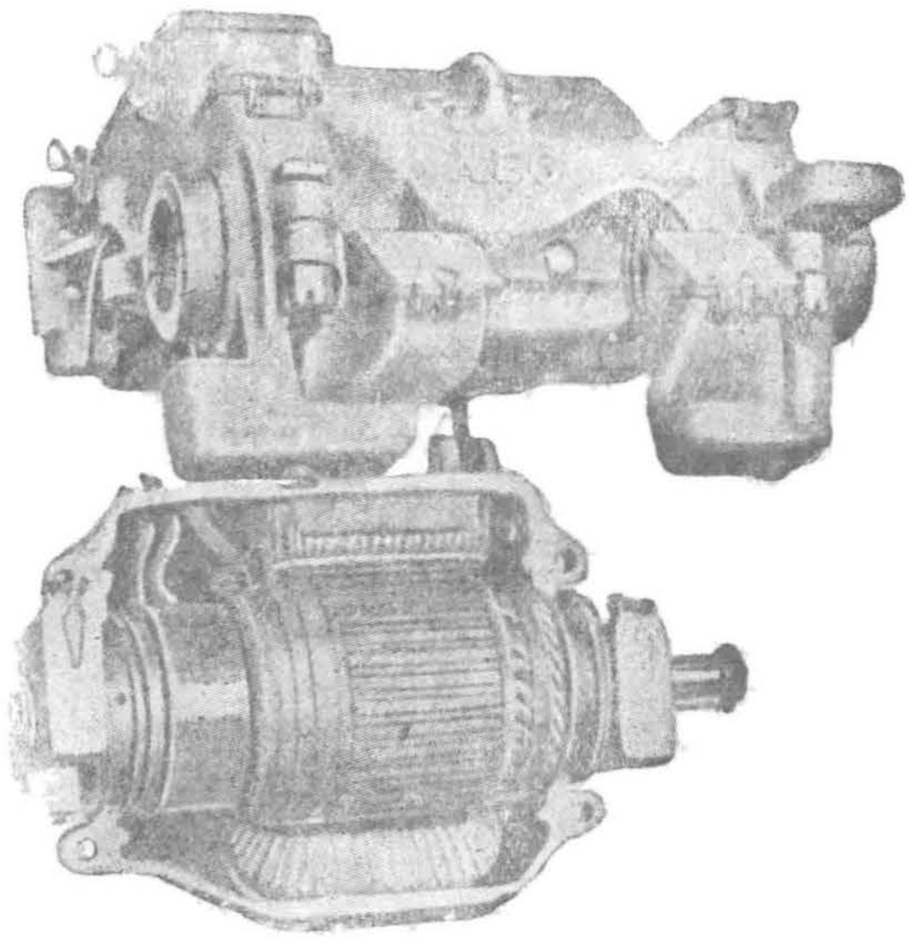


Рис. 4. Трамвайный двигатель с разъемным кожухом.

Как видно из приведенных рисунков, подвесноосевые двигатели выполняются по типу закрытых машин, что вызывается расположением их под кузовом. По способу выполнения защитного кожуха рассматриваемая группа двигателей делится на двигатели разъемные (рис. 4) и двигатели цельнокорпусные (рис. 5). Первый тип имеет кожухи, состоящие из двух отдельных половинок, которые могут отсоединяться одна от другой. Для облегчения осмотра подобных двигателей якорные подшипники их более удобно крепить, в отличие от рис. 4, к верхней части кожуха, что дает возможность откидывать нижнюю половинку, не опасаясь выпадения якорей. В цельнокорпусных двигателях доступ внутрь двигателя производится через лобовые отверстия, предназначаемые для подшипниковых щитов, привинчивающихся к основной части кожуха.

НБ УНУНТ (ДІТ)

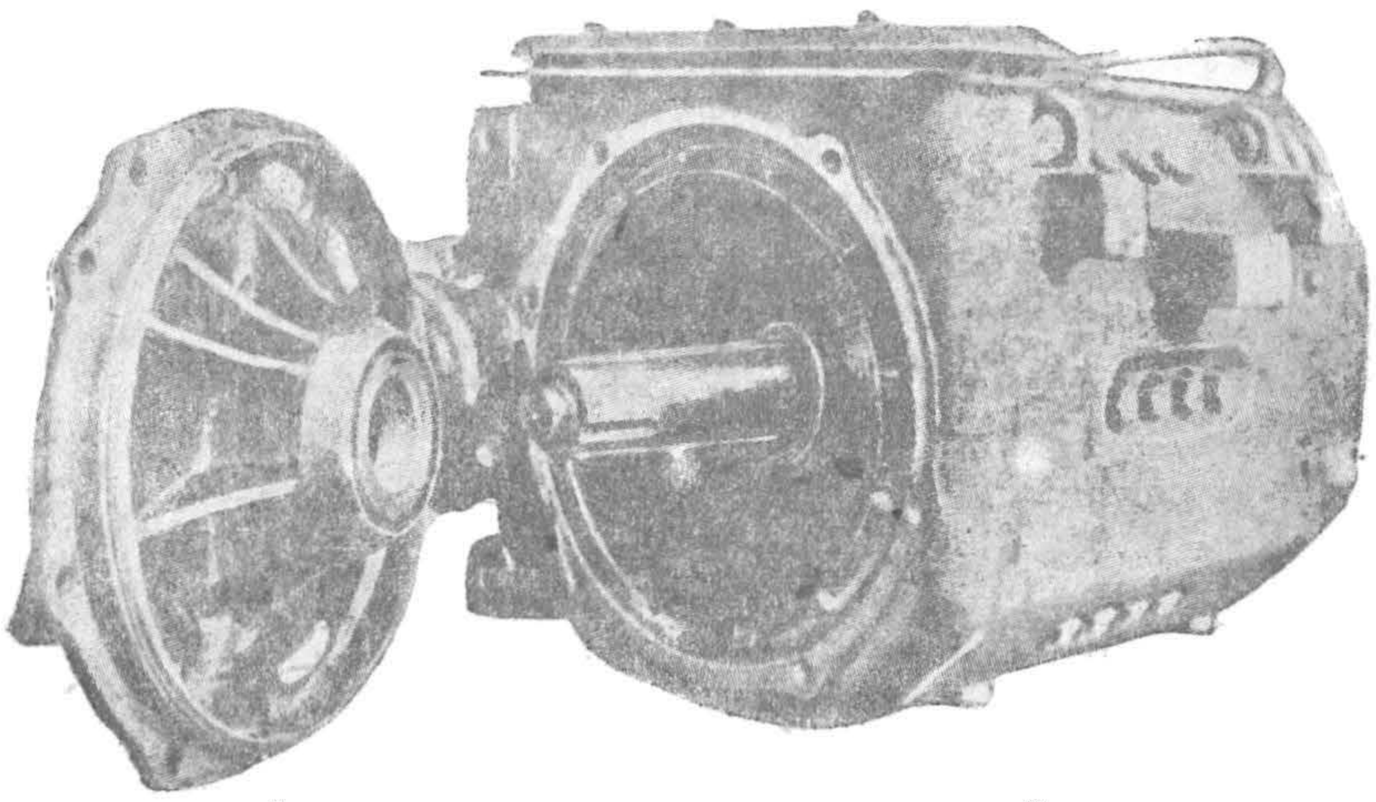


Рис. 5. Цельнокорпусный двигатель трамвайного типа.

Преимущества разъемных двигателей заключаются в возможности вынимать якорь и магнитные катушки, не снимая всего двигателя с подвижного состава, к чему неизбежно приходится прибегать при цельнокорпусных типах. Недостатки же их вызываются наличием мало надежного стыкового соединения между верхней и нижней частями кожуха. Поверхности стыка с течением времени срабатываются, благодаря чему получается антисимметрия в магнитной системе, вызывающая одностороннее прилипание якорей к полюсным наконечникам. Кроме того, длинная периферия стыкового соединения не дает гарантии плотного закрытия кожуха, каковую особенно желательно иметь для двигателей с искусственной вентиляцией. Ввиду большого значения в эксплоатации указанных недостатков, разъемные двигатели выходят из практики, уступая место двигателям цельнокорпусным.

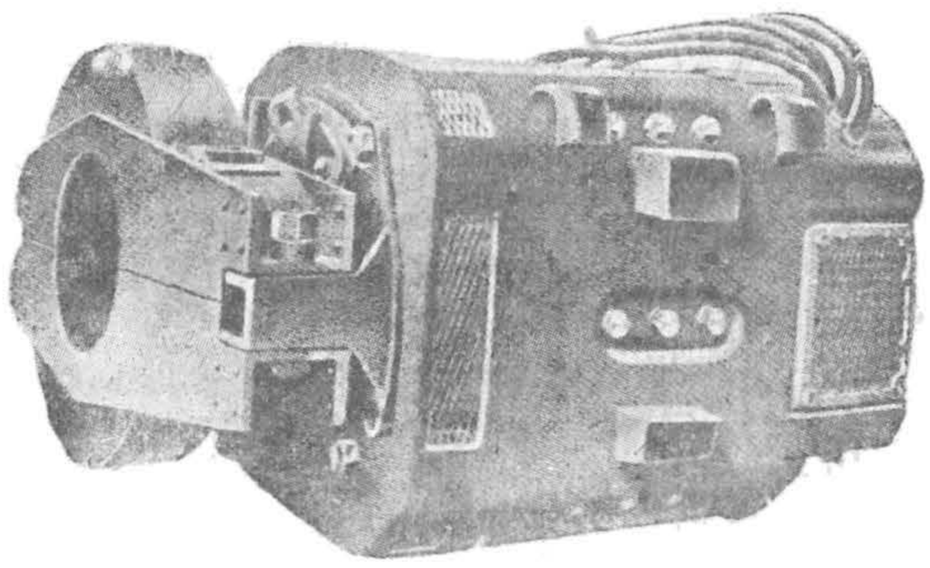


Рис. 6. Подвесноосевой двигатель пригородных электрических жел. дор. Paris-Orleans.

Кожух у подвесноосевых двигателей, помимо своего назначения дать защиту внутренним частям двигателя, используется и как ярмо для проводки магнитного потока от одного полюса до другого. Ввиду последнего обстоятельства в качестве материала для кожуха берется мягкая сталь с возможно высокой магнитной проницаемостью. Толщина кожуха в его активной части, проводящей магнитный поток, нормально колеблется в пределах от 35 mm до 80 mm.

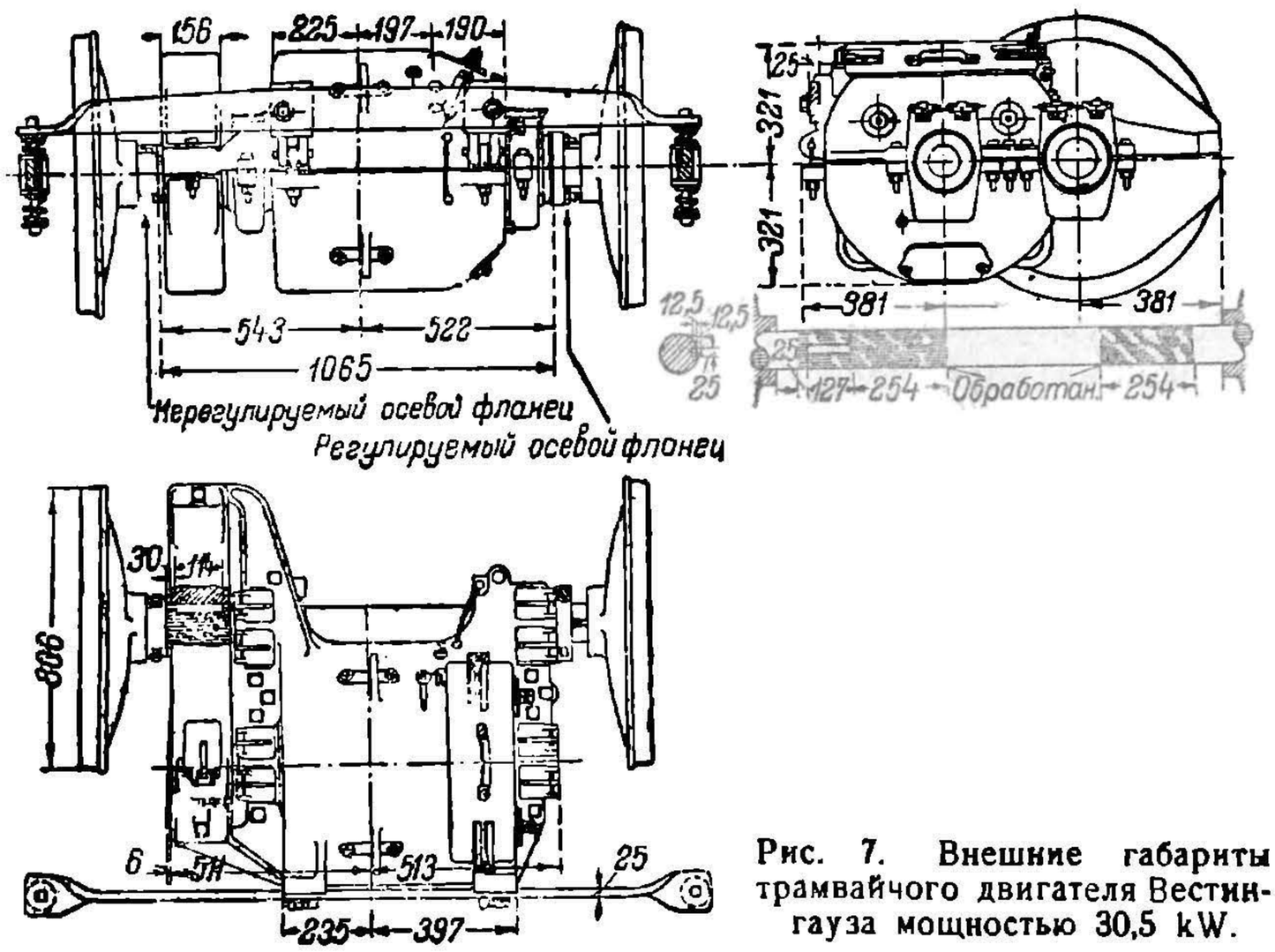


Рис. 7. Внешние габариты трамвайчого двигателя Вестингауза мощностью 30,5 kW.

Для осмотра и облегчения ремонта каждый двигатель должен снабжаться открывающимися люками. Основной люк помещается вверху над коллектором и снабжается легко открывающейся крышкой с пружинным запором и промежуточными кожаными или войлочными прокладками. Снизу под коллектором помещается второй люк или с пружинными затворами, или чаще с болтовыми креплениями. Люк этот служит для периодического осмотра нижней части двигателя и удаления из него грязи,

НБ УПУНТ (ДІТ)

влаги и масла, проникающих в кожух, благодаря неплотным стыкам и соединениям. В некоторых случаях, помимо люков с коллекторной стороны, делают их и со стороны противоположной, а иногда и с боковых поверхностей. В двигателях с искус-

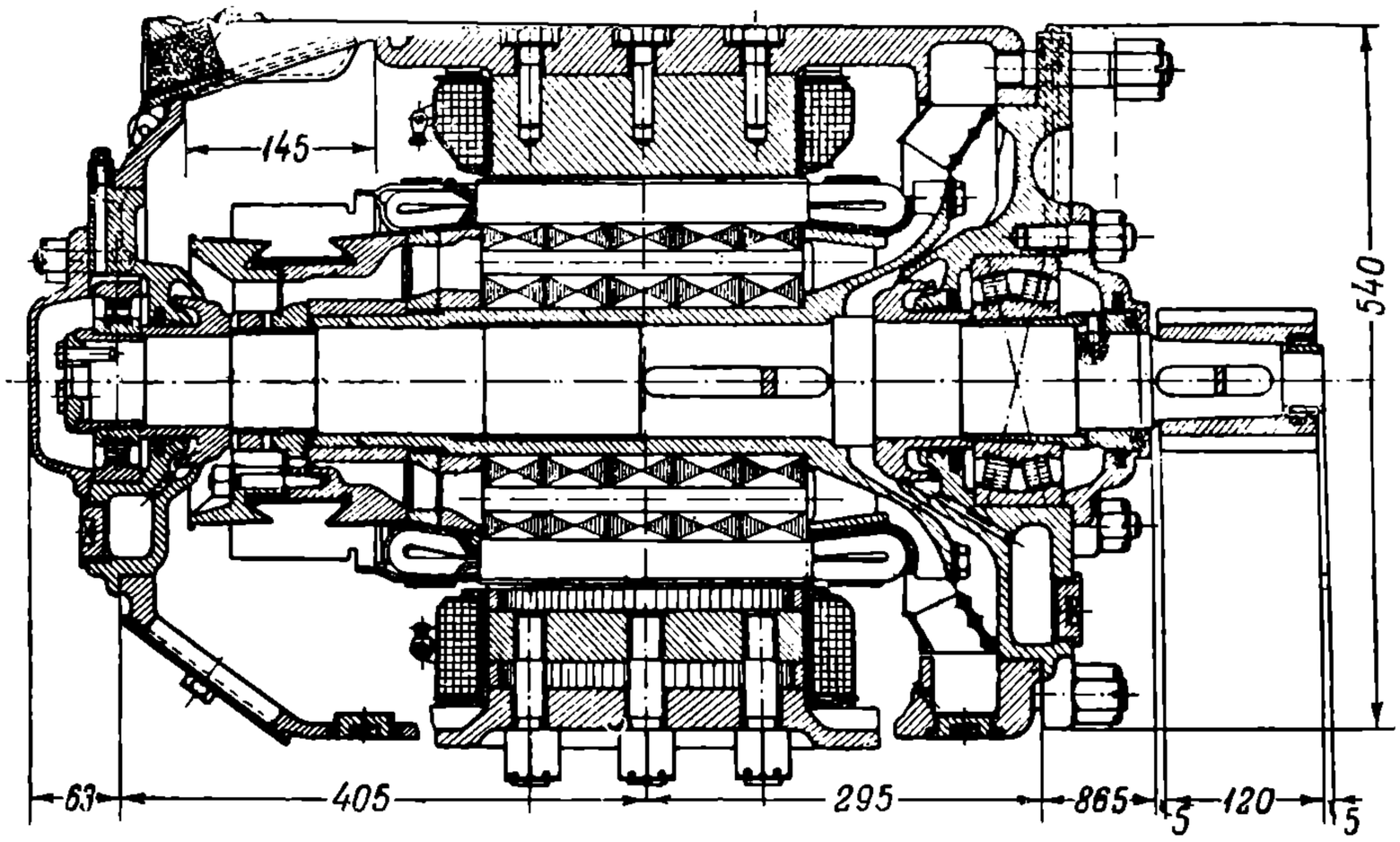


Рис. 8. Продольный разрез двигателя трамвайного типа ПТ-35.

3903

ственной вентиляцией приходится иметь еще и специальные отверстия для входа и выхода вентиляционного воздуха, защищаемые в случае засасывания последнего из открытого пространства особыми металлическими сетками.

Подвесноосевые двигатели работают с помощью зубчатой передачи. Большие зубчатые колеса насаживаются на ось подвижного состава, а малые, называемые шестернями, сидят на валах двигателей. Такой тип передачи принят в целях применения быстроходных двигателей. Передача помещается в особый кожух, крепя-

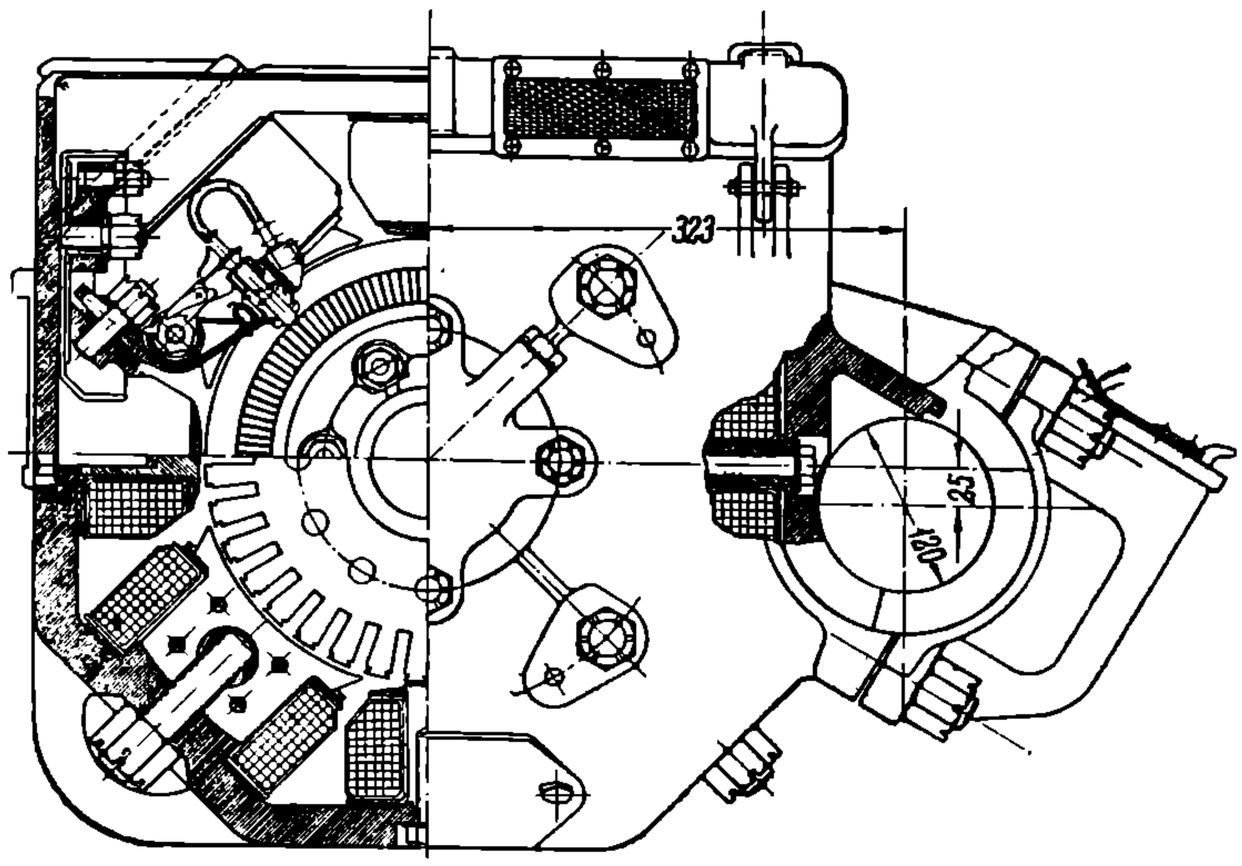


Рис. 9. Поперечный разрез двигателя трамвайного типа ПТ-35.

щийся к главному остову двигателя. При таком креплении следует избегать из-за частых поломок длинных поддерживающих кронштейнов, составляющих одно целое с остовом двигателя (рис. 7). В современных конструкциях или вообще избегают длинных кронштейнов, или отливают их вместе с внешней частью осевого подшипника. Так как последняя крепится на болтах, то в случае поломки кронштейна вся часть легко заменяется новой.

Інститут ін...
Учбовая відділ
БІБЛІОТЕКИ
НБ УДУНТ (ДІІТ)

Очень важное значение при выработке конструкции тяговых двигателей имеет применение прочных соединений отдельных их частей. В силу тряски и ударов, неизбежных при движении, требуются контргайки, шпильки, пружинные шайбы и прочная спайка проводов и клемм.

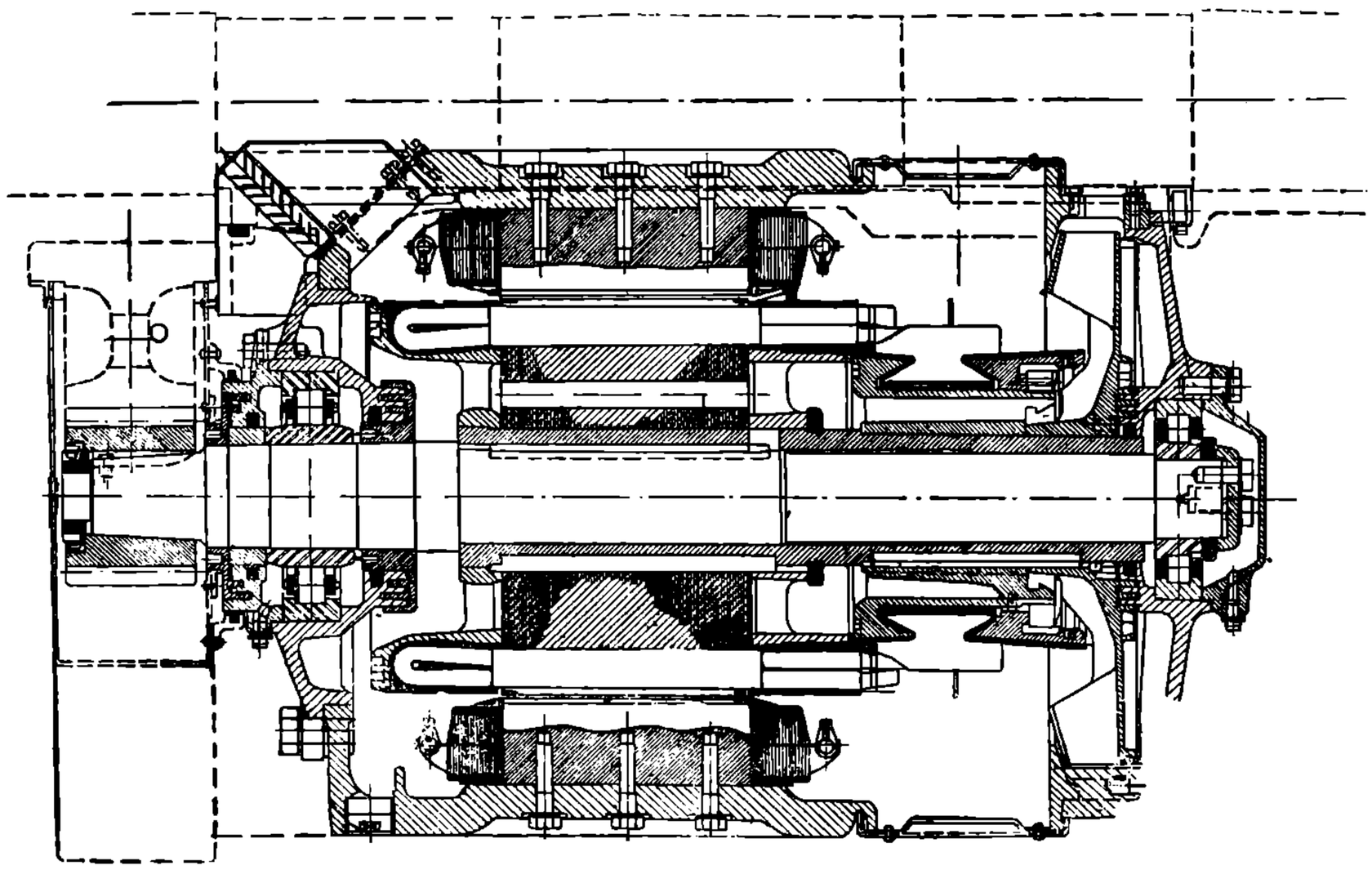


Рис. 10. Продольный разрез двигателя берлинских пригородных жел. дор. системы AEG и SSW мощностью 63 kW.

Конструкцию внутренних частей подвесноосевых двигателей можно видеть из рис. 8, 9, 10, 11, 12, 13 и 14. Рис. 8 и 9 дают вид трамвайного двигателя На рис. 10, 11, 12, 13 и 14 изображены двигатели железнодорожного типа.

Как видно из приведенных рисунков, в отношении формы выполнения магнитной системы следует иметь в виду два типа подвесноосевых двигателей. К первому принадлежат двигатели с расположением центральных линий главных полюсов под

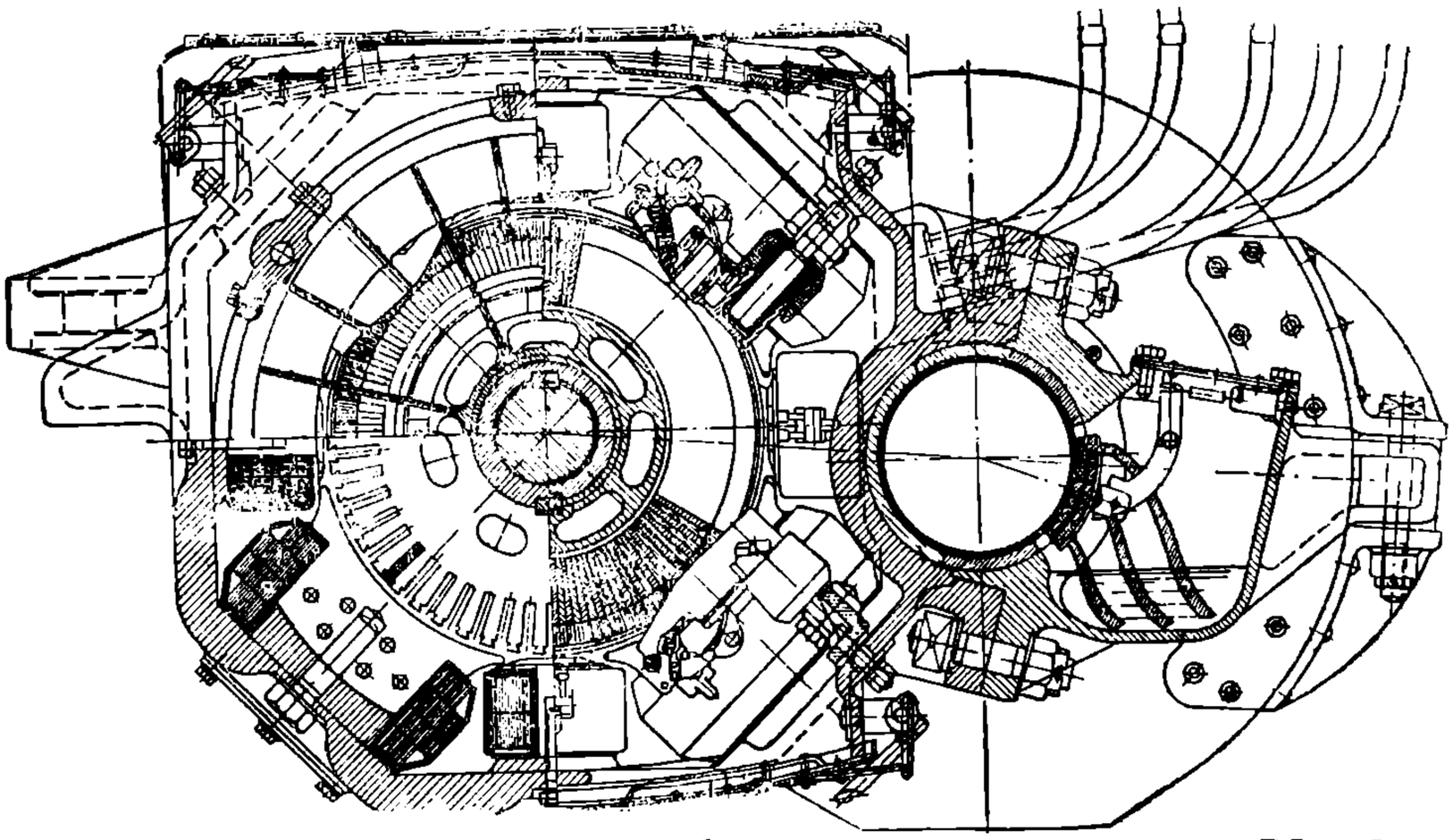


Рис. 11. Поперечный разрез двигателя берлинских жел. дор. системы AEG и SSW мощностью 63 kW.

углом в 45° к вертикальной и горизонтальной осям поперечного сечения. Ко второму относятся двигатели с расположением осей полюсов по вертикали и горизонтали. Добавочные полюса, если таковые имеются, занимают положение взаимно обратное.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Преимущество первого типа заключается в правильной восьмиугольной форме кожуха, обеспечивающей легкую обработку его внутренних поверхностей, предназначаемых для крепления главных и добавочных полюсов. Кроме того, в случае последо-

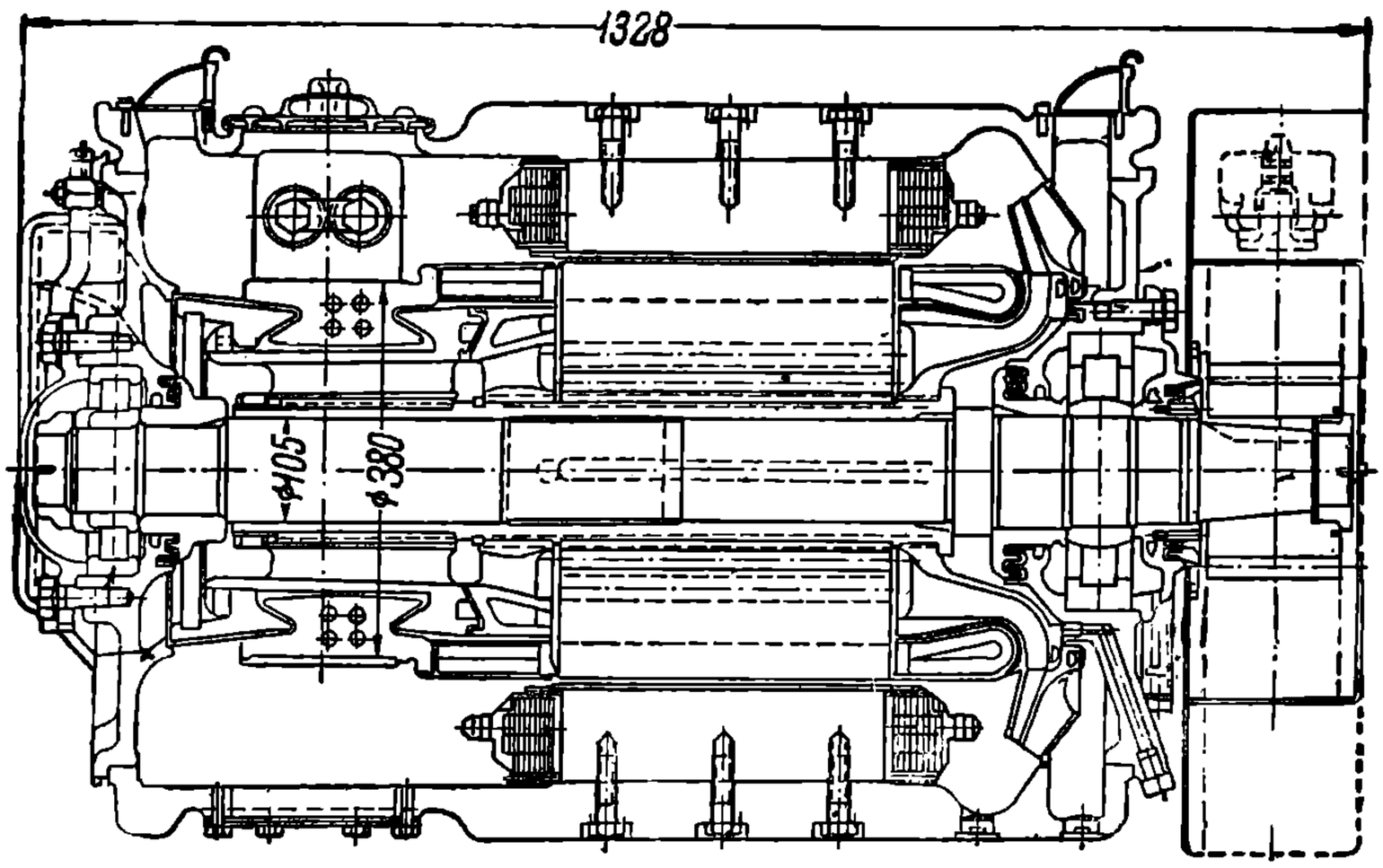


Рис. 12. Продольный разрез двигателя типа ДП-150 завода им. Кирова.

вательной обмотки при четырехполюсной системе, обычной для подвесноосевых двигателей, и при двух щетках последние помещаются под основным коллекторным люком и потому легко доступны для осмотра и замены. При второй системе для расположения щеток вверху требуется специальная обмотка с несимметричными длинами концов секций.

Но наряду с отмеченными недостатками вертикально-горизонтальное расположение главных полюсов имеет и большие преимущества. Прежде всего, эта система дает более компактный кожух как по вертикали, так и по горизонтали. Кроме того, при ней выемка для осевых подшипников не попадает на главный путь основного магнитного потока. Ввиду этого, осевые подшипники можно врезать более глубоко в тело кожуха и этим сблизить в случае нужды вал двигателя с ведущей осью. Особенно заметными указанные преимущества становятся в отношении больших двигателей, расчет и конструкцию которых сильно осложняют габаритные ограничения. Двигатели с горизонтально-вертикальным расположением главных полюсов находят себе преимущественно применение в американской практике строи-

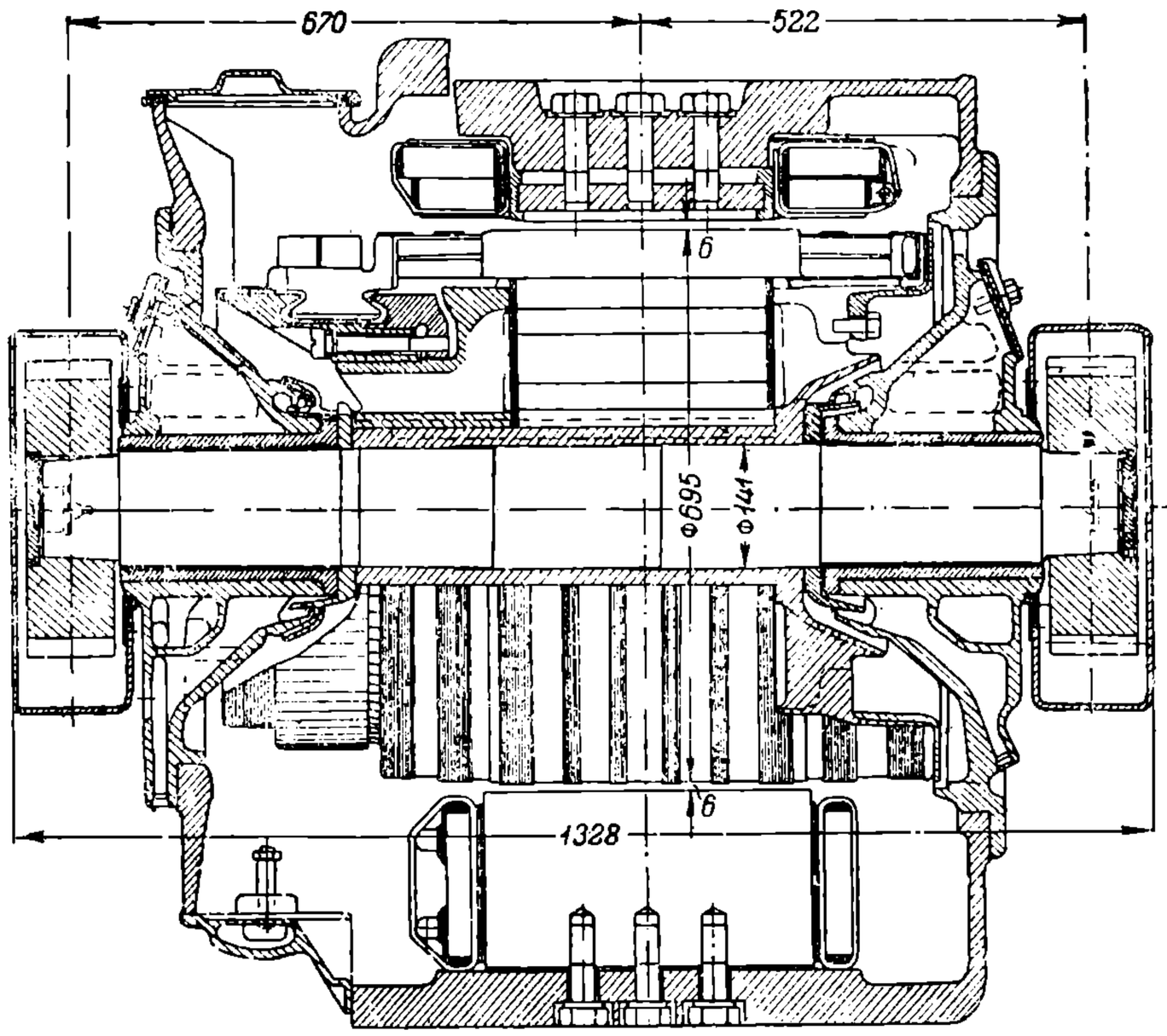


Рис. 13. Продольный разрез двигателя электровозного типа ДПЭ-340 завода им. Кирова.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

тельства железнодорожных двигателей средних и больших мощностей. Следует отметить, что для мощных двигателей преимущество верхнего положения щеток теряет свое значение, так как такие двигатели имеют нормально и при последовательных обмотках столько же пар щеток, сколько и пар полюсов.

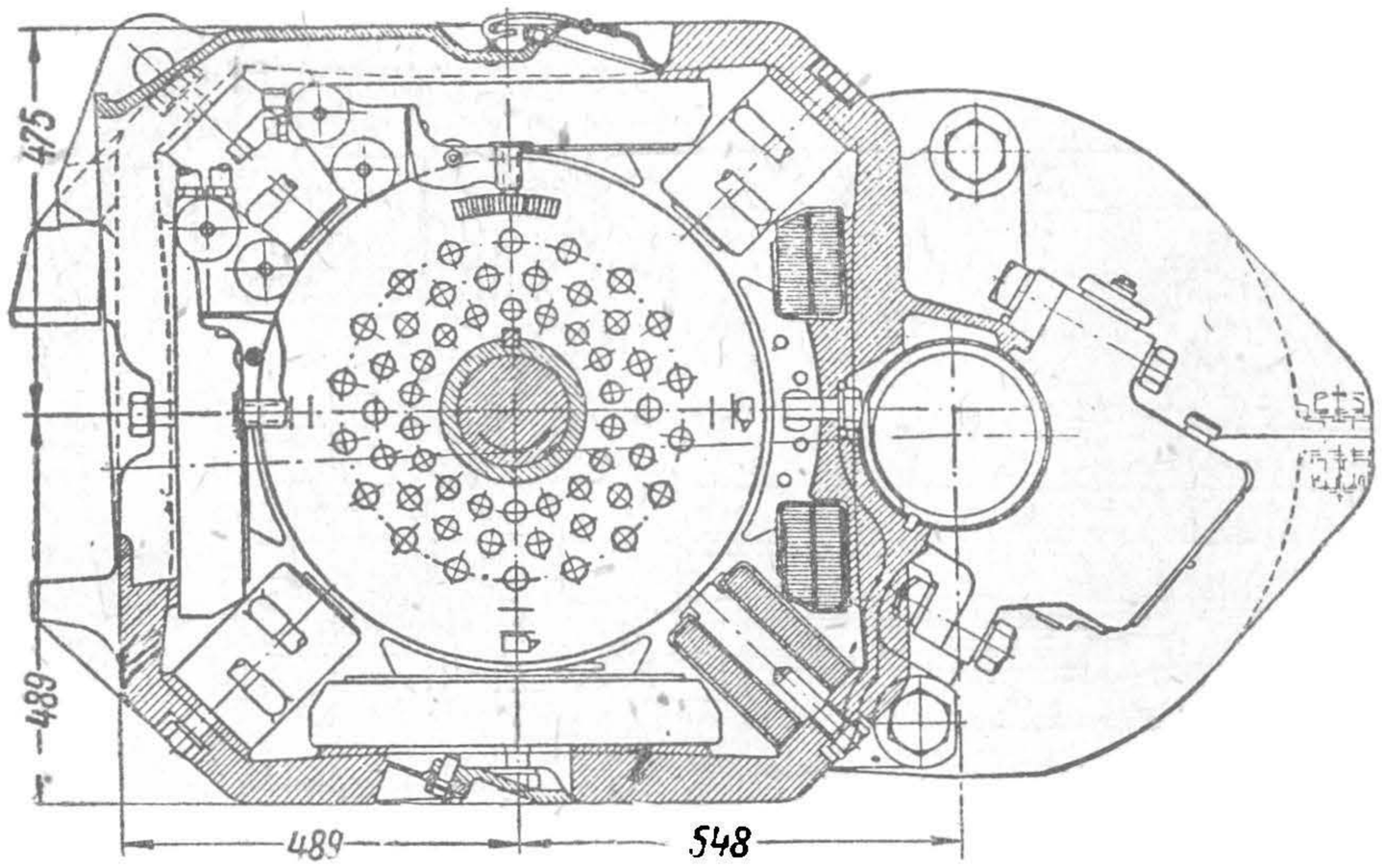


Рис. 14. Поперечный разрез двигателя электровозного типа ДПЭ-340 завода им. Кирова.

Типы полюсов и магнитных катушек, применяемые в современных двигателях, приведены на рис 15. Главные полюса для уменьшения пульсационных потерь на токи Фуко делаются из листового железа, толщиною около 0,5—1 mm, с соответствующей лакировкой или оклейкой. Добавочные полюса выполняются из хорошей мягкой стали. Полюса привинчиваются со стороны внешней поверхности кожуха особыми болтами, числом от двух до трех на каждый полюс.

Магнитные катушки главных и добавочных полюсов делаются из меди квадратного или прямоугольного сечения. Очень часто, особенно в больших двигателях, медь берется в виде ленты. Лента наматывается плашмя или на ребро. Зависит это от расположения полюсов и того места, которое отводится для катушек. Например, для двигателей с вертикально-горизонтальным расположением полюсов чаще бывает выгодней наматывать главные катушки плашмя, а добавочные — на ребро. Толщина медной ленты колеблется нормально от 0,75 до 4,5 mm.

Провода изолируются друг от друга с помощью хлопчатобумажной изоляции, с одно- или двухслойной обмоткой меди нитью. Последнее время нередко применяют, особенно для ленточной обмотки, изоляцию азбестовую или миканитовую.

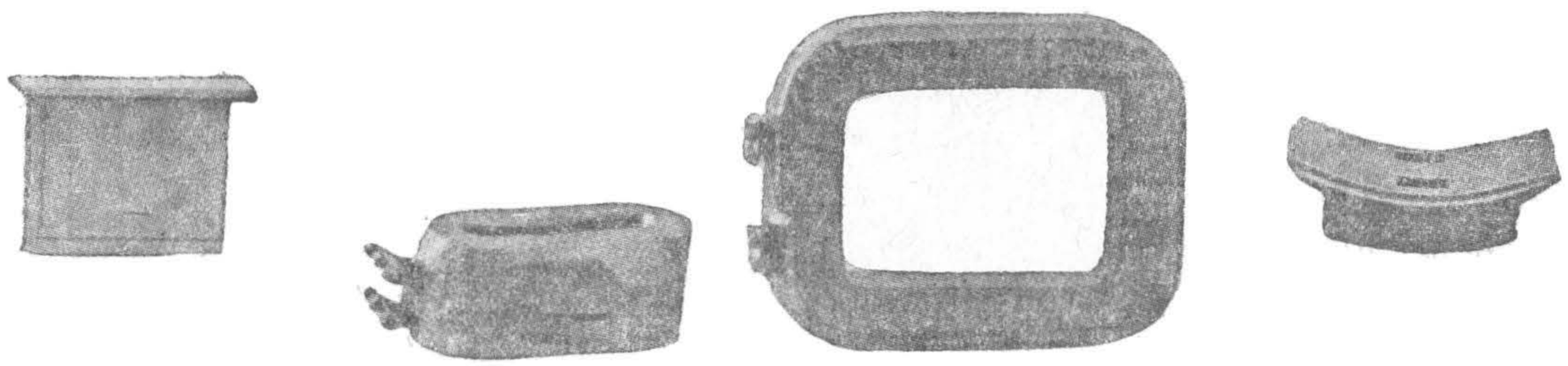


Рис. 15. Главный и добавочный полюса тягового двигателя с катушками.

Магнитные катушки наматываются на станочном шаблоне. С внешних поверхностей катушки изолируются хлопчатобумажной лентой. Между лентой и проводами прокладывается специальная бумага или азбест. Толщина внешней изоляции по мере перехода напряжения 600 до 3000 V вариирует от 2 до 4 mm. В местах соприкосновения катушки с железом часто помещают прессшпан, толщиною от 0,5 до 1 mm. Назначением его, главным образом, является механическая защита катушки от железа. Снизу катушки опираются на особые бронзовые подставки, лежащие на закраинах полюсных наконечников. Сверху от кожуха катушки часто отжимаются пружинными рамками, препятствующими колебательным их перемещениям при тряске. Особое внимание при изготовлении катушек приходится обращать на выводные клеммы, требующие самой тщательной припайки.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Вид якорей подвесноосевых двигателей изображен на рис. 16. Якорное железо собирается из динамной жести толщиною 0,5 mm, и только по краям для придания жесткости системе берется по четыре — пять листов толщиною по 1,5 mm. Железо собирается или непосредственно на валу двигателя, или же на промежуточной втулке.

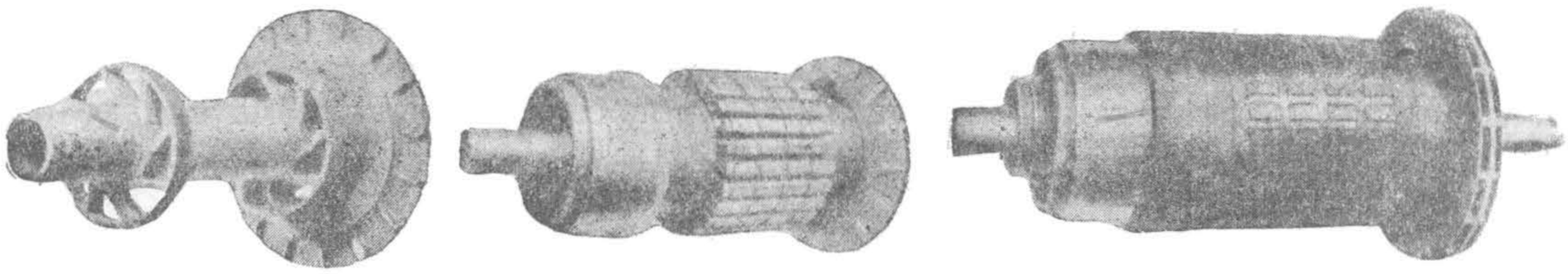


Рис. 16. Якоря тяговых двигателей трамвайного типа.

Первый тип применяется для небольших двигателей. Листы жести спрессовываются особыми нажимными шайбами, которые служат одновременно и держателями лобовых частей обмоток. Шайбы крепятся винтовыми натяжными кольцами или особыми разрезными шайбами. В листах жести делаются охладительные отверстия, образующие продольные каналы. В двигателях старой конструкции имелись, помимо продольных каналов, и каналы радиальные.

Обмотки современных двигателей делаются почти исключительно из цельной плоской меди. Применявшиеся раньше круглые сечения или кабельные провода теперь вышли из практики, так как при тех и других получается плохое использование впадины. Диаметры якорей и коллекторов стараются так подобрать, чтобы провод выходил из впадины к коллектору во избежание порчи изоляции по возможности без перегиба. Линейные размеры сечения провода стремятся выбирать таким образом, чтобы, с одной стороны, для предотвращения больших потерь на токи Фуко профиль сечения проводов был не особенно высок, лучше не больше 17—20 mm, а с другой — и не особенно широк, так как при таких профилях более удобен монтаж.

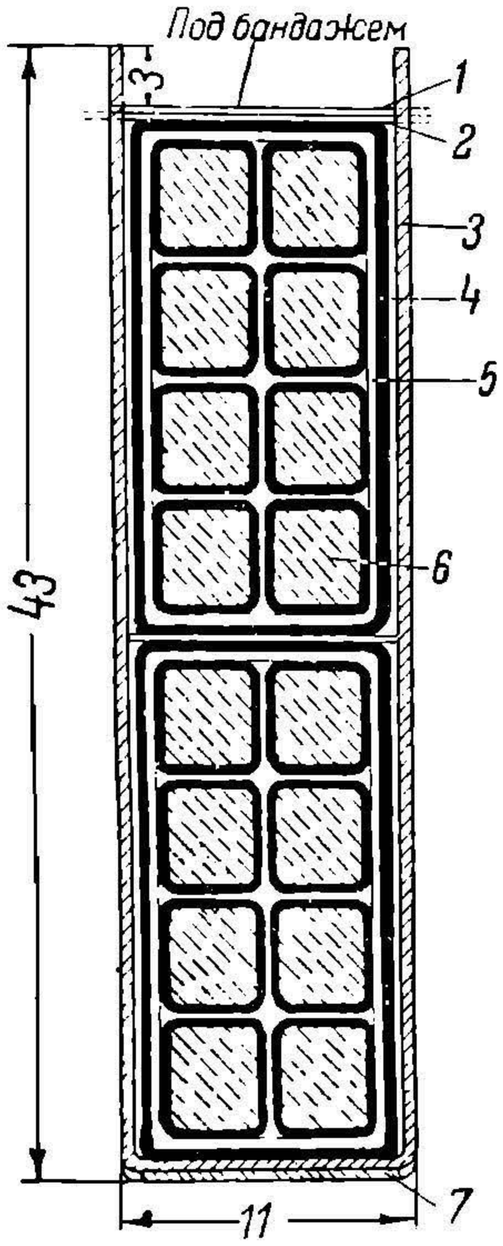


Рис. 17. Впадина двигателя трамвайного типа ДМ-1а завода им. Кирова.

Обозначения.

1. Латероид—0,25 mm.
2. Миканитовая бумага—0,2 mm.
3. Антивольтон—0,4 mm.
4. Лента—0,2 mm (1 ряд).
5. Промасленное полотно—0,2 mm (2^1 ряда).
6. Медь $\frac{3{,}4—3{,}8 \text{ голая}}{4{,}1—4{,}5 \text{ изол.}}$
7. Прессшпан—0,2 mm.

Изоляция якорной обмотки делается самой тщательной. Медь обматывается в два слоя хлопчатобумажной нитью, а в особо ответственных случаях берется специальная оплетка. Отдельные секции, выполняемые на шаблонах, соединяются в катушки по несколько в ряд. Иногда между ними прокладывается миканитовая бумага. Соединенные вместе секции обматываются эксцельсиором или другой композицией пропитанного полотна. После этого катушка обматывается хлопчатобумажной лентой. При напряжениях выше 750 V вместо хлопчатобумажной обмотки провода обматываются или эксцельсиором, или миканитовой лентой. Вся же катушка изолируется теми же

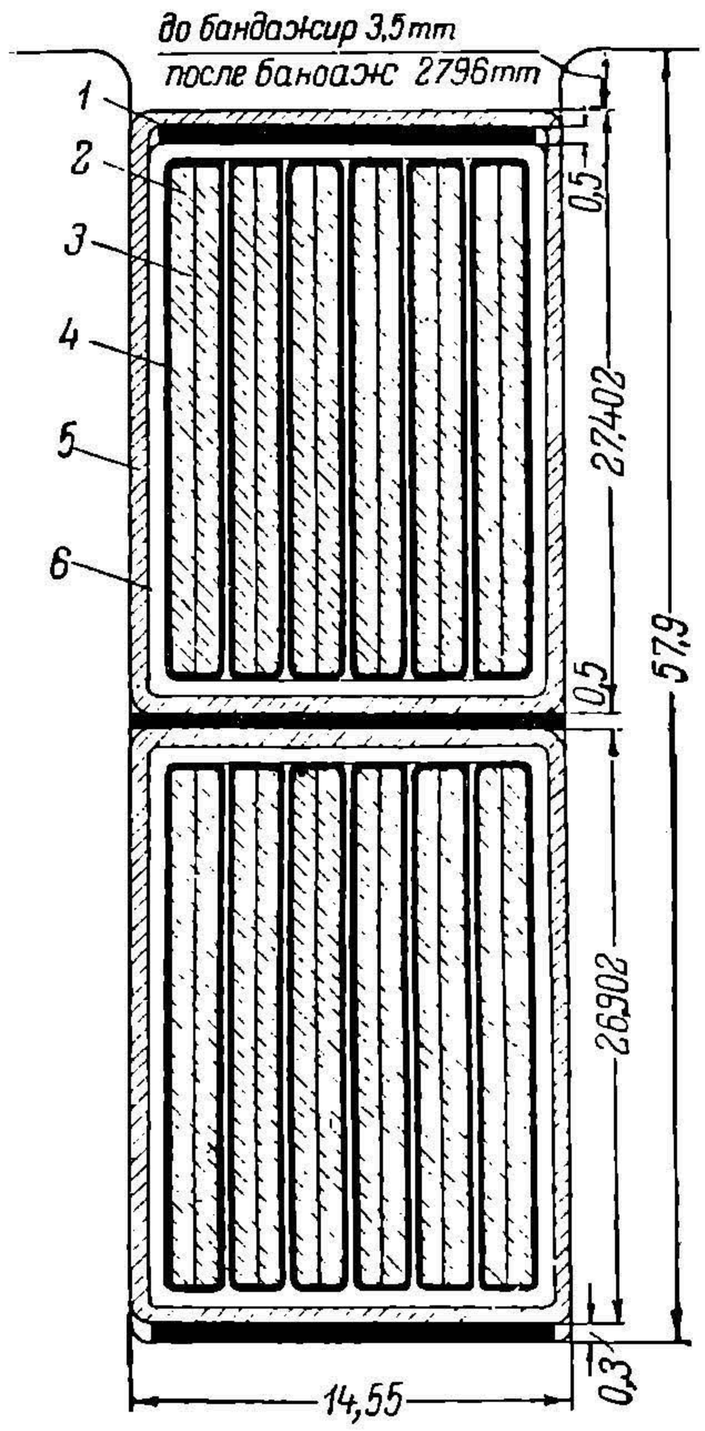


Рис. 18. Впадина железнодорожного двигателя на 1500 V типа GEC-1730.

Обозначения.

1. Миканитовая прокладка—0,5 mm.
2. Голый медный стержень—1,16—21,9 mm.
3. Миканитовая бумага—0,075 mm.
4. Миканитовая лента—0,108 mm ($1^1/_2$ ряда).
5. Азбестовая лента—0,4 mm (1 ряд).
6. Миканитовая лента—0,13 mm (8 рядов).

НБ УДУНТ (ДІІТ)

композициями или миканитовой опрессовкой. Стенки впадины выкладываются часто латероидом или пилитом. Образцы применяемых впадин приведены на рис. 17 и 18.

Крепление обмотки производится посредством бандажей или клиньев. Бандажи делаются из стальной проволоки. Предпочтительна тигельная сталь холодной протяжки, диаметром 0,8—1,5 mm. Ввиду больших потерь в бандажах на токи Фуко, а также частых аварий из-за их разрыва, бандажные крепления, особенно при больших скоростях, являются относительно слабою частью машины. Ввиду этого во впадинах часто предпочитают осуществлять крепление клиньями. Материалом для последних служит вяз или бук. Дерево хорошо высушивается и пропитывается льняным маслом или парафином. Толщина клиньев колеблется от 4 до 8 mm. В некоторых случаях для увеличения сопротивления дерева клинья выстругиваются поперек волокна.

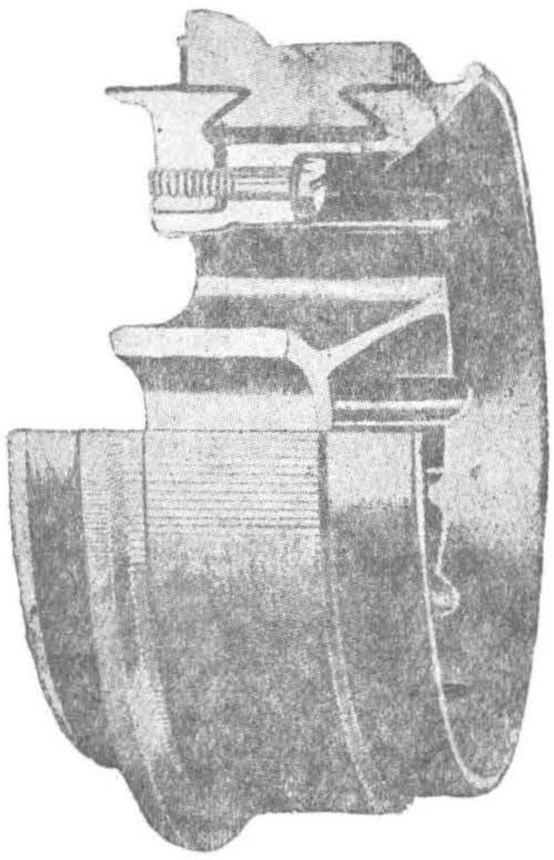


Рис. 19. Коллектор двигателя на 1500 V.

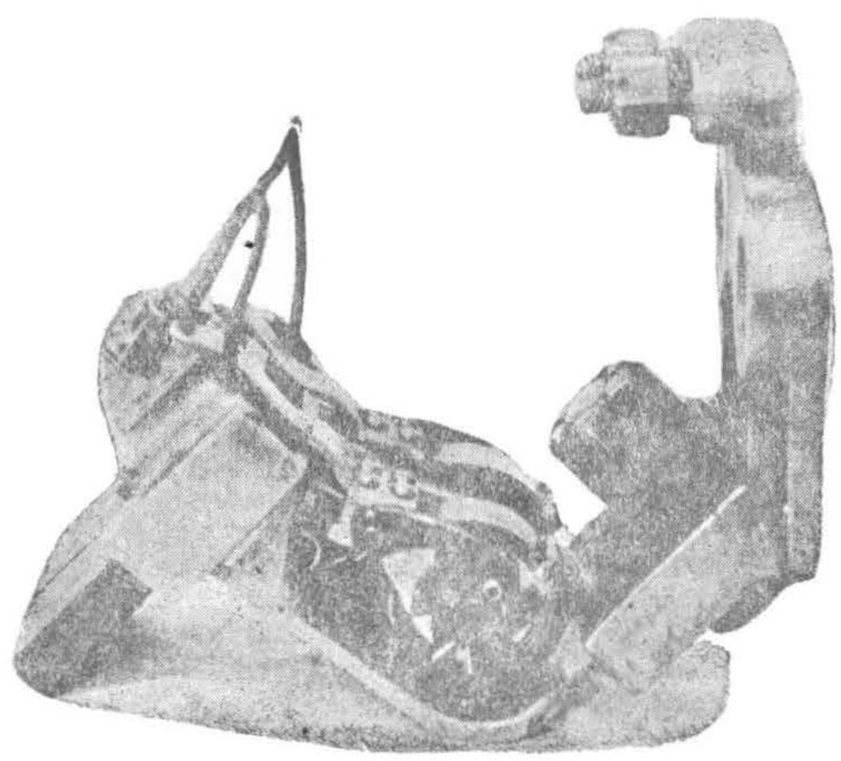


Рис. 20. Щеткодержатель двигателя трамвайного типа.

Коллекторы подвесноосевых двигателей монтируются на втулках, насаживаемых или на вал двигателя, или на основную якорную втулку (рис. 19). В поперечном направлении втулка коллектора крепится на шпонке, а в продольном винтовыми шайбами. Затяжка пластин производится нажимными кольцами, притягиваемыми ко втулке болтами или винтовой шайбой, или же в некоторых случаях сами кольца делаются с нарезкой. Толщина пластин поверху берется около 4,5—8 mm. Изоляция пластин производится обычно мегомитом (слюда, склеенная шеллаком) толщиной 0,8—1 mm. Для предотвращения появления выступающих закраин мегомита последний пропиливается. Глубина продорожки берется около 0,5—1 mm. От корпуса пластины изолируются солидной миканитовой опрессовкой толщиною порядка 2—3 mm.

При конструировании щеткодержателей стремятся создать такую конструкцию, при которой можно было бы, с одной стороны, удобно регулировать давление щеток, а с другой стороны — перемещать их для получения правильного положения в отношении коммутации. Тип щеткодержателя, часто применяемого для трамвайных двигателей, приведен на рис. 20.

Подшипники подвесноосевых двигателей выполняются или по типу нормальных с цилиндрическими вкладышами, или же по типу роликовых. В первой системе подшипников вкладыши делаются чаще всего из бронзы с тонкослойной заливкой баббитом. Толстый слой баббита применять не рекомендуется, дабы при выплавке его якорь не мог сесть на полюсные башмаки. Смазка в подшипниках этого типа применяется фитильная, кольцевая и в виде масляной ванны с подбивкой шерсти или конопли. Наиболее надежным следует считать последний тип. Густая смазка теперь не применяется. Тип вкладышей якорных и осевых подшипников приведен на рис. 21. В двигателях большой мощности нередко применяются подшипники с саморегулированием уровня смазки (рис. 13 и 14).

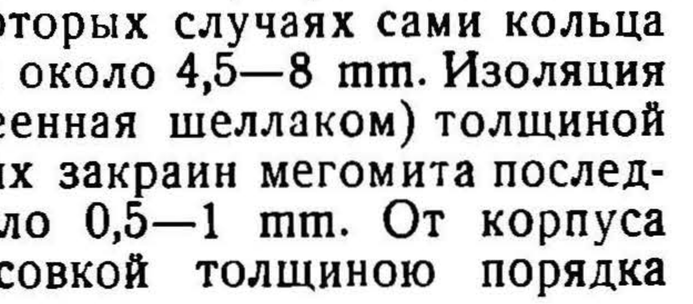


Рис. 21. Вкладыши скользящих подшипников для якорей тяговых двигателей.

Большим распространением в современных тяговых двигателях пользуются подшипники, основанные на принципе качания. Первый опыт в этом направлении был обращен на подшипники шариковые. Однако, они оказались мало пригодными из-за малой сопротивляемости боковым ударам и толчкам, неизбежным при движении поезда по рельсовому пути. Это и явилось причиной замены шариков роликами,

НБ УГУНТ (ДІТ)

так как последние могут хорошо выдерживать не только вертикальные усилия, но и осевые. В двигателях небольшой мощности применяются однорядные подшипники и для больших мощностей двухрядные со сферическими роликами. Очень часто применяется комбинация однорядных и двухрядных типов. Со стороны коллектора ставится однорядный подшипник, а со стороны зубчатой передачи, помещаемой на противоположной стороне, двухрядный. При однорядных подшипниках по тем же соображениям часто ставят на стороне коллектора более слабые ролики, чем на стороне передачи. Смазка для роликовых подшипников может применяться жидкая и густая, предпочтительна последняя. Иногда подшипники делают пригодными для той и другой.

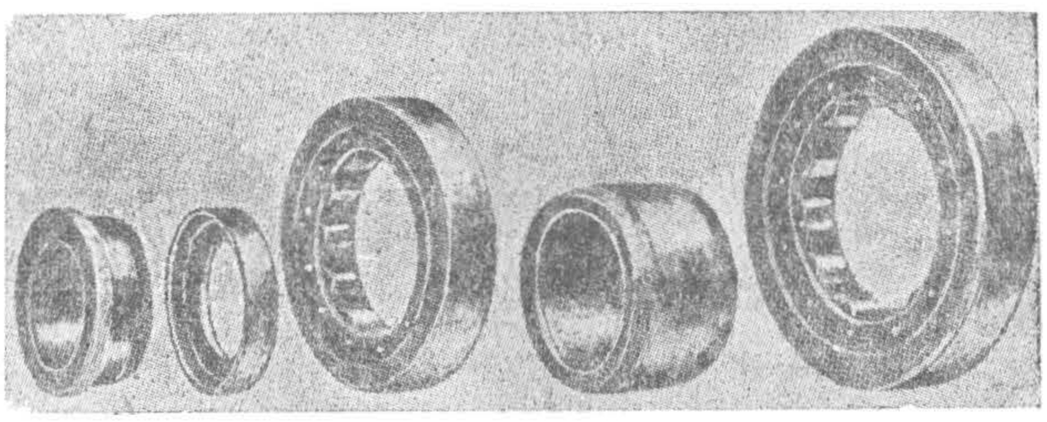


Рис. 22. Роликовые подшипники для якорей тяговых двигателей.

Преимущества роликовых подшипников — значительно меньший коэфициент трения, меньший расход масла и почти полная гарантия в отношении предотвращения посадки якоря на полюса. Особенно большое распространение роликовые подшипники имеют в Европе, являясь необходимою принадлежностью современных двигателей мощностью до 150—200 kW. При более значительных мощностях эти подшипники применяются реже, однако, и здесь они начинают получать значительное применение. В Америке роликовые подшипники пока не получили широкого распространения. В этом отношении Америка отстала от Европы. На рис. 22 приведены детали роликовых подшипников. Следует указать, что ролики применяются только для

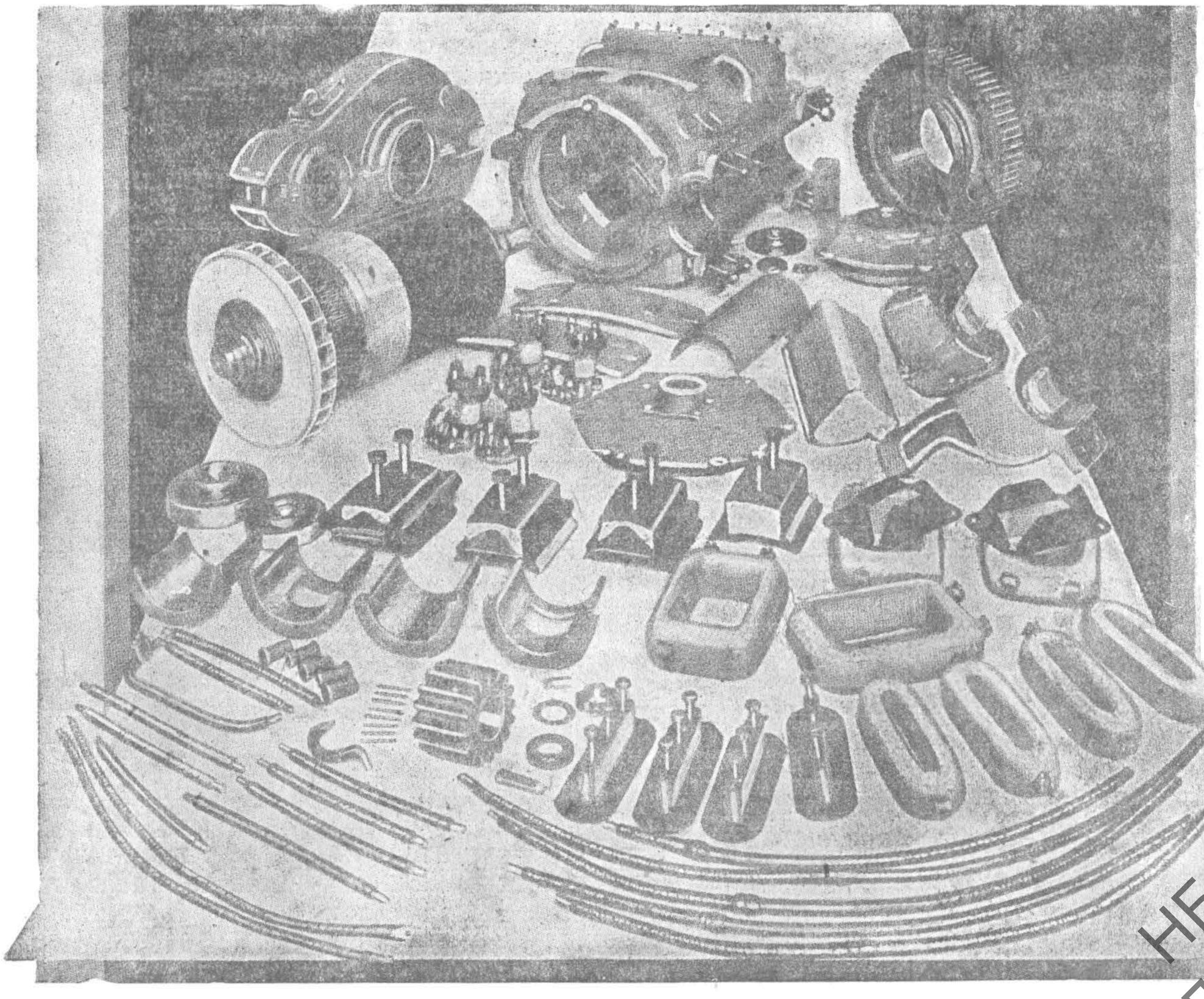


Рис. 23. Тяговый двигатель с деталями в разобранном виде.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

якорных подшипников. Для осевых они применения не имеют, так как насадка их на ось между колесами встречает большие затруднения.

При эксплоатации тяговых двигателей приходится обращать особое внимание на недопущение просачивания смазки из подшипников внутрь кожуха. С этой целью

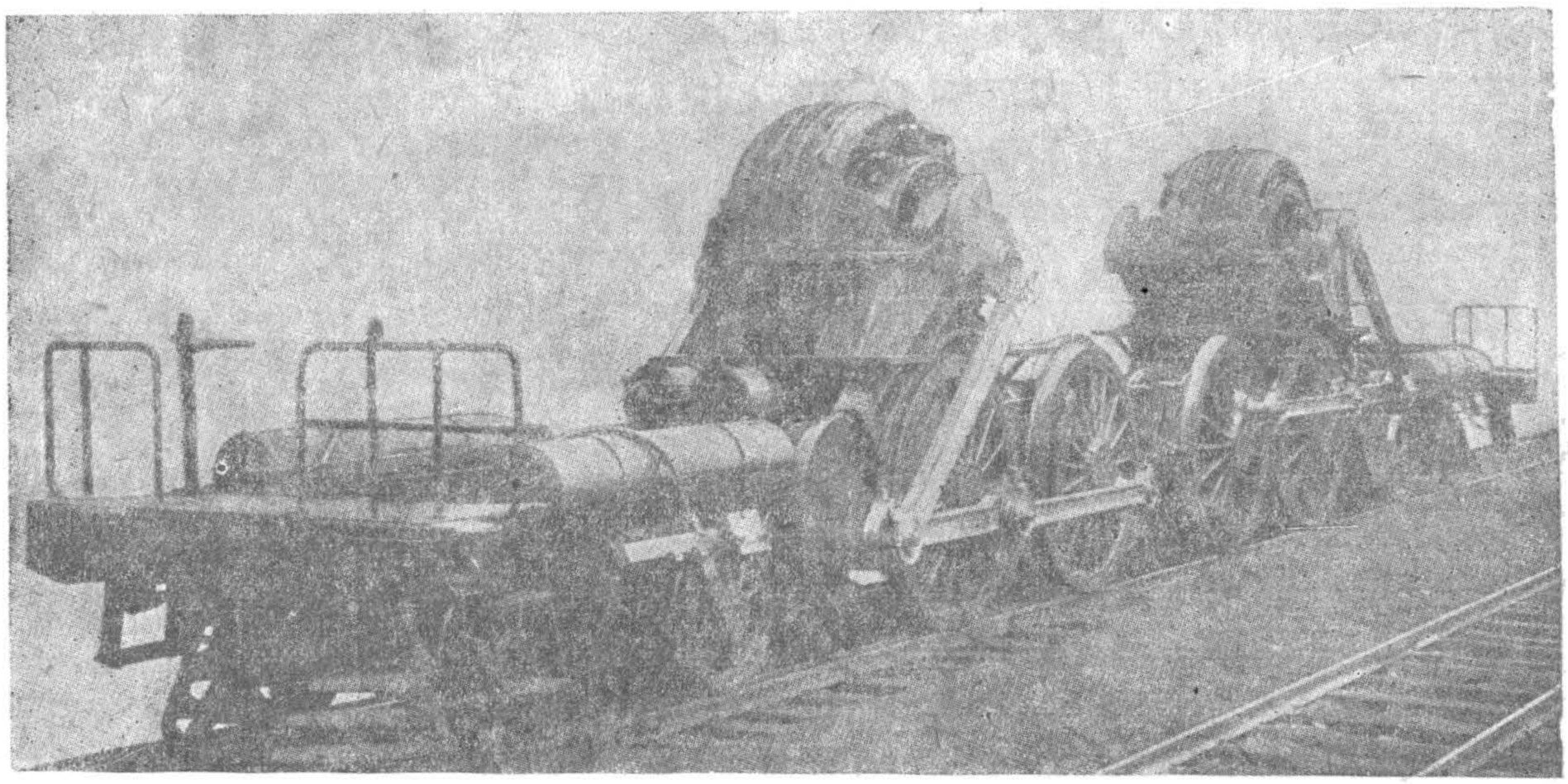


Рис. 24. Опорнорамные двигатели электровоза дороги P. R. R. мощностью каждый в 1470 kW.

якоря двигателей снабжаются по концам вала специальными маслоотбойными шайбами сбрасывающими центробежной силою проникающее внутрь по валу масло в каналы, по которым оно отводится в подшипники (рис. 4). При шариковых и роликовых подшипниках эта защита производится путем применения особых воздушных лабиринтов (рис. 8). В качестве иллюстрации подвесноосевого двигателя с его деталями приводится рис. 23.

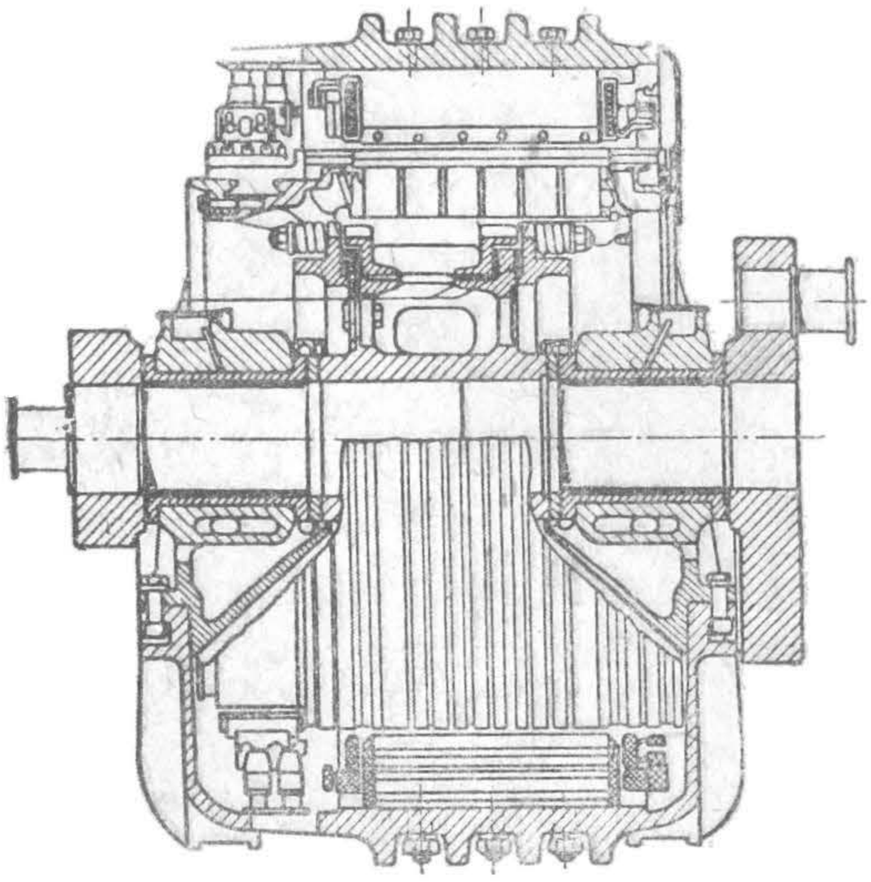


Рис. 25. Продольный разрез двигателя электровоза дороги P. R. R. мощностью 1470 kW.

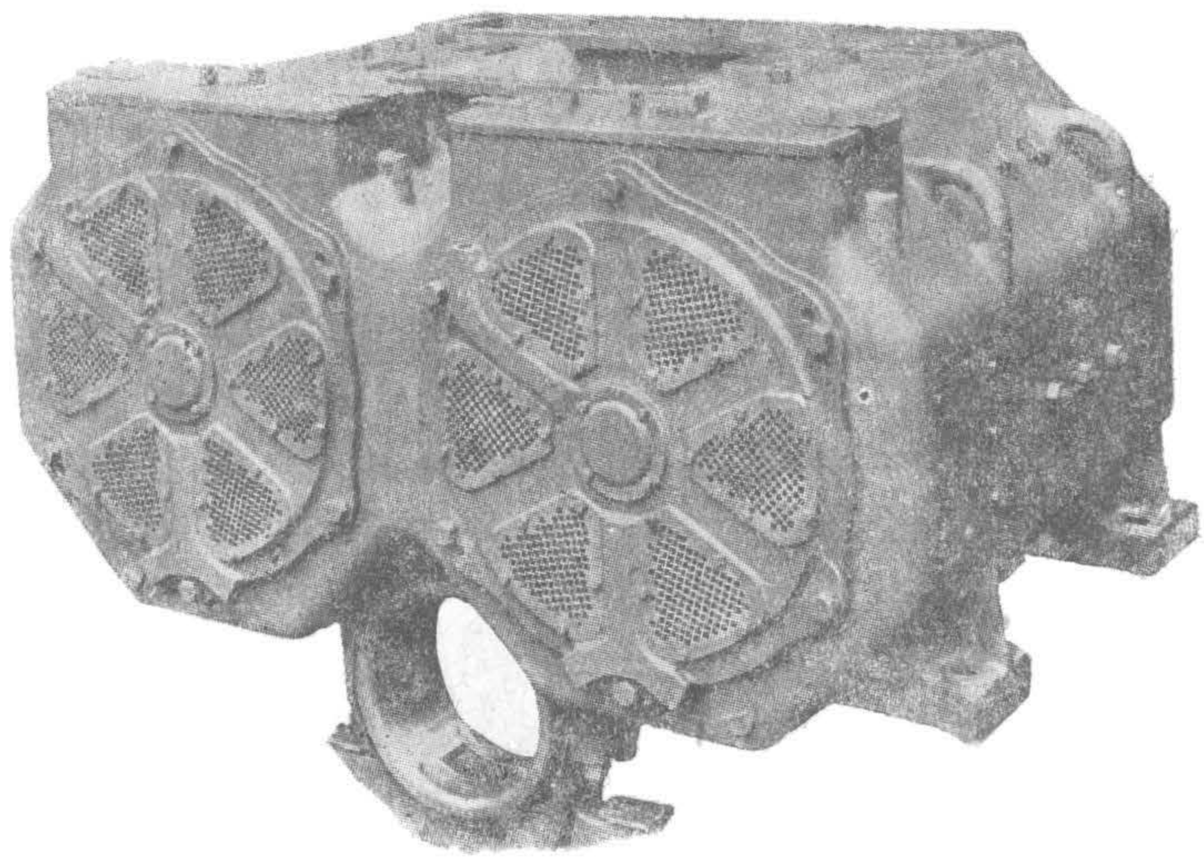


Рис. 26. Двигатель типа близнецов завода Skoda мощностью 360 kW

Опорнорамные двигатели. Эта система двигателей применяется почти исключительно для электровозов. Характерной ее особенностью является крепление кожуха или станины двигателей непосредственно на раме локомотива. Опорнорамные двигатели разбиваются на два типа: ординарные и сдвоенные. Примером первой системы может служить тип двигателя, приведенного на рис. 24, и примером второго—тип двигателя на рис. 26. Разрезы опорнорамных двигателей даны на рис. 25 и 27.

НТБ УРУНТ (ДІІТ)

Двигатели первого типа имеют сходство со стационарными машинами. Двигатели второго типа отличаются совершенно особенной конструкцией. Каждый такой двигатель состоит из двух самостоятельных частей, объединенных одним общим кожу-

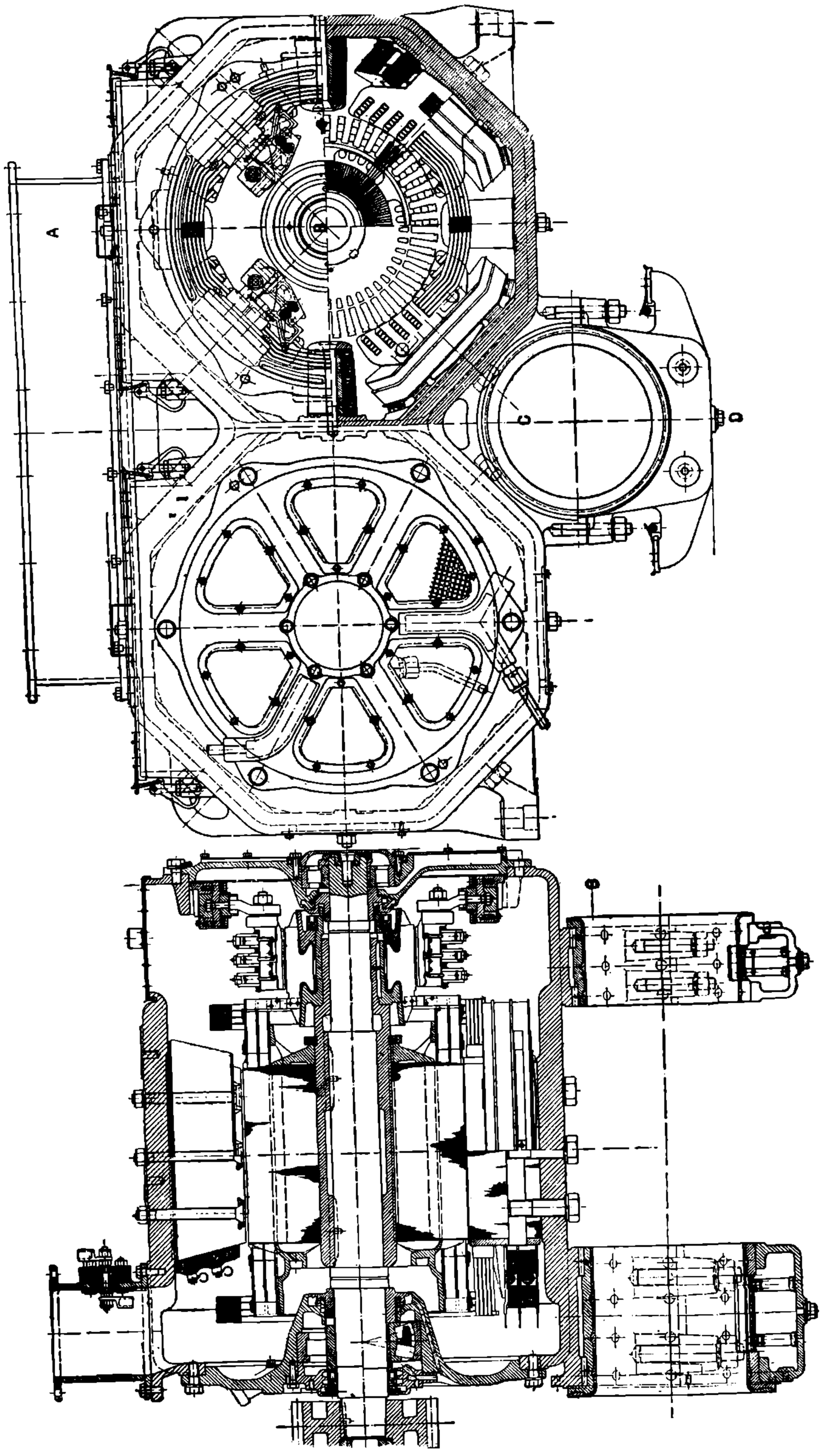


Рис. 27. Разрез двигателя типа близнецов завода Skoda мощностью 360 kW.

хом. Обе половинки двигателя работают на одно общее большое зубчатое колесо, которое насаживается на промежуточный вал, поддерживаемый нижними осевыми подшипниками двигателя. Система сдвоенных двигателей получает в настоящее

НБ УДУНТ (ДІІТ)

время все большее и большее распространение. Причина этого лежит в возможности получать при ней быстроходную, легкую и компактную машину.

Последнее время опорнорамные системы двигателей начинают применяться, помимо электровозов, и в моторных вагонах. Здесь они выполняются в виде небольших ультрабыстроходных типов с конической или червячной передачею. Общий вид такого типа двигателей приведен на рис. 28.

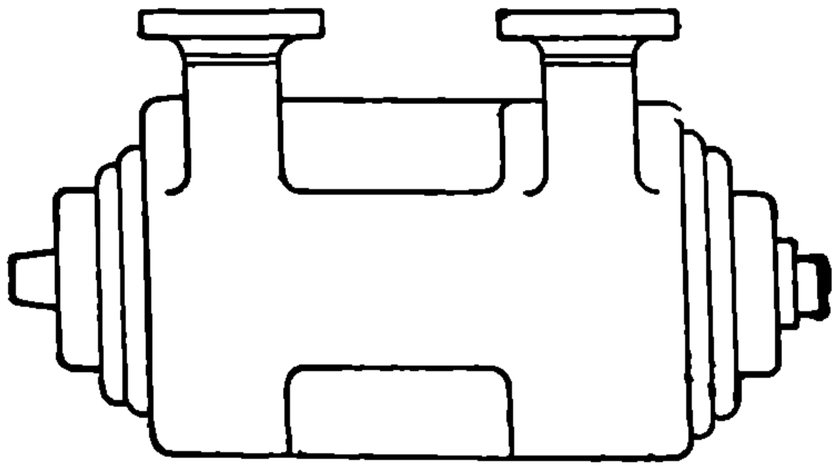


Рис. 28. Быстроходный опорнорамный двигатель для вагонов.

Особого внимания заслуживает появление вертикальных тяговых двигателей (рис. 29). Как видно из приведенной конструкции, двигатель выполнен по типу сдвоенной машины. Применен этот тип на электровозах Южно-Французских ж. д. Двигатель имеет мощность $KW_h = 485$ и работает с передаточным числом, равным 2,72.

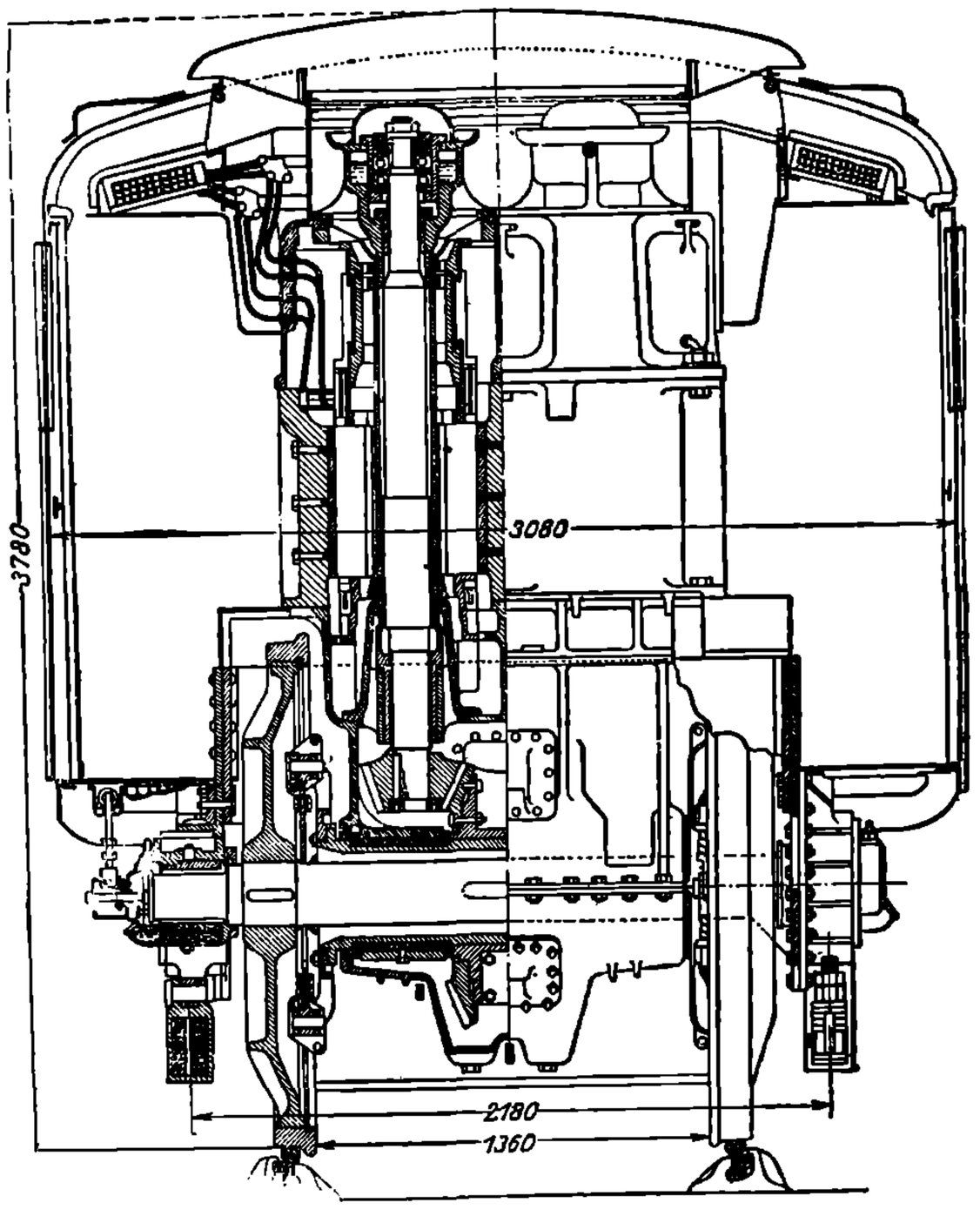


Рис. 29. Вертикальный сдвоенный двигатель дороги Ch. d. f. d. M. мощностью 485 kW.

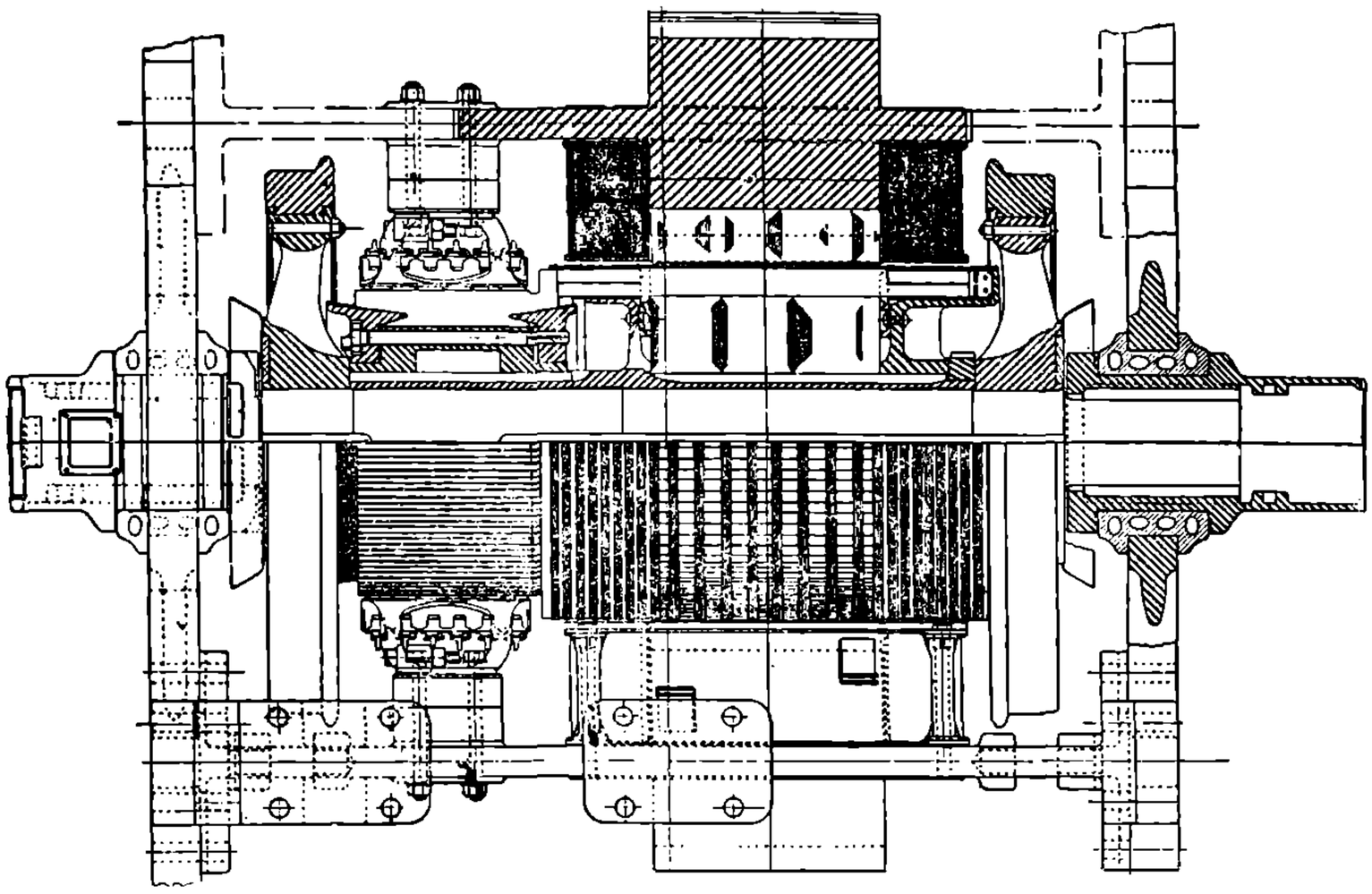


Рис. 30. Продольный разрез якорноосевого двигателя GEC мощностью 400 kW.

Якорноосевые двигатели. Характерною особенностью этих двигателей является насадка якоря и коллектора непосредственно на ось электровоза (рис. 30 и 31). Машины не имеют специального кожуха или станины. Ярмом служит рама

НБ УкрНТ (ДІІТ)

электровоза. Полюса и щеткодержатели крепятся на последней с помощью специальных кронштейнов. Со стороны внешних поверхностей для защиты от грязи, пыли и влаги машины прикрываются легкими листами жести.

Якорноосевые двигатели являются машинами двухполюсными. По условиям колебания надрессорной части электровоза по отношению к осям, во избежание задевания полюсами якоря, приходится делать большое междужелезное пространство, увеличивая его по мере удаления от центральной оси полюсов к концам полюсных наконечников.

Якорноосевые двигатели теперь выходят из практики. Они применяются, главным образом, в Америке и строятся фирмой GEC. В Европе они применены только в единичных случаях. Преимущества этой системы — в отсутствии тяжелой станины. Недостатки — в несовершенстве конструкции. Машины требуют большого расхода меди, вызываемого двухполюсной системой и большим междужелезным пространством. Значительные неудобства представляет также и непосредственная насадка якорей на ось, требующая при монтаже и демонтаже съемки колес электровоза.

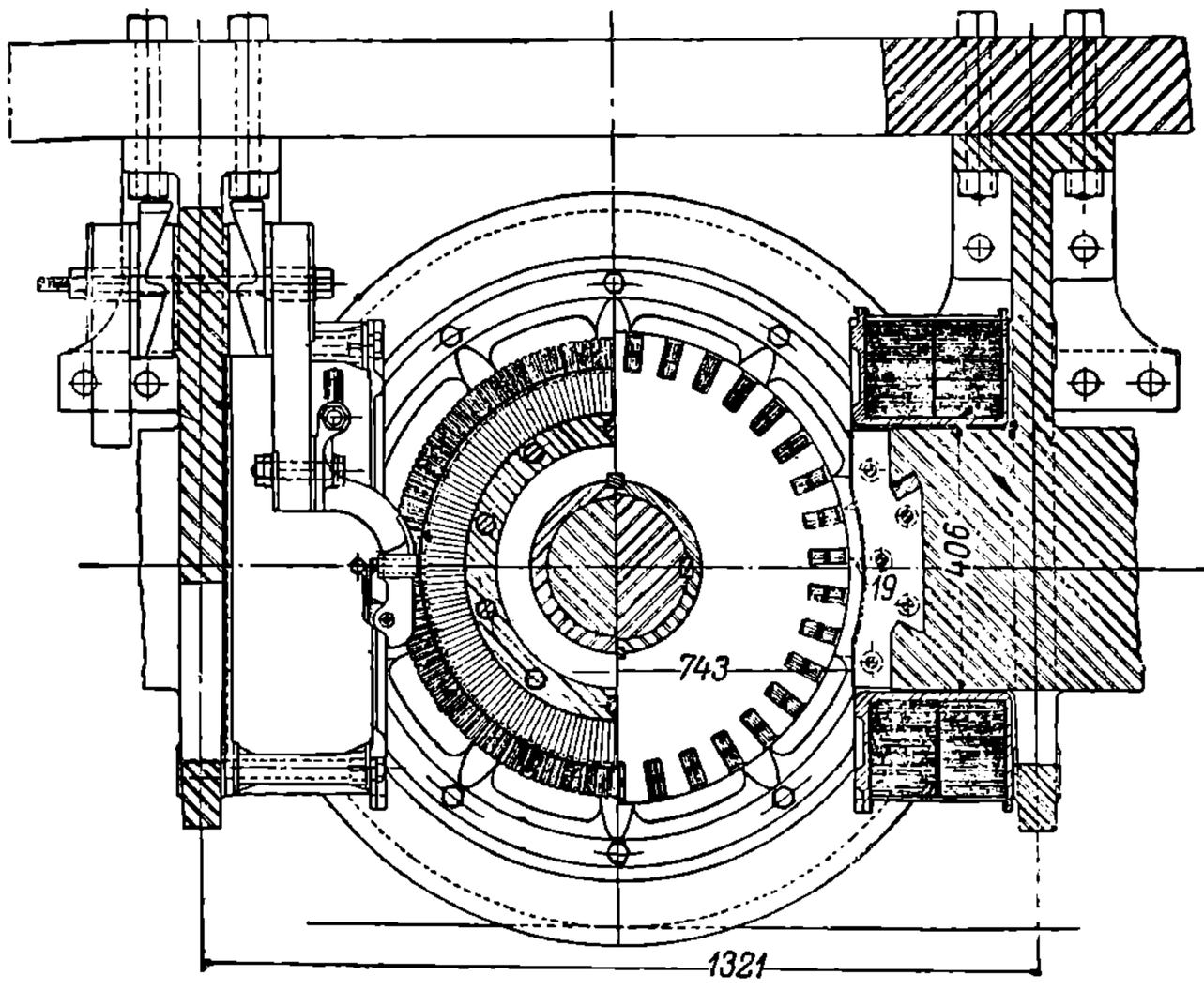


Рис. 31. Поперечный разрез якорноосевого двигателя GEC мощностью 400 kW.

2. Характеристики тяговых двигателей постоянного тока.

Ввиду того, что тяговые электродвигатели имеют переменный режим работы, большие затруднения представляет методика выбора их мощности. При переменном режиме работы для этой цели недостаточно основываться на одной только длительной мощности машин. Необходимо иметь данные по крайней мере для двух режимов. В качестве второго в тяге принято брать, кроме режима длительного, режим работы в течение часа. В соответствии с этим, каждый тяговый двигатель должен характеризоваться мощностями часовой и длительной. Под часовой мощностью следует подразумевать такую мощность, работая при которой в условиях стационарного режима, двигатель, начиная работать без превышения температуры над окружающей средой, по истечении часа получает предельно допустимую для него температуру нагрева. Продолжительною мощностью следует считать такую, которую двигатель может давать в течение длительного времени при предельно допустимой для него температуре. Под работой при предельно допустимой температуре нагрева надо понимать режим, когда ни в одной части двигателя температура не превосходит допустимой нормы.

Часовой режим тяговых электродвигателей в настоящее время характеризуется мощностью в киловаттах (KW_h) и часовым током (I_h) с отнесением и мощности и тока к полному напряжению двигателя (U). Следует, однако, иметь в виду, что пока еще часто выражают мощность в лошадиных силах (PS_h). Продолжительный режим чаще всего определяется только токами (I_∞), причем нередко, особенно в американской практике, эти токи для более полной характеристики тепловых свойств двигателей относятся к нескольким напряжениям на их зажимах.

Кроме часовых и длительных мощностей, современные тяговые электродвигатели нормально должны характеризоваться мощностями максимальными. Это очень важно с точки зрения определения допустимых для двигателя перегрузок. Нормально под максимальными мощностями подразумевают такие мощности, при которых машины

НБ УГЛМТ (ДІТ)

способны без особого ущерба для себя работать около двух минут. В двигателях с коллекторами максимальные мощности обычно ограничиваются процессом коммутации. Чаще всего предельно возможная мощность составляет 175—200% от часовой.

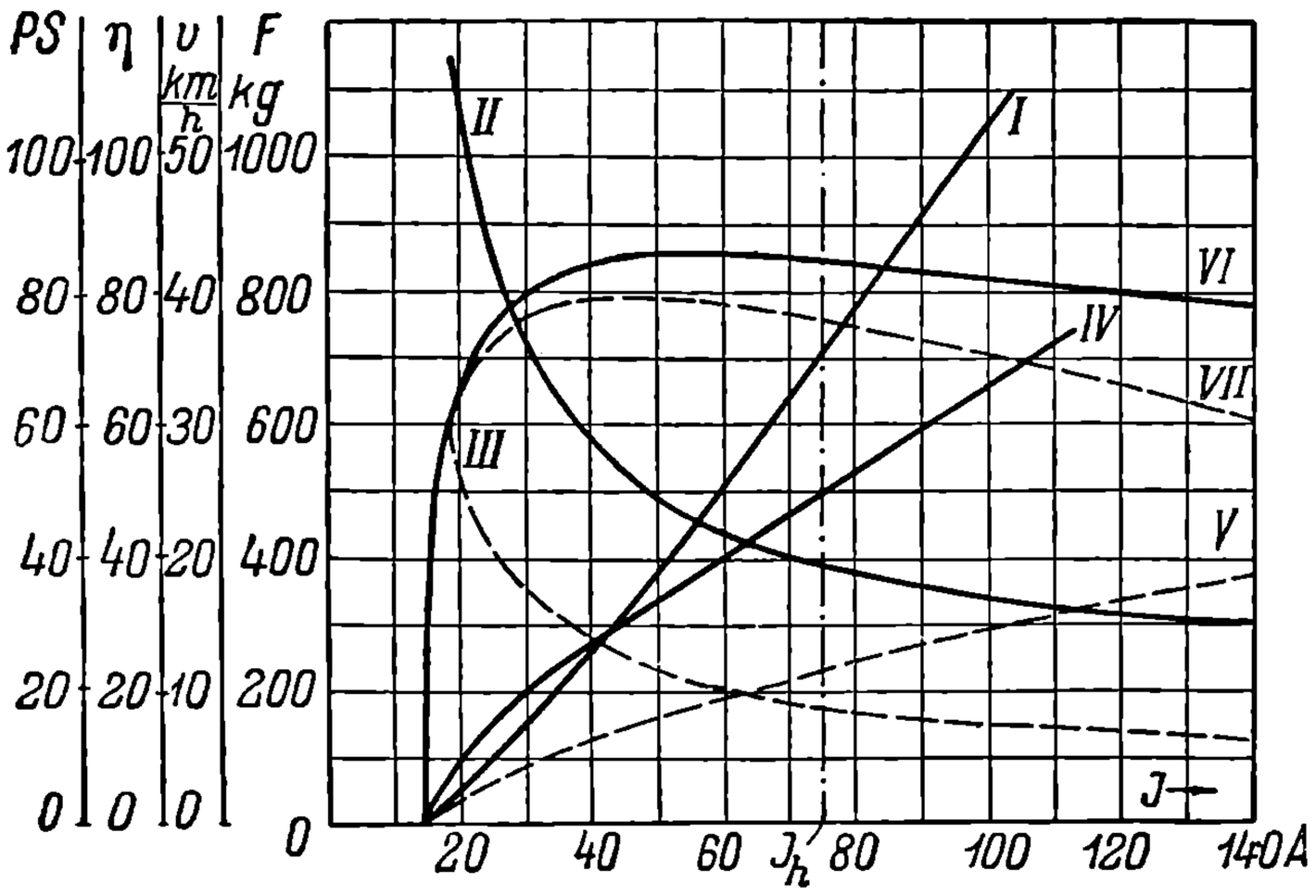


Рис. 32. Тяговые характеристики трамвайного двигателя ТН мощностью 50 PS.

При работе тяговых электродвигателей необходимо считаться также со скоростями их вращения. Нельзя допускать по механическим условиям скоростей превышающих определенные нормы. При испытаниях двигателей, требуют, чтобы они выдерживали скорости порядка 120% от наибольших для них возможных. Чаще всего наибольшая допустимая скорость составляет 200—250% от скорости часового режима.

Современные тяговые двигатели постоянного тока, как это уже можно было видеть из разбора их конструкции, выполняются преимущественно по типу последовательных машин. Отступления от этого правила имеют место пока только в единичных специальных случаях. В последующих главах, посвящаемых изучению теории и экономике движения поезда, будут изложены преимущества последовательных двигателей для тяги, а также отмечены и те случаи, когда может итти речь о применении шунтовых или компаундных систем.

При построении характеристик тяговых двигателей основным фактором, в зависимости от которого строятся прочие величины, обычно берется нагрузочный ток, откладываемый по оси абсцисс. По оси ординат откладываются скорости силы тяги и к. п. д. Последние три фактора относятся или к валу двигателя, или к ведущей оси подвижного состава, причем в последнем случае учитываются и потери в промежуточной передаче, если таковая имеется. В первом случае характеристики принято называть электромеханическими, во втором — тяговыми. На практике чаще применяется второй тип характеристик. Кроме приведенных характеристик, при тяговом расчете имеет большое значение кривая $F=f(v)$, называемая механической характеристикой. Построение последней зависимости не представляет труда, если известны основные кривые $v=f(I)$ и $F=f(I)$.

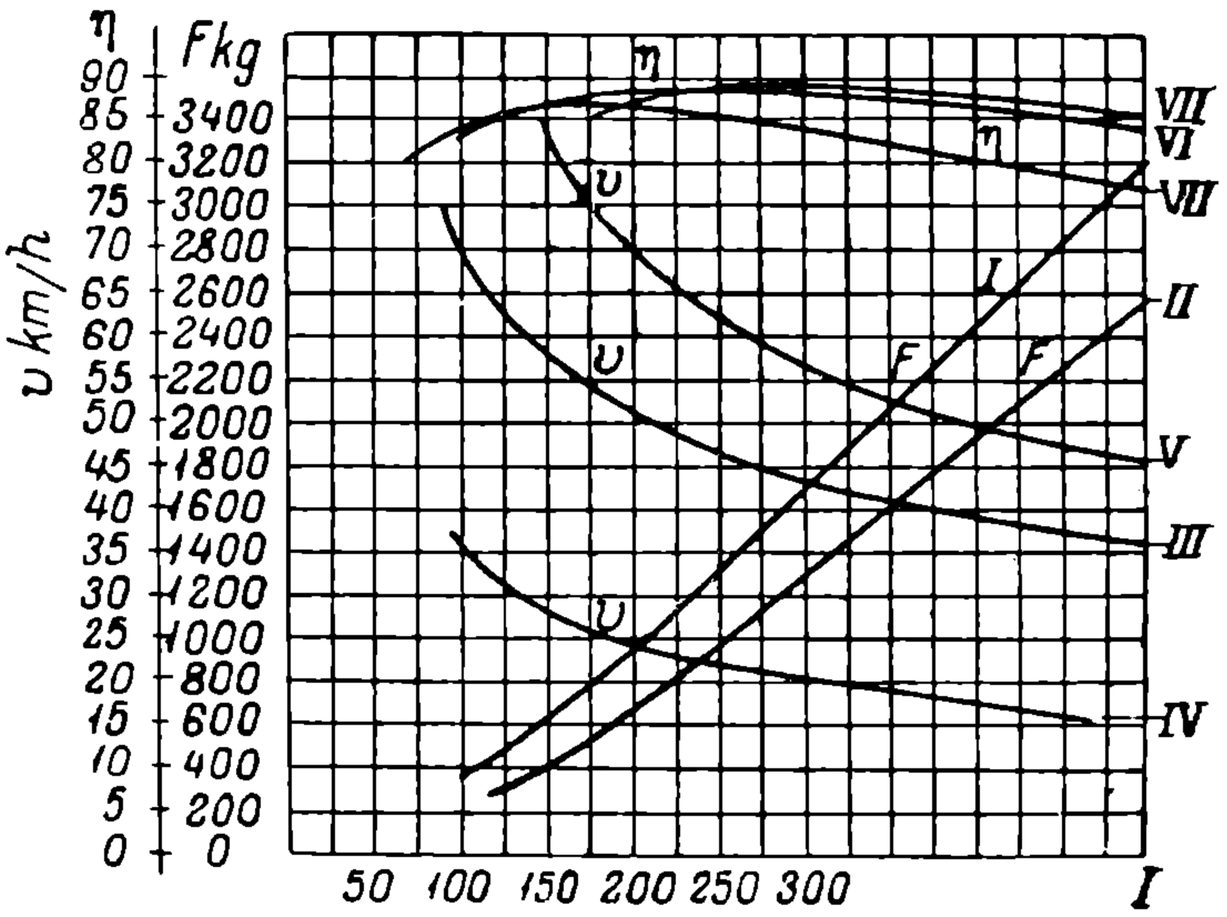


Рис. 33. Тяговые характеристики электродвигателя постоянного тока зав. им. Кирова ДПИ-150.
$U=750$; $I_h=250$; $I_\infty=185$; $k_э=3{,}69$; $D=1050$ mm.

Обозначения.

Кривые
$I-F=f(I)$ при 750 V и 375 V.
$II-F=f(I)$ при 750 V и ослабление тока в обмотке возбуждения 42,5%
$III-v=f(I)$ при 750 V.
$IV-v=f(I)$ при 375.
$V-v=f(I)$ при 750 V при той же шунтировке.
$VI-\eta=f(I)$ при 750 V.
$VII-\eta=f(I)$ при 375 V.
$VIII-\eta=f(I)$ при 750 V и той же шунтировке.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

На рис. 32 приведены тяговые характеристики трамвайного двигателя с часовой мощностью в $PS_h = 50$ завода Т. Н. Кривые, нанесенные сплошными линиями, относятся к нормальному напряжению в 600 V, пунктирными — к половине нормального в 300 V. Кривая I дает зависимость $F = f(I)$, кривые II и III — $v = f(I)$, кривые IV и V — $PS = f(I)$. Рис. 33 изображает тяговые характеристики двигателя для пригородных железных дорог с часовой мощностью в 170 kW завода им. Кирова.

Приведенные характеристики тяговых двигателей (рис. 32) дают картину их работы при нормальном соотношении ампервитков возбуждения (AW_3) и якоря (AW_2). Очень часто (рис. 33) двигатели работают с варьированием указанного соотношения. Наиболее часто применяется ослабление AW_3 по сравнению с основной их величиной. Это достигается или применением секционированных обмоток возбуждения, или приключением к обмотке возбуждения шунтирующих сопротивлений. Наиболее распространенные нормы уменьшения ампервитков возбуждения по сравнению с основными на 25 и 50% или на 33 и 50%. В первом случае ампервитков возбуждения остается 75 и 50%, во втором — 67 и 50%.

На рис. 34 приведены характеристики электровозного двигателя ДПЭ-340 завода им. Кирова с часовой мощностью 340 kW. Кривые с обозначением *FS*-1 относятся к полному полю, *FS*-2 — к полю при токе в обмотке возбуждения по сравнению с током якоря в 67% и *FS*-3 — при токе в 50%. Кривая к. п. д. относится к полному полю. Две другие кривые к. п. д. в пределах взятых погрузочных токов лежат очень близко к приведенной и поэтому они не нанесены. Вообще же следует иметь в виду, что кривая к. п. д. при ослабленном поле обычно пересекает кривую при полном поле, располагаясь ниже последней при малых нагрузках и выше при больших. Чем больше степень ослабления поля и выше пределы нагрузочных токов, тем значительнее сказывается указанное свойство.

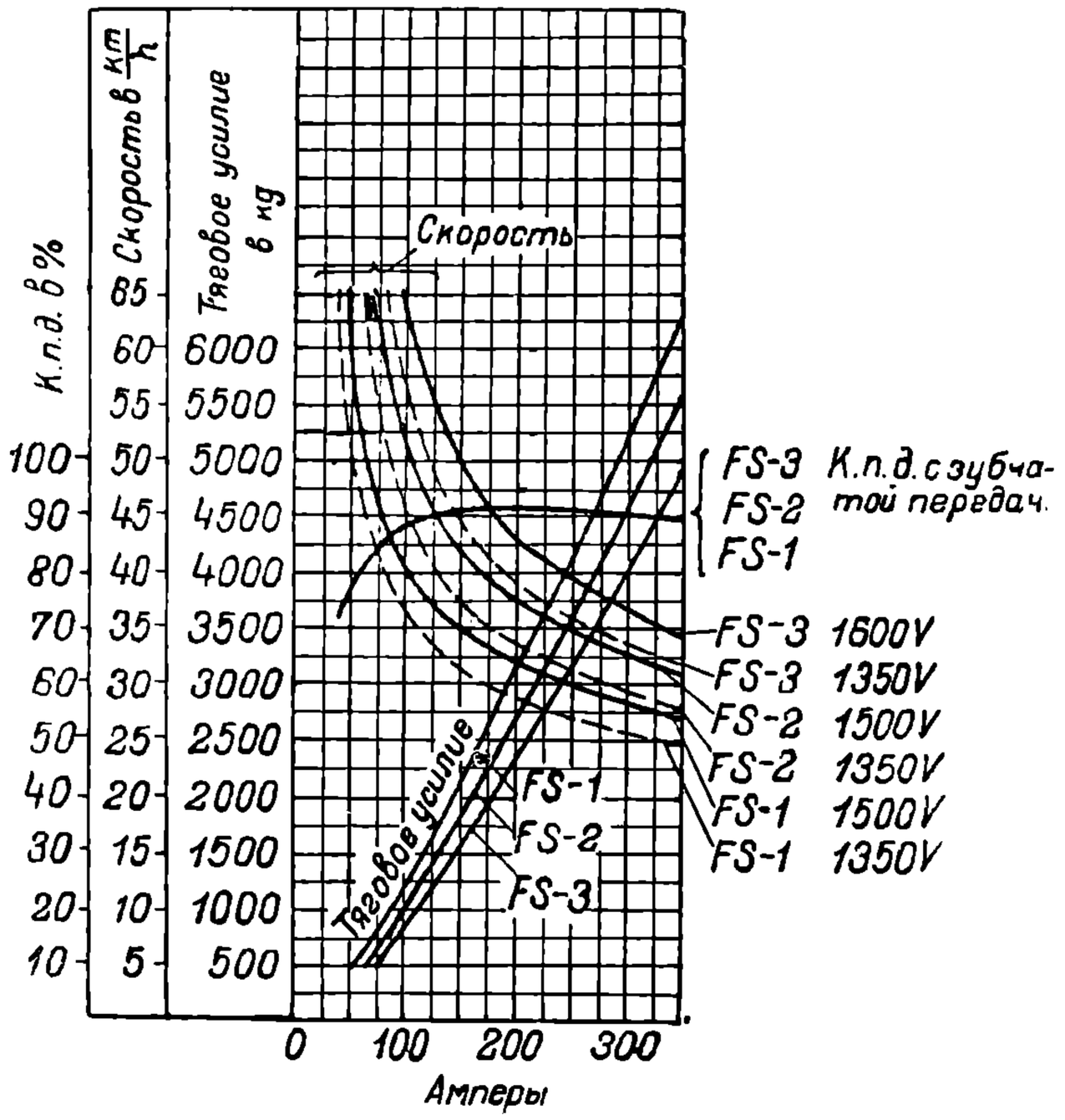


Рис. 34. Тяговые характеристики двигателя ДПЭ-340 завода им. Кирова.

Анализ характеристик современных двигателей постоянного тока показывает, что по общему виду для двигателей различных систем и типов они относительно мало отличаются друг от друга. Близкие друг к другу методы расчета, материалы, степени их использования объясняют это явление. Некоторые различия в характеристиках двигателей вызываются, главным образом, расхождениями в степени насыщения их магнитной системы. Насыщение имеет важное значение для двигателей, так как бо́льшая или меньшая его степень приближает или удаляет идеальную последовательную характеристику от шунтовой. Степень насыщения рационально характеризовать особым коэфициентом насыщения. Pannel предлагает этот коэфициент определять отношением скоростей при токе равном $\frac{1}{3} I_h$ и при токе I_h. Современные двигатели имеют этот коэфициент в пределах 1,6 – 1,9. При ослабленном поле коэфициент этот повышается, доходя при сильной степени ослабления до 2—2,2.

Другим фактором, оказывающим влияние на кривые двигателей, является форма к. п. д. Наибольшие его значения желательно иметь при такой нагрузке, при которой двигатель потребляет из сети наибольшее количество энергии. Максимальные значения

ЛБ УИЖТ (ДІІТ)

к. п. д. у современных двигателей чаще всего соответствуют току, равному $0{,}7—0{,}75I_h$ Форма кривой к. п. д. зависит от соотношения потери холостого хода и джоулевых, имея максимум при равенстве этих потерь. Влияет также на форму кривой к. п. д. и степень использования материала в двигателе. Чем лучше этот материал использован, и чем быстроходней двигатели, тем более резкие перегибы имеет кривая к. п. д. Картину распределения потеры в современных двигателях дают кривые рис. 35 и 36, приведенные для двигателя GEC мощностью $PS_h = 235$, $I_h = 250$A и $U = 775$ V. Кривые рис. 35 относятся к полному полю, а кривые рис. 36 — к шунтировке в 50%. Верхние кривые на обоих рисунках изображают общие потери двигателя. Промежутки I характеризуют потери в зубчатой передаче, II — механические и воздушные потери, III — электрические потери в контактах щеток, IV — потери Джоуля в обмотках, V — добавочные магнитные потери, вызываемые наличием тока в якоре, и VI — магнитные потери при

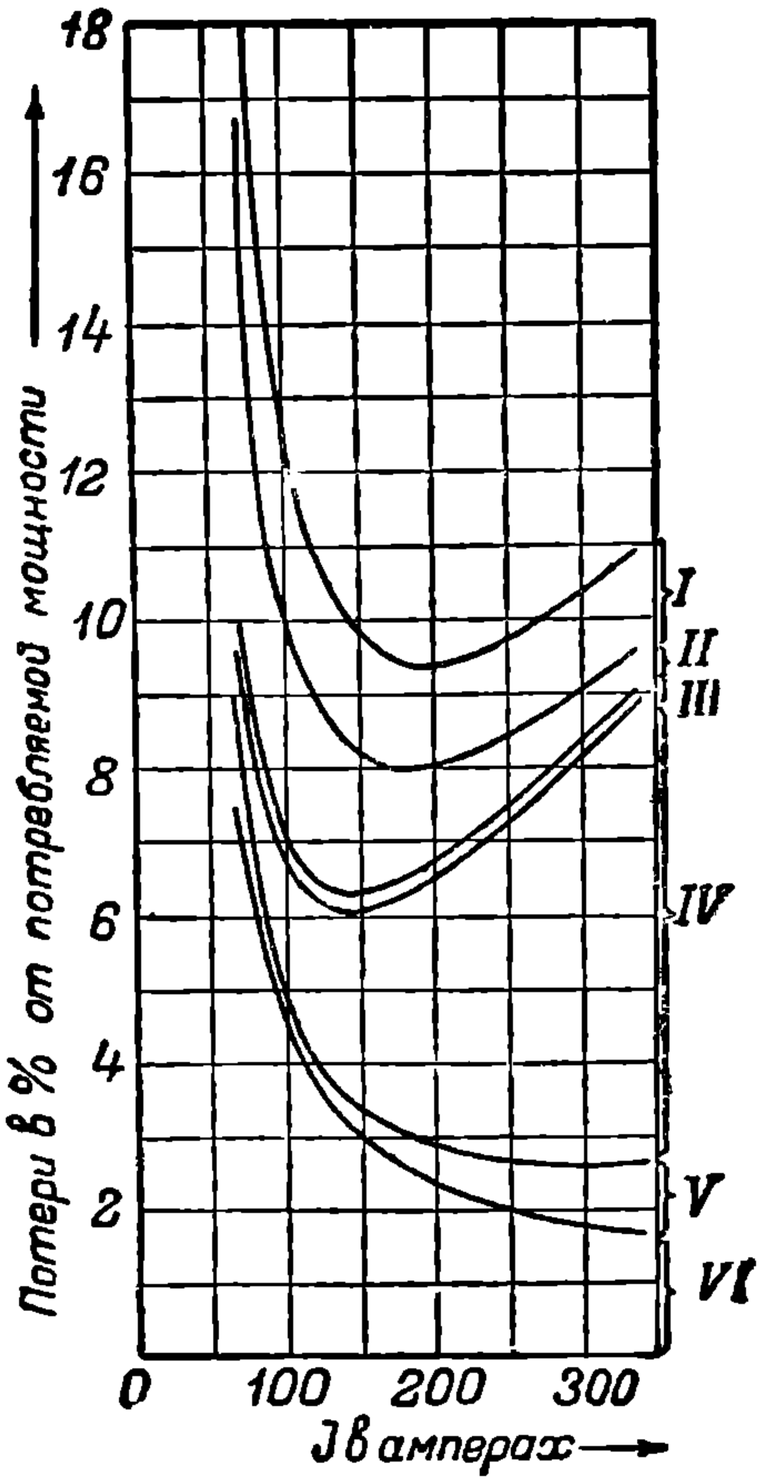


Рис. 35. Кривые потерь в двигателе GEC-235 при полном поле.

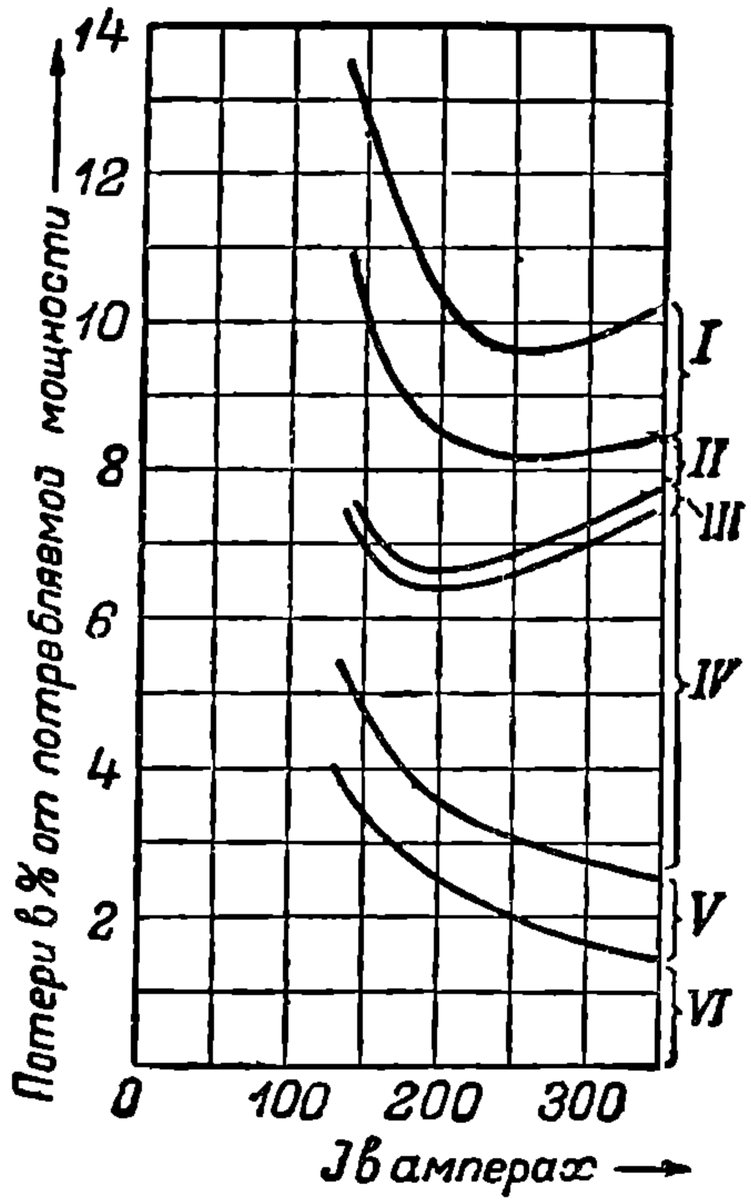


Рис. 36. Кривые потерь в двигателе GEC-235 при 50% шунтировки.

холостом ходе. Добавочные магнитные потери, как известно, состоят из потерь, вызываемых невыгодным перераспределением индукции в железе якоря благодаря его реакции. Добавочные потери по мере увеличения степени ослабления поля получают все большее и большее удельное значение.

3. Особенности коммутации у тяговых электродвигателей.

Коммутирование тока в тяговых электродвигателях постоянного тока подчиняется в основе общим правилам коммутации машин этого типа. Однако, по условиям работы двигателей на линии, встречается ряд особых факторов, которые сильно осложняют коммутирование тока и вызывают такие явления, с которыми в условиях стационарных машин практически считаться не приходится.

Основные факторы, влияющие на работу коллектора и щеток, — это, с одной стороны, процессы, имеющие место в коммутационной зоне и определяющиеся фактом коммутирования тока, и, с другой стороны, это те напряжения, которые получаются между отдельными коллекторными пластинами. Процесс коммутирования тока коллектора является основной причиною искрения щеток, представляющего часто большую

НТБ УГАЗУНТ (ДІІТ)

опасность для двигателя. С точки зрения последствий однако, еще большую опасность представляют чрезмерные напряжения между пластинами коллектора. Под влиянием этих напряжений могут образоваться вольтовы дуги, перекрывающие соседние пластины коллектора, в результате чего может возникнуть круговой огонь по всему коллектору от одной щетки к другой, с возможностью переброски образующейся вольтовой дуги на кожух двигателя. Процесс образования кругового огня имеет первопричиной местное образование искрения или вольтовой дуги, чаще всего под щеткой. Местное искрообразование вызывает ионизацию окружающего воздуха, что и является главнейшей причиной распространения области дугообразования по всему коллектору. При загрязненных коллекторах процесс образования кругового огня встречает еще более благоприятную почву.

Как известно, в общем случае нормальной работы машин постоянного тока э. д. с., действующая в короткозамкнутых витках и нарушающая прямолинейное течение коммутации, образуется под действием двух составляющих: первая, так называемая искровая э. д. с., вызывается изменением поля, охватывающего короткозамкнутые витки, а вторая получается от перемещения витков в поле, получающегося в зоне коммутации, если эта э. д. с. является неблагоприятной для компенсации первой.

Основным фактором, затрудняющим коммутацию тока, является реакция якоря. Она осложняет коммутацию в двух направлениях. Во-первых, она создает неблагоприятное поле в зоне коммутации, и, во-вторых, она, сильно искажая кривую результирующего магнитного поля, дает местное увеличение междупластинного напряжения по коллектору. Особенно трудно бороться с реакцией якоря при реверсивных двигателях, к которым принадлежат и тяговые. Единственно надежное средство такой борьбы — компенсационные обмотки—в двигателях постоянного тока по условиям экономики почти совершенно не применяется. Ввиду этого с реакцией якоря борются увеличением насыщения магнитной системы и применением добавочных полюсов. Особенно сильно насыщены старые двигатели, работающие без добавочных полюсов. В двигателях с добавочными полюсами насыщение делается меньше, но все-таки оно держится в достаточно высоких пределах. При ослаблении магнитного поля реакция якоря делается особенно ощутимой, и здесь встречаются наибольшие затруднения в отношении коммутирования тока. Поэтому ослаблять ампервитки возбуждения больше, чем на 50% и в крайнем случае на 65%, не может быть рекомендовано.

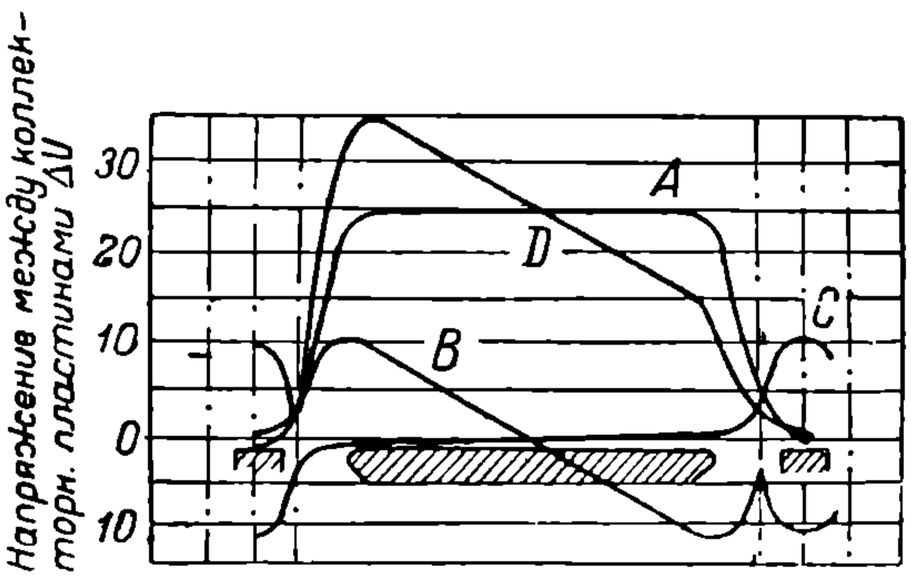


Рис. 37. Кривые напряжения между соседними коллекторными пластинами для случая нормально установившегося режима.

Кривые рис. 37, приводимые Hellmund'ом, показывают влияние реакции якоря на распределение напряжения по периферии коллектора (Л. 69). Эти кривые дают представление о э. д. с. индуктируемых в якоре от его вращения. Кривая *A* характеризует собою напряжения между пластинами коллектора от главного возбудительного потока Ф. Кривая *B* дает составляющие этих напряжений, производимых якорным потоком Φ_a. Кривая *C* указывает влияние потока добавочных полюсов. Результирующий эффект всех указанных величин определяется кривой *D*, дающей напряжение между коллекторными пластинами при нормальной работе. Как видно из последней кривой, благодаря реакции якоря, напряжения между коллекторными пластинами в определенных местах периферии якоря значительно возрастают.

Еще более резкое их возрастание может получиться при так называемых неустановившихся режимах. Наиболее часто эти режимы в условиях тяги получаются при замыкании и размыкании цепи двигателей. Особенно резко протекают такие режимы при отскакивании токоприемника от контактного провода и последующего восстановления контакта. В этот период в цепи двигателей не имеется нормально никаких добавочных сопротивлений. Ввиду этого броски тока могут достигать больших значений. Благодаря самоиндукции системы, токи во время таких процессов, прежде чем принять постоянную величину, непрерывно меняют ее, подчиняясь законам переменного во времени режима.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Из неустановившихся режимов с точки зрения коммутации особенно опасен период мгновенного включения цепи после отрыва токоприемника. В такие периоды, благодаря прохождению главного потока через массивные сплошные массы стали, получается сильный эффект токов Фуко, в результате чего поток во времени значительно отстает от тока. В то же время поток реакции якоря, имея путь по якорю и полюсным башмакам, выполняемым из листовой динамной жести, растет быстрее, что вызывает резкое искажение главного поля и местное возрастание разности потенциалов между пластинами. Процесс осложняется еще и тем, что благодаря запаздыванию главного поля, а следовательно, и противоэлектродвижущей силы ток в цепи сильно возрастает.

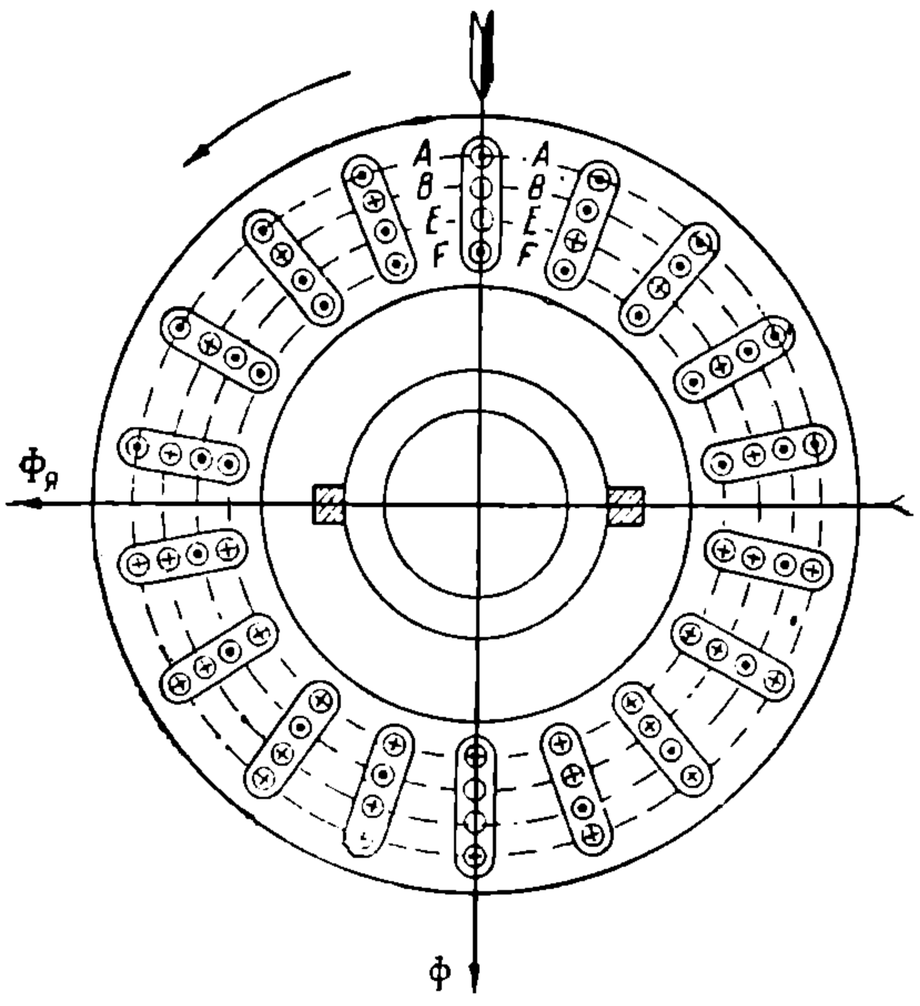


Рис. 38. Направление действия в пространстве э с., образуемых в витках якоря при неустановившемся режиме.

Дальнейшие осложнения при данном режиме получаются благодаря тому, что на рассмотренные э. д. с., происходящие от вращения якоря, накладываются э. д. с., обусловленные тем, что сами потоки в неустановившемся процессе являются величинами, переменными во времени. Это влечет за собою появление в якорных витках э. д. с. самоиндукции и взаимоиндукции. Направление деиствия этих э. д. с. в пространстве показано на рис. 38 и 39. Согласно рис. 38 в каждом витке якоря должны появляться четыре э. д. с.: *A* — образуемая главным потоком вследствие вращения, *B* — образуемая аналогично потоком реакции якоря, *F* — от самоиндукционного эффекта потока якоря и *E* — от трансформаторного или взаимоиндукционного воздействия главного потока Ф на якорь.

Э. д. с. самоиндукции, образуемая якорным током в витках якоря, меняется от витка к витку, имея максимум по середине расстояния между щетками, так как при треугольной форме кривой магнитного поля наибольший поток пронизывает центральный виток.

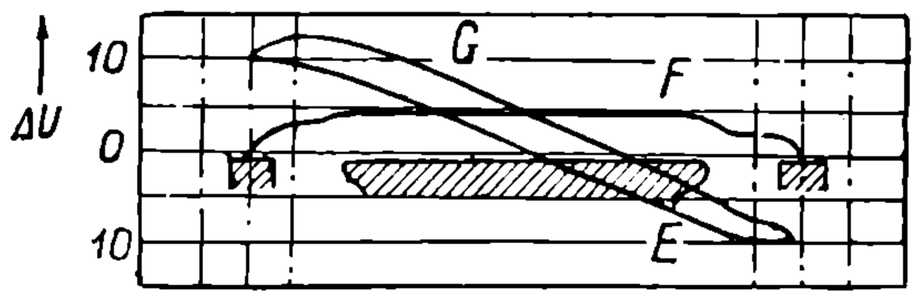


Рис. 39. Э. д. с. самоиндукции и взаимоиндукции в витках якоря по его периферии.

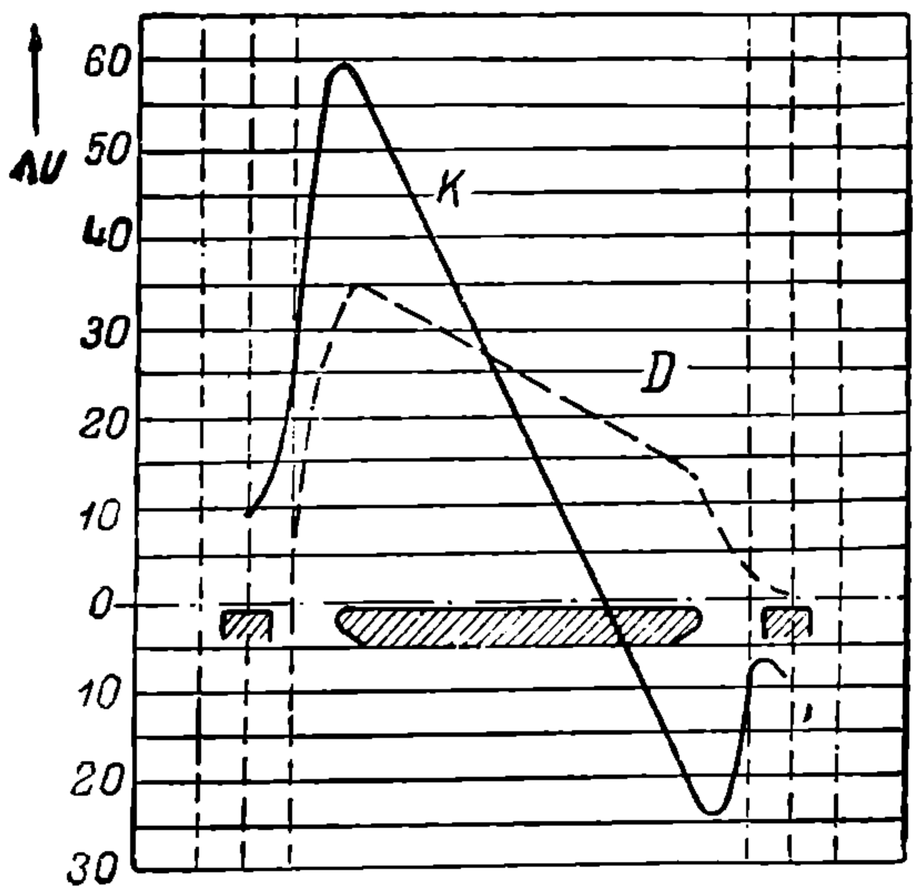


Рис. 40. Кривые напряжения между соседними коллекторными пластинами при неустановившемся режиме

Кроме э.д.с. самоиндукции, как уже указано, при мгновенных процессах включения и выключения тока приходится иметь дело с э. д. с. взаимоиндукции в якорных витках, получаемой от трансформаторного эффекта главного потока, изменяющегося в период включения цепи. Наибольшее значение трансформаторная э. д. с. имеет в витке по нейтрали. Значение э. д. с. трансформации двоякое. Во-первых, она, действуя в витке, замыкаемом накоротко щеткой, производит там сильные добавочные токи короткого замыкания. Во-вторых, она, как и реакция якоря, невыгодно перераспределяет напряжения между коллекторными пластинами.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

На рис. 39 кривая *F* дает изменение э. д. с. самоиндукции и *E*—э. д. с. трансформации, а *G*—суммарную э. д. с. от *F* и *E*. Результирующая кривая э. д. с., действующих в отдельных витках якоря с учетом кривой *G*, на рис. 40 обозначена через *K*. Она показывает, насколько неблагоприятна картина распределения напряжения по отдельным виткам якоря. Наибольшее напряжение между пластинами, как следует из сопоставления кривых *D* и *K*, может подняться до двухкратной величины напряжения, соответствующей нормальному режиму, не говоря уже о том, что и под щетками тогда получается крайне неблагоприятное соотношение э. д. с., неизбежно влекущее за собой сильное местное искрение.

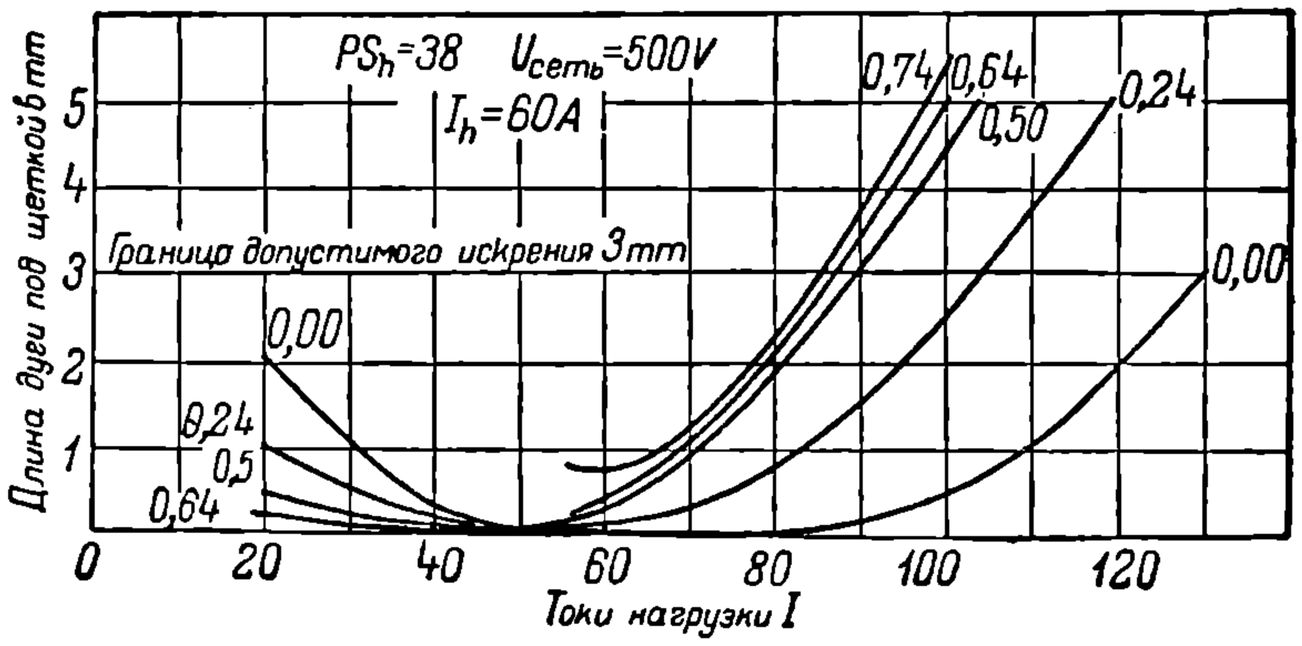


Рис. 41. Кривые, характеризующие коммутацию при изменении степени ослабления возбудительного тока от 0,0 до 0,74.

Затруднения при коммутировании тока, как уже было указано, увеличиваются по мере ослабления основного магнитного потока, с чем приходится считаться, если применяется регулирование главного поля. Кривые рис. 41 и 42, приведенные Adler'ом, дают представление о степени влияния ослабления поля на процесс коммутации. Adler считает условия коммутирования приемлемыми при наличии дуги под щетками длиною не выше 3 mm (Л. 76). Кривые рис. 41 и 42 даны для различных степеней ослабления ампервитков возбуждения, в пределах от 0 до 0,74 (рис. 41) и от 0 до 0,6 (рис. 42). Первый рисунок имеет целью показать, до каких пределов можно перегружать тяговые двигатели по условиям искрения под щетками. Второй рисунок дает представление о том, каким образом влияет на коммутацию двигателя, работающего при нормальном токе, выключение его цепи с последующим ее включением без пусковых реостатов. Как видно из приведенных кривых, опасность получения недопустимого искрения под щетками и образования кругового огня растет с увеличением длительности времени между выключением и включением, а также и с увеличением степени ослабления поля. Приведенные кривые рис. 41 и 42 относятся к двигателям трамвайного типа. При двигателях больших мощностей, особенно при высоких напряжениях на коллекторе, условия коммутации получаются еще более тяжелыми.

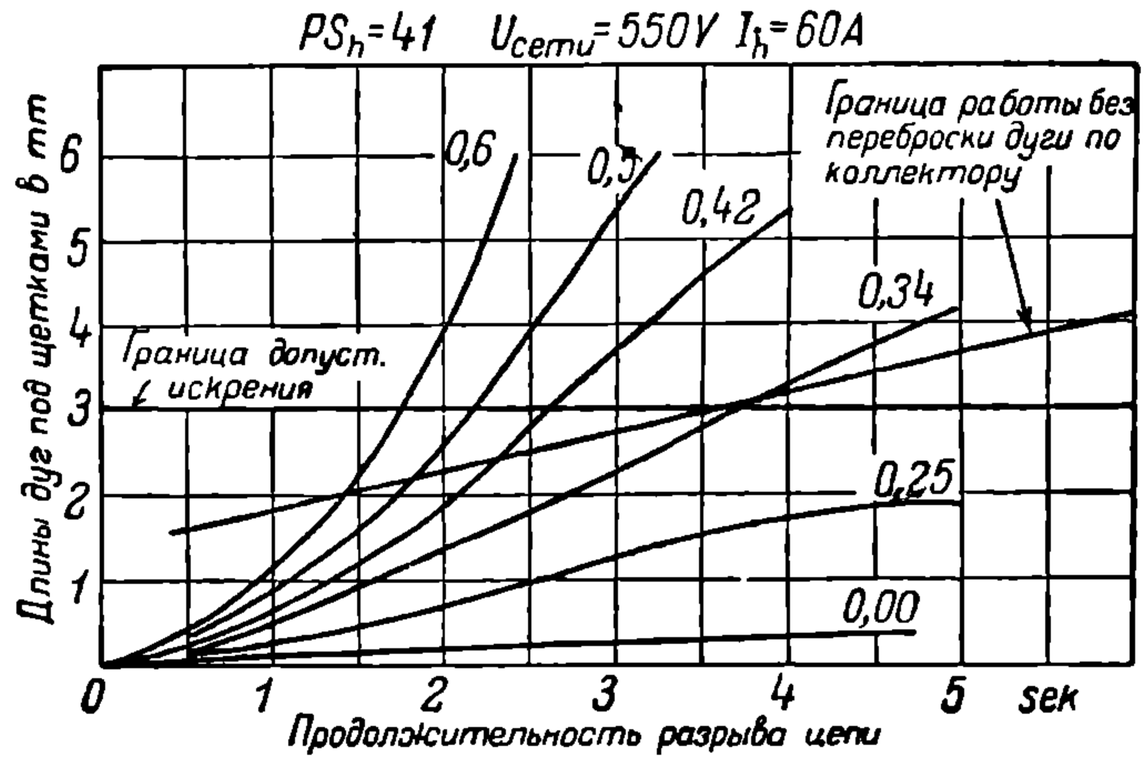


Рис. 42. Кривые интенсивности искрения при ослаблении возбудительного тока от 0,0 до 0,6 в случаях разрыва и последующего восстановления цепи двигателя.

Допустимые наибольшие напряжения между пластинами для двигателей трамвайного типа — порядка 27—28 V. При шунтировке поля, однако, эти напряжения сильно возрастают, доходя иногда до 40—42 V. Для двигателей железнодорожного типа больших мощностей указанные нормы следует несколько снижать. В данном случае лучше не итти дальше 30—32 V даже при ослаблении поля. Среднее напряжение между коллекторными пластинами не рекомендуется брать выше 19—21 V.

4. Основные тенденции в строительстве тяговых двигателей постоянного тока.

При производстве тяговых электродвигателей приходится стремиться к получению возможно легкого и компактного двигателя, но при непременном условии, чтобы к. п. д. его не снижался ниже определенных норм.

Лебедев

НБ УГЛТУ (ЦНТ)
Институт инж. зер...
Учебный цех...
БИБЛИОТЕКИ
им. П. М. Кагановича

В основу расчета тяговых двигателей кладут классические постоянные. На рис. 43 приведены таковые для современных тяговых электродвигателей в функции от моментов. Постоянные выражаются обычным способом:

$$C = \frac{D^2 l n 10^{-4}}{K W_h}, \tag{10}$$

где D — диаметр якоря в cm, l—длина его железа в cm и n—число оборотов в минуту.

При расчете тягового двигателя, помимо правильного выбора постоянной, очень важно установить рациональное соотношение между определяющими ее значение величинами D, l и n. Правильный выбор указанных трех элементов является важнейшей расчетной задачей, определяющей собою основной облик машины и ее конструктивно-экономические достоинства.

Большим осложнением при установлении D и l для тяговых двигателей являются габаритные ограничения. По высоте размеры двигателя ограничиваются требованием иметь достаточное расстояние между наинизшими точками кожуха двигателя и наивысшими точками поверхности пути и мостовой. Размеры эти в Америке не берут ниже 67 mm, в Европе — 100 mm и у нас не допускают их ниже 120—125. Еще бо́льшие ограничения имеются в отношении l. Двигатель должен поместиться вместе с передачею между колесами подвижного состава. При таких условиях варьировать l можно только в относительно узких рамках, особенно при больших мощностях и узкой колее. В этих последних случаях по большей части приходится брать l наибольшей возможной по условиям габарита. При общей постановке расчета наивыгоднейшее соотношение между D в l следует устанавливать путем вариантов, не забывая, что чрезмерно малые величины $D^2 l$ могут быть не допустимы с точки зрения нагревания машины.

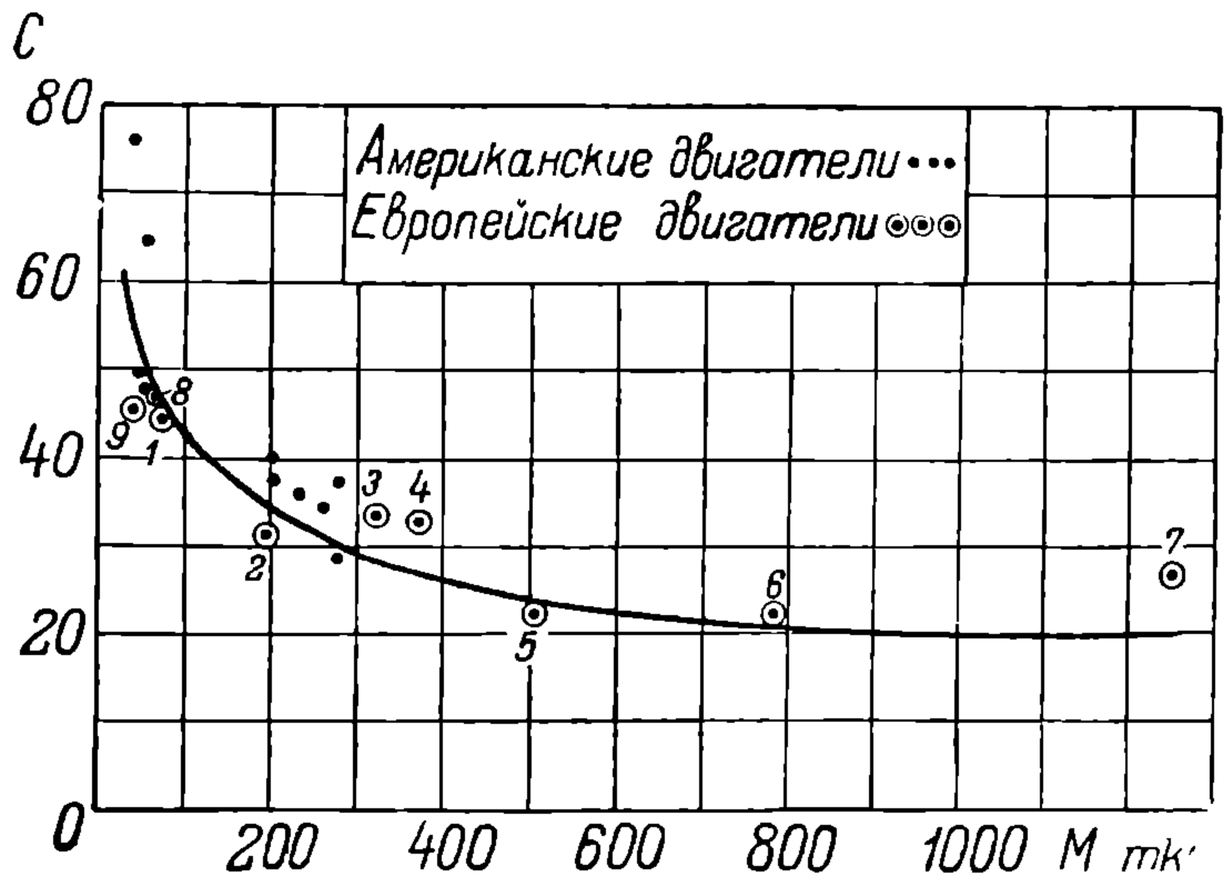


Рис. 43. Кривая постоянной тяговых двигателей в функции от момента вращения.

Особенно большое влияние на вес машины имеет D, оказывая квадратичное влияние на объем активных железных масс якоря, а также влияя сильнейшим образом и на количество меди. В отношении последнего фактора интересна работа Closkey'я, исходившего в своих выводах из условия $D^2 l = \text{const}$. При таком соотношении увеличение D приводит к уменьшению l, что влечет за собою и уменьшение длины витка, а следовательно, и потребной для обмотки меди. При уменьшении D картина получается обратная. На длине лобовых частей обмотки изменение D при условии постоянства числа полюсов сказывается в довольно сложной зависимости, дающей minimum при некотором D. В результате и общее количество меди в функции от диаметра якоря выражается U-образной кривой, дающей minimum при определенном соотношении D и l.

Влияние диаметра якоря на медь полюсов определяется зависимостью длины витка катушек от формы витка. При одной и той же площади поперечного сечения железа полюса длина витка катушки будет наименьшей при окружности и затем при квадрате, становясь все больше и больше по мере удлинения прямоугольника. Особенно сильно сказывается отмеченное явление на катушках добавочных полюсов.

В результате указанных влияний и общее количество меди, потребное для якоря и обмоток возбуждения, тоже имеет minimum при определенном соотношении D и l. Этот minimum важен не только с точки зрения затраты меди, но и с точки зрения наименьших медных потерь (Л. 70).

Интересную работу по установлению диаметров якорей выполнил американский инженер Ferris (Л. 67). Исходя из габаритов американской ж. д. и беря при колее

НТБ УГУНТ (ДІІТ)

в 1435 mm наибольшие возможные по габаритным условиям *l*, Ferris дал при окружной скорости якоря, равной при часовом режиме 17,8 m/sec, для различных мощностей и различных типов железнодорожных двигателей значения наименьших возможных диаметров. Основные выводы Ferris'a приведены в табл. 4. При современном состоянии производства тяговых электродвигателей диаметры их якорей удается брать несколько ниже, чем это дает Ferris. Тем не менее данные его пред-

ТАБЛИЦА 4.

Соотношения часовых мощностей тяговых двигателей при различных их параметрах.

Типы двигателей	Мощность в kW	Напряжение в контактном проводе в V	Напряжение на коллекторе в V	Число полюсов	Диаметр якоря в cm
Подвесноосевые	150	3000	750	4	28,5
	200	3000	750	4	36,5
	250	3000	750	4	47,5
	300	3000	750	4	67,5
	200	3000	750	6	38
	250	3000	750	6	40
	350	3000	750	6	61
	400	3000	750	6	75
	200	3000	1000	4	41
	250	3000	1000	4	49,5
	300	3000	1000	4	63
	200	3000	1000	6	41
	250	3000	1000	6	46
	300	3000	1000	6	52
	350	3000	1000	6	59,5
	400	3000	1000	6	70
	450	3000	1000	6	95
	200	3000	1500	4	50
	250	3000	1500	4	55
	300	3000	1500	4	63
	200	1000	1000	4	31
	250	1000	1000	4	38
	300	1000	1000	4	46
	350	1000	1000	4	57,5
	300	1000	1000	6	42
	350	1000	1000	6	48
	400	1000	1000	6	57
	500	1000	1000	6	85
Опорнорамные	200	3000	750	4	35,5
	250	3000	750	4	41,5
	250	3000	750	6	36,5
	300	3000	750	4	46,5
	300	3000	750	6	41
	400	3000	750	4	66
	400	3000	750	6	52,5
	500	3000	750	6	67
	500	3000	750	8	59
	750	3000	750	8	98
	750	3000	750	10	82
	200	3000	1000	4	37,5
	250	3000	1000	4	41,5
	300	3000	1000	4	49
	300	3000	1000	6	44,5
	400	3000	1000	4	64
	400	3000	1000	6	53
	500	3000	1000	6	64
	700	3000	1000	6	105
	200	1000	1000	4	31
	250	1000	1000	4	33
	300	1000	1000	4	38
	350	1000	1000	4	44
	400	1000	1000	4	51
	400	1000	1000	6	42,5
	500	1000	1000	4	69
	500	1000	1000	6	53
	550	1000	1000	6	59
	750	1000	1000	6	89

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ставляют большой интерес, так как они наглядно показывают относительное влияние основных параметров двигателей на их размеры.

Очень важным фактором при производстве тяговых электродвигателей является вопрос о напряжении на коллекторе. При современном состоянии техники строительства тяговых двигателей замечается тенденция к понижению его значений посредством последовательного включения двигателей попарно. Объясняется это тем, что понижение напряжения до известного предела влечет за собою ряд преимуществ в конструктивном отношении. Более низкое напряжение дает возможность при одной и той же допустимой разности потенциалов между коллекторными пластинами уменьшить их число и этим понизить число витков обмотки якоря, увеличив сечение якорных проводов. Последнее обстоятельство выгодно отражается на машине так как при меньшем числе проводов и большем их сечении получается лучшее использование впадины, что влечет за собою и уменьшение диаметра якоря. Кроме того, вследствие уменьшения диаметра якоря при одной и той же допустимой окружной скорости можно повысить и число оборотов. Указанные соображения объясняют, почему, например, Вестингауз для быстроходных типов трамвайных, двигателей при нормальном напряжении 600 V в некоторых случаях берет на коллекторе 300 V, соединяя двигатели последовательно. Эта же тенденция проведена и в отношении последних двигателей государственных берлинских ж. д., где двигатели взяты при напряжении в контактной сети 750 V, с напряжением на коллекторе 375 V.

Однако, выгоды понижения напряжения уменьшаются по мере увеличения мощности, и при больших мощностях начинает становиться все более и более приемлемым повышение напряжения. Так, например, по данным Ferris'a, для подвесного двигателя мощностью в $KW_h = 200$ при 750 V требуется диаметр 365 mm, при 1000 V — 410 mm, при 1 500 V — 500 mm. Для мощности $KW_h = 300$ соотношения получаются иными: при 750 V необходимо иметь 675 mm, при 1 000 и 1 500 — 630 mm. Для $KW_h \geqq 350$ Ferris вообще считает практически приемлемым для подвесноосевых четырехполюсных двигателей напряжение не ниже 1 500 V.

Кроме напряжения на коллекторе, для тягового двигателя важна также величина напряжения в контактной сети. Чем выше это напряжение, тем солидней должна быть изоляция от корпуса, и тем хуже получается использование впадины, а также сильно ухудшается и тепловой баланс машины из-за понижения ее теплоотдачи. Возрастание диаметра якоря с повышением напряжения дает себя сильно чувствовать. Так, например, для $KW_h = 250$ при 3 000 V в контактном проводе и 1 000 V на коллекторе требуется по Ferris'y $D = 495$ mm, тогда как при 1 000 V на контактном проводе и на коллекторе можно обойтись 380 mm.

Важное значение при расчете тяговых двигателей имеет вопрос о количестве полюсов. Рациональное увеличение их вообще влияет благоприятно на экономику, так как это влечет за собою сокращение длины лобовых частей якорных обмоток и уменьшение толщины ярма. Однако, по мере увеличения напряжения на коллекторе применение большого количества полюсов встречает затруднение в отношении возможности получения недопустимых напряжений между коллекторными пластинами. Влияние числа полюсов можно видеть из табл. 4. Если взять в ней подвесноосевой двигатель с мощностью $KW_h = 250$, то переход с 4 на 6 полюсов дает сокращение диаметра при 750 V на 75 mm, а при 1 000 V всего только на 35 mm. Помимо этого, применение большого количества полюсов в подвесноосевых двигателях затруднено и с конструктивной точки зрения, так как в закрытом кожухе, ограниченном по размерам габаритом, размещение полюсов представляет значительные затруднения. Этим обстоятельством и объясняется, почему подвесноосевые двигатели строятся почти исключительно по четырехполюсной системе. Большее число полюсов берется только в некоторых случаях для опорнорамных двигателей. Примерами могут служить сдвоенный двигатель Вестингауза для дороги Ch. M. St. P. R. на 6 полюсов и большой двигатель Пенсильванских ж. д. на 10 полюсов.

Очень сильно на экономику при расчете двигателя влияет число его оборотов. Чем быстроходней машина, тем она легче и дешевле. Двигатели старых конструкций строились обычно на относительно низкое число оборотов, при часовом режиме порядка 500—650 об/мин. Новые двигатели выполняются значительно более быстроходными. Трамвайные двигатели в настоящее время строятся с числом оборотов

РВ УДУНТ (ДІІТ)

от 700 до 1 200 и железнодорожные от 650 до 820. Двигатели сдвоенные в общем строятся быстроходнее ординарных. Выбор того или другого числа оборотов для тяговых электродвигателей в очень сильной степени зависит от их типа, мощности и напряжения на коллекторе. Насколько велико влияние числа оборотов двигателей на их вес, можно видеть из данных завода Вестингауза. Так, например, двигатель этой фирмы на KW_h=60 имеет вес при n_h=600 около 1250 kg, а при n_h =900 только 1050. Другой двигатель той же формы на $KW_h = 19$ весит при $n_h = 600$ около 600 kg, а при $n_h = 1\,235$ всего только 395 kg. Для специальных трамвайных двигателей с двухступенчатой передачей в Америке сделаны попытки довести быстроходность до 2500 об/мин. У таких двигателей даже при небольших мощностях, порядка 25—30 kW, удается получить очень низкий удельный вес; доходящий до 9 kg/kW$_h$.

Увеличению числа оборотов кладет предел ограничение окружной скорости. Последняя не должна превосходить для якорей 50—55 и для коллекторов 40—45 m/sec. Для подвесноосевых двигателей, особенно трамвайных из-за габаритных ограничений часто не удается достигнуть этих пределов. В условиях трамвайной практики наибольшая окружная скорость редко превосходит 25—30 m/sec.

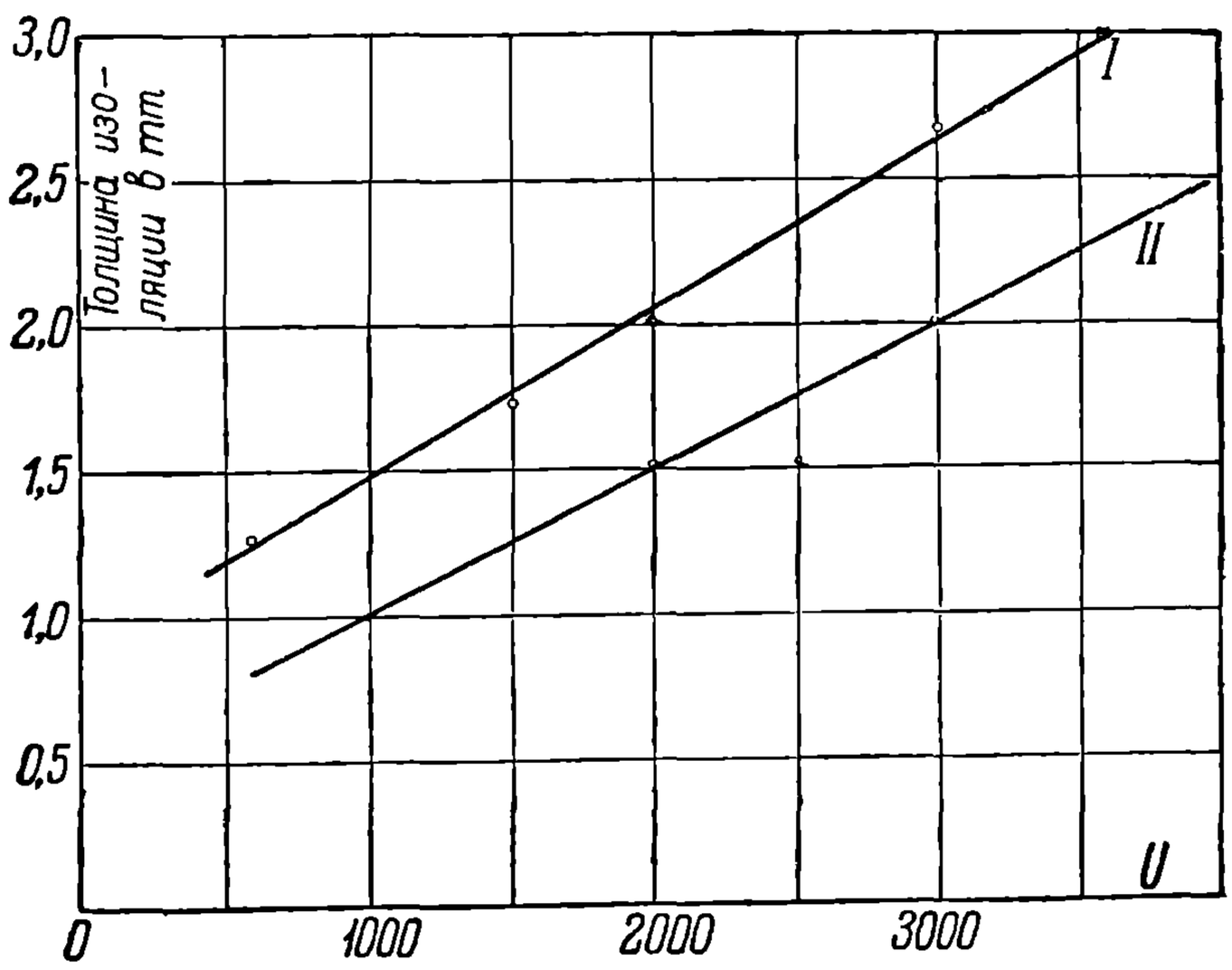


Рис. 44. Изоляции от корпуса в зависимости от напряжения в контактном проводе для тяговых электродвигателей.

Обмотки двигателей постоянного тока в большинстве случаев выполняются по типу последовательных, причем для малых двигателей берут только две группы щеток, а при больших мощностях ставят их столько же, сколько и полюсов. Основное преимущество последовательных обмоток — возможность лучшего использования впадин и меньшая чувствительность к асимметрии в магнитной системе. Более высокое использование периферии якоря при последовательных обмотках объясняется большими токами в каждом якорном проводнике, а следовательно, и бо́льшими сечениями этих проводников, что и дает лучшее использование впадины, а следовательно, и всего якоря.

Петлеобразные обмотки, помимо указанного, требуя эквипотенциальных соединений, с экономической точки зрения уступают последовательным, но имеют перед ними преимущество в отношении более правильного распределения тока между отдельными щетками и вследствие этого характеризуются несколько более устойчивым процессом коммутирования (Л. 50). Несмотря, однако, на некоторое преимущество в отношении коммутации петлеобразные обмотки в двигателях постоянного тока имеют относительно небольшое применение. Они становятся приемлемыми преимущественно при больших мощностях.

Следует отметить, что в последнее время начинают обращать на себя внимание обмотки, представляющие комбинацию волновых и петлеобразных систем, так называемые обмотки лягушечного типа. Обмотки эти имеют число ветвей, равное числу полюсов. Они довольно хорошо выравнивают нагрузку отдельных щеток и не требуют эквипотенциальных соединений (Л. 60).

При петлевых обмотках тяговых двигателей постоянного тока иногда прибегают к укорочению обмоточного шага. Нужно считать, что умеренное укорочение шага в них рационально, так как оно улучшает коммутирование и понижает эффект реакции якоря. Укорочение производится в пределах одной впадины. В существующих обмот-

НБ ЗНТУ (ДІТ)

ках тяговых двигателей очень часто встречаются мертвые стержни. Опыт показывает, что они существенного ухудшения на работу машины не оказывают, а между тем с помощью их удается очень часто значительно улучшить основные формы двигателя.

В отношении числа витков, приходящихся на каждую секцию обмотки, замечается тенденция при мощностях выше 75—100 kW не брать больше одного витка. При двигателях меньших мощностей встречаются числа витков от 2 до 4 на каждую секцию.

Зубцов на якоре желательно иметь по условиям экономики как можно меньше. Для трамвайных двигателей теперь чаще всего берут от 35 до 40 зубцов, а в Америке доходят даже до 25. При таких условиях очень часто не удается выдерживать, вообще говоря, желательную норму — иметь не меньше трех впадин между краями полюсных наконечников.

Для выяснения толщины якорной изоляции от корпуса приведены на рис. 44 кривые применительно к средним европейским данным. Кривая I дает общую толщину изолирующего слоя для различных напряжений по отношению к корпусу, а кривая II при тех же условиях дает толщину миканитовой опрессовки. Нужно иметь в виду, что при применении вместо опрессовки особо высокосортной микаленты толщину изоляции удается несколько снижать (рис. 18) против приведенной. Наиболее часто применяющиеся типы изоляции для тяговых двигателей приведены в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5.

Изоляционные материалы для тяговых двигателей.

Тип изоляции	Толщина в mm	Число рядов изоляции
Хлопчатобумажная обмотка	0,15—0,25	1,0—2,0
Хлопчатобумажная лента	0,15—0,20	1,5—2,5
Английское полотно или эксцельсиор	0,20—0,25	1,5 – 2,5
Миканитовая лента	0,07—0,14	1,5—7,5
Латероид	0,10—1,60	1,0—2,0
Прессшпан	0,10—2,50	1,0—2,0
Азбестовая ткань	0,10—0,20	1,0—1,5
Азбестовая бумага	0,20—1,50	1
Азбестовая лента	0,35 – 0,50	1,0—1,5
Миканит	0,30—4,00	1
Слюда	0,02—2,00	1

При выполнении обмоток тяговых двигателей, работающих в очень тяжелых условиях в отношении влаги, следует применять самые тщательные методы пропитки и просушки изоляции. Порядок выполнения изоляции обмоток по большей части принимают такой. После изготовления на шаблоне отдельные секции тщательно просушиваются в особых электрических печах, затем пропитываются и опять просушиваются. После этого отдельные секции собираются в катушки, с которыми производится такая же операция, как и с отдельными секциями. После сборки якоря с ним проделывается то же самое. Сушку следует вести под вакуумом. Температура в печах поддерживается около 90—120° С.

Катушки магнитов часто компаундируются. Главная цель, преследуемая компаундированием, заключается в устранении внутри катушек всякого рода прослоек и пор, находясь в которых влажный воздух может способствовать пробою. Процесс компаундирования производится под вакуумом с помещением катушки в кипящий раствор, по большей части составленный из 90% асфальта и 10% трансформаторного масла. Компаундирование, главным образом, применимо для неподвижных обмоток машин. Для якорей и роторов этот способ изоляции применяется в очень редких случаях, так как при вращении под действием центробежной силы компаундная масса нередко выдавливается из пор. Пропитку рационально производить после пайки, так как при производстве таковых всегда может получиться внутри обмоток новое выделение воздушных пузырьков, опасных в отношении пробоя. Особенно тщательно приходится относиться к изготовлению изоляции в двигателях высокого напряжения, примером которых может служить двигатель ДПЭ-340, приведенный на рис. 13 и 14.

Опыт лучших заводов показывает, что двигатели постоянного тока, работающие в тяжелых условиях тяги, могут быть надежны в работе только тогда, когда изоляция их выполнена из наиболее высокосортных материалов. Очень интересна конструкция и изоляция якорных обмоток американского высоковольтного двигателя GEC-1730 и близкого по типу к нему двигателя ДПЭ-340. Якорные катушки у них состоят из шести секций, причем каждый активный проводник для большей эластичности подразделен на два отдельных стержня, идущих параллельно, так что во впадине получается всего двадцать четыре стержня. Особенно следует отметить, что для уменьшения потерь в меди на токи Фуко каждый стержень, выпрессовываемый из медной ленты, имеет по высоте два выреза, в которые вставляются тончайшие

НТБ УИИНТ (ДІІТ)

слои слюды или микаленты. Для тех же целей каждый стержень в середине впадины перекручивается, причем нижняя грань его переходит в верхнюю и обратно.

Каждые два параллельно идущие стержня после предварительной общей прессовки прежде всего изолируются миканитовой лентой в один обхват с перекрышкой. Шесть таких секций соединяются в катушку, причем на всех перегибах катушка схватывается миканитовой лентой. После этого катушку нагревают и подвергают прессовке для придания ей надлежащей формы и размеров. Вслед за этим прямолинейную часть катушки, находящуюся во впадине, обматывают в восемь слоев миканитовой лентой, после чего катушку снова подвергают прессовке. Затем на сгибах катушку обматывают снова миканитовой лентой в четыре слоя. Наконец, всю катушку охватывают азбестовой лентой, причем поверх верхней катушки предварительно прокладывают полоску миканита для защиты от бандажа. После окончательной сборки якорь дважды просушивают и дважды пропитывают лаком.

Главные полюса двигателя сделаны из ленты, намотанной на широкое ребро. Между отдельными слоями меди прокладывается азбестовая лента. После запайки кабелей в патроны заполняются особой замазкой пустоты, имеющиеся в катушке. Вслед за этим катушка обматывается в один слой без перекрышки азбестовой лентой и в один оборот с перекрышкой особо прочной хлопчатобумажной стягивающей лентой. После этого катушка компаундируется в вакуум-печи при температуре в 140—150°С. По выходе из печи катушка обматывается в четыре слоя миканитовой лентой и, наконец, одним слоем стягивающей хлопчатобумажной ленты. Дальше катушка одновременно с нагревом пропитывается дважды в лаке, после чего обматывается еще раз в один слой полотном и окончательно пропитывается в лаке при температуре около 100° С.

Также тщательно изготовляются и катушки добавочных полюсов. Их мотают на узкое ребро, что требует особой тщательности в изготовлении. При выполнении катушек медь приходится отжигать и подвергать неоднократной прессовке. Между голыми слоями меди прокладывается азбестовая лента. Очень тщательно должны быть изолированы выводные патроны и заполнены все пустоты в катушках. Каждая катушка сначала обматывается азбестовой лентой и стяжной лентой по одному обороту. После этого катушка пропитывается лаком с последующей обмоткой миканитовой лентой в шесть оборотов и обмоткой полотном в один оборот с перекрышкой. Операция заканчивастся новой пропиткой в лаке при температуре около 100° С.

Очень тщательно в рассматриваемых типах двигателей штампуется, лакируется и собирается железо якоря. Втулка якоря не насаживается на шпонку, а просто напрессовывается на вал. Нажимная шайба со стороны, противоположной коллектору, отливается заодно со втулкой. Шайба со стороны коллектора насаживается на эту же втулку якоря и схватывается с последней не помощью обычных шпонок, а помощью прессовой посадки.

Вообще техника производства тяговых двигателей в настоящее время поставлена на большую высоту. Из последних достижений в этом отношении следует обратить внимание на применение азбестонитовой изоляции. Она состоит из азбеста, наносимого в виде слоя на медь. При протяжке медного провода размельченный азбест плотно схватывается с медью, в результате чего провод получается окруженным прочным азбестовым слоем. При таких условиях обмотка получается особенно стойкой в отношении нагрева. Подобная изоляция в Америке получает теперь большое распространение.

Нужно отметить попытки применения немагнитных материалов для бандажей, имеющие целью понизить магнитные в них потери. В состав таких материалов включают хром, никель, углерод и ряд других присадок. Однако, к применению немагнитных материалов для бандажей следует пока относиться осторожно, так как при них может получиться недостаточная прочность бандажа.

Особое внимание при производстве изоляции нужно уделить пропиточным материалам или лакам. В их состав, как общее правило, входят вещество, дающее основную изоляционную пленку (масло, смола, асфальт), и растворитель (спирт, бензин). Кроме того, сюда же прибавляются вещества, ускоряющие или замедляющие сушку, а также и вещества красящие. Хорошие лаки должны обязательно обладать высокой электрической прочностью, сколь возможно малой гигроскопичностью, отсутствием кислот и щелочей, нечувствительностью к влаге и минеральным маслам, достаточной теплопроводностью, а также по возможности высокой эластичностью и гибкостью.

В настоящее время наиболее часто применяются черные японские лаки. Хорошие результаты дают лаки эмалевые и бакелитовые. Осторожно нужно относиться

НТБ УГАНТ (ДІІТ)

ТАБЛИЦА 6.

Основные данные построенных тяговых двигателей постоянного тока

№№	Название элементов	Завод Вестингауза W—241	Завод Сименс — Шуккерт Д—56	Завод Вс. К° Эл. АВ—52	Завод Электросила ПТ—30	Завод им Кирова ДМ—1а	Завод AEG US—521	Завод Dickert'a	Завод BBC	Завод Электросила ПТ—100	Южных франц. ж. д. ДК—80	Дор. Ch. M. St. P. R. Завод GEC	Завод им. Кирова ДП—150	Завод GEC—1730
1	Часовая мощность в kW	33,3	33,5	35,6	31	50	52,5	167,5	198	113	277	354	165	340
2	Ток часовой мощности	70	70	75	62	100	105	150	215	250	200	254	235	250
3	Напряжение на коллекторе	550	550	550	550	550	550	1 200	1 000	500	1 500	1 500	750	1 500
4	Число оборотов при часовом режиме	550	575	580	610	650	620	500	520	570	545	446	840	605
5	Диаметр якоря в mm	368	340	364	310	360	370	560	550	450	610	725	420	635
6	Длина железа якоря в mm	215,5	190	252	240	275	220	364	420	350	292	305	340	305
7	Постоянная C	56	38,2	55,4	45,4	44,6	35,6	34	33,4	31,4	21,4	21,6	33,6	34,6
8	Полюсное деление τ	289	268,5	286	243	282,5	290,5	440	432	354	480	590	330	498
9	Полюсная дуга b_l	216	180	208	146	186	182	297	260	260	328	440	216	346
10	Отношение $a_l = \frac{b_l}{\tau}$	0,747	0,67	0,73	0,6	0,65	0,627	0,675	0,6	0,735	0,685	0,745	0,66	0,695
11	Число полюсов $2p$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
12	Число параллельных ветвей $2a$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
13	Число впадин Z	41	41	37	35	39	35	59	51	41	55	49	41	57
14	Число стержней N	2×656	984	592	840	624	700	706	510	328	770	686	410	684
15	Число проводов во впадине U_n	32	24	16	24	16	20	12	10	8	14	14	10	12
16	Число коллекторных пластин K	163	163	147	139	155	175	353	255	163	385	343	205	341
17	Диаметр коллектора в mm	257	280	254	270	330	350	508	490	400	508	650	380	546
18	Коэфиц. заполнения впадины	0,307	0,405	0,355	0,427	0,426	0,357	0,329	0,36	0,45	0,398	0,39	0,415	0,357
19	Длина полувитка якоря в cm	57	57	57	53	64,7	54	98	100	80	90,5	105	72,5	92,7
20	Высота впадины в mm	30	39	37	35	43	46,8	48,2	39	38	57	58	38	57,9
21	Ширина впадины в mm	13,8	11,2	12,2	10,1	11,2	24,2	12,7	12,8	14	15,24	19,7	14	14,55
22	Междужелезное пространство в mm	3,5	3,5	4	2	3	3	6,3	—	6	4,7	6	3,75	6
23	Полные потери в W	3 714	4 044	3 702	4 016	5 025	5 800	18 015	16 453	9 290	22 640	26 980	11 240	25 690
24	Коэфиц. полезного действия без передачи	90,3	89,5	91	88	90,9	90	90	92,1	93,5	93,5	93,4	93,5	93,15
25	Тип охлаждения	Закр.	Закр.	Закр.	Вент. Сам.	Вент. Сам.	Вент. Сам.	Вент. Сам.	Вент. Сам.	Вент. Сам.	Вент. Незав.	Вент. Незав.	Вент. Сам.	Вент. Незав.

к асфальтовым лакам, пригодным, главным образом, для внешних покровов. Особенно нужно избегать применения для лаков в качестве растворителя денатурированного спирта.

Очень важное значение при производстве тяговых двигателей имеет хорошая пайка. Коллектор нормально паяется или чистым английским оловом, или сплавом,

НБ УДУНТ (ДІІТ)

содержащим около 65% олова и 35% свинца. Температура пайки получается порядка 190° С. Применение кислот и щелочей при пайке не допускается.

Как уже было указано выше, для улучшения процесса коммутации современные тяговые двигатели снабжаются добавочными полюсами. Количество последних нормально берется равным числу главных полюсов, хотя при последовательных обмотках можно брать их и меньше. Опыт применения двух добавочных полюсов при четырех главных особенно хорошего результата не дал. Теперь в Америке фирмой Вестингауза производятся опыты с применением трех добавочных полюсов при четырех главных. Такая система имеет преимущество в том отношении, что добавочный полюс устраняется в наиболее трудном для его помещения месте, где ось вагона врезается в кожух двигателя. Эффект же действия трехполюсной системы по улучшению коммутации является промежуточным между эффектами двух- и четырехполюсной систем.

С точки зрения экономики медь, затрачиваемая на добавочные полюса, вполне себя окупает. Несколько иначе обстоит дело с компенсационными обмотками. Практика показывает, что для нормальных двигателей эти обмотки не нашли себе применения. Они требуют значительного увеличения количества меди, осложняют конструкцию машины, понижают ее к. п. д. и ухудшают процесс охлаждения; между тем как и без них добавочные полюса справляются с коммутированием тока. К тому же, предотвращая вообще круговой огонь, при неустановившемся режиме они могут осложнить работу в другом направлении — способствовать увеличению бросковых токов из-за понижения ими сопротивления цепи благодаря компенсации самоиндукции якоря. Образец обмотки компенсации можно видеть на рис. 27.

Для ознакомления с основными параметрами существующих типов двигателей приведена табл. 6. Для иллюстрации средних расчетных данных современных вентилируемых двигателей дается табл. 7.

ТАБЛИЦА 7.

Основные расчетные параметры тяговых двигателей постоянного тока

№№	Название элементов	Значения	Примечание
1	Плотность тока в якоре $S_я$ в A/mm² . . .	4,5—5,5	Иногда до 6—7
2	Плотность тока в обмотке главных полюсов $S_в$ в A/mm²	2,3—2,8	3—3,3
3	Плотность тока в обмотках добавочных полюсов $S_д$ в A/mm² .	2,4—2,8	„ „ 3—3,5
4	Значения AS	270—420	Для опорнорамных до 400—520
5	Произведение $AS \times S_я$.	1 500—2 000	То же до 2 500 — 3 000
6	Объем тока в каждой впадине для мощностей до 50 kW	700—850	
7	То же для мощностей выше 50 kW .	900 — 1 600	
8	Плотность тока под щеткой в A/cm²	6—10	
9	Давление на щетку в kg/cm² . . .	0,25 — 0,3	
10	Коэфициент заполнения впадин .	0,35 — 0,45	
11	Значение α_i . .	0,62—0,7	
12	Междужелезное пространство при обычных подшипниках в mm . . .	3—6,5	Для добавочных полюсов иногда берут на 3—6 mm выше, чем для главных, создавая с помощью немагнитных прокладок между полюсами и ярмом второе междужелезное пространство
13	При роликах	2 — 6,5	
14	Индукция в воздухе B_e .	7 900—10 000	
15	То же в якоре $B_я$.	12 000—14 800	
16	То же в зубцах $B_{zi\ max}$	21 000—23 000	
17	То же в индукторах B_m .	13 900—15 000	
18	То же в ярме B_i . .	13 600—15 000	При хорошей стали до 17 500
19	Коэфициент рассеяния главных полюсов .	1,16—1,25	
20	То же добавочных . .	2—2,2	

НБ УДУНТ (ДІІТ)

5. Весовые характеристики тяговых двигателей.

Весовые соотношения для тяговых двигателей имеют особенно большое значение. Помимо того, что более тяжелый двигатель является по большей части и более дорогим, лишний вес двигателя увеличивает часто мертвый вес поезда и, как следствие этого, расход энергии на движение. Это делает понятным стремление конструктора получить как можно более легкую машину.

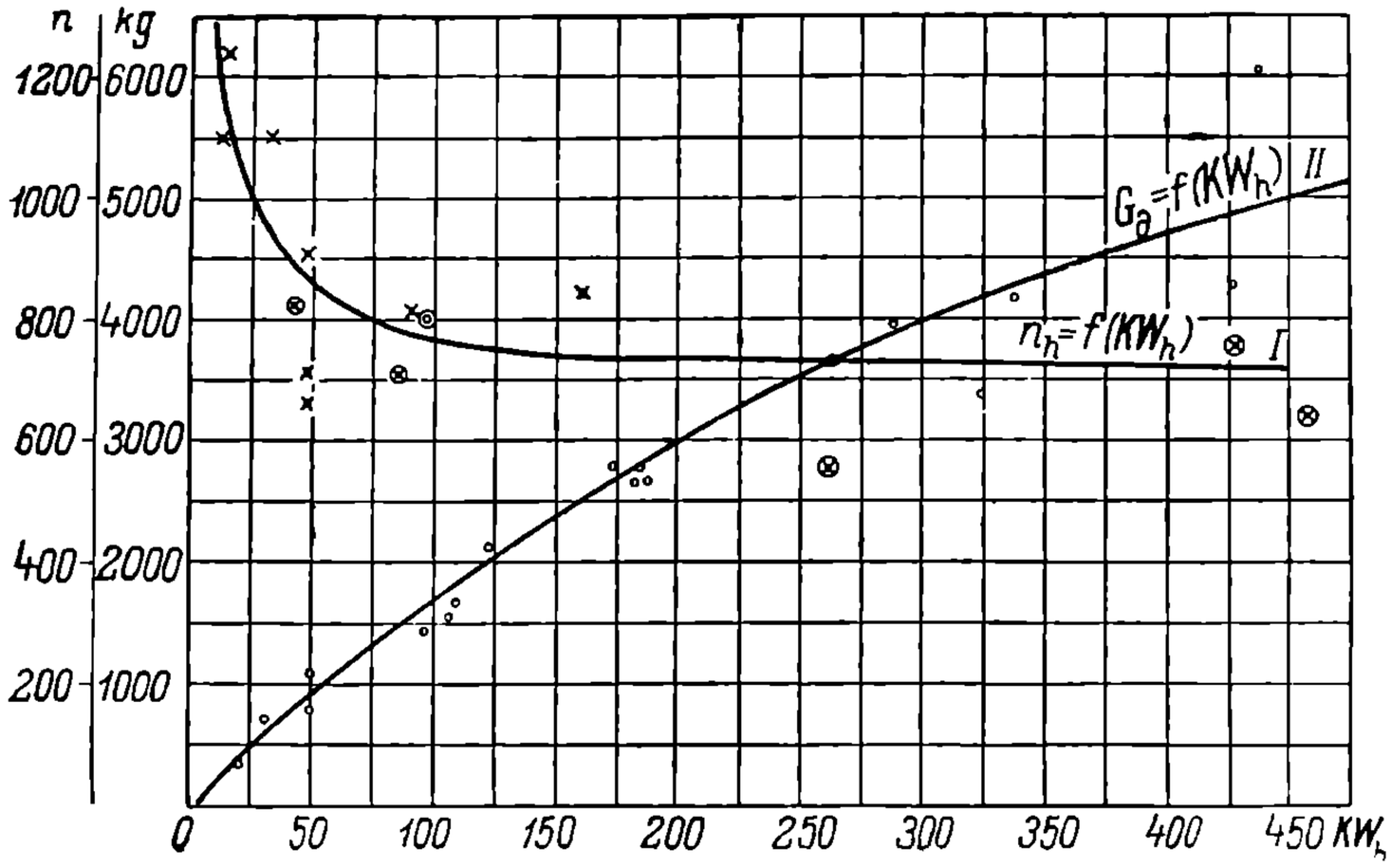


Рис. 45. Веса тяговых двигателей без передачи и числа оборотов при часовом режиме в зависимости от мощностей.

Весовые характеристики двигателей строят в зависимости от различных величин. На рис. 45 построена такая характеристика для современных двигателей в функции от их мощности. Рис. 46 дает зависимость веса двигателей в функции от вращающего их момента. С точки зрения выяснения рационализации производства последний тип кривых имеет преимущество перед предыдущим, так как при нем устраняется влияние элемента быстроходности машины, что дает возможность характеризовать, насколько правильно распорядился конструктор с использованием материала, определяемого выбором индукций и плотностей тока, с использованием впадины, а также и с таким важным соотношением, как D^2l.

Еще лучшую характеристику использования материала дает зависимость веса $G_д$ в функции от $M^{3/4}$. Происхождение этой кривой объясняется следующими соображениями. Момент двигателя пропорционален току и потоку, а следовательно, плотности тока в меди и индукции в воздухе, которые в свою очередь пропорциональны квадратам линейных измерений машины. Отсюда момент электрической машины растет пропорционально линейной ее размерности в четвертой степени. С другой стороны, вес машин пропорционален линейной размерности в кубе. В результате $G_д$ пропорционален $M^{3/4}$, и зависимость $G_д = f(M^{3/4})$ должна выражаться приблизительно прямой линией. На рис. 47 приведены веса тяговых двигателей средней мощности в зависимости от $M^{3/4}$. Отношение $\frac{G_д}{M^3}$ представляет собою близко постоянную величину, часто называемую весовым коэфициентом. Для двигателей малых мощностей он получается порядка 45, для средних 40 и для больших 35.

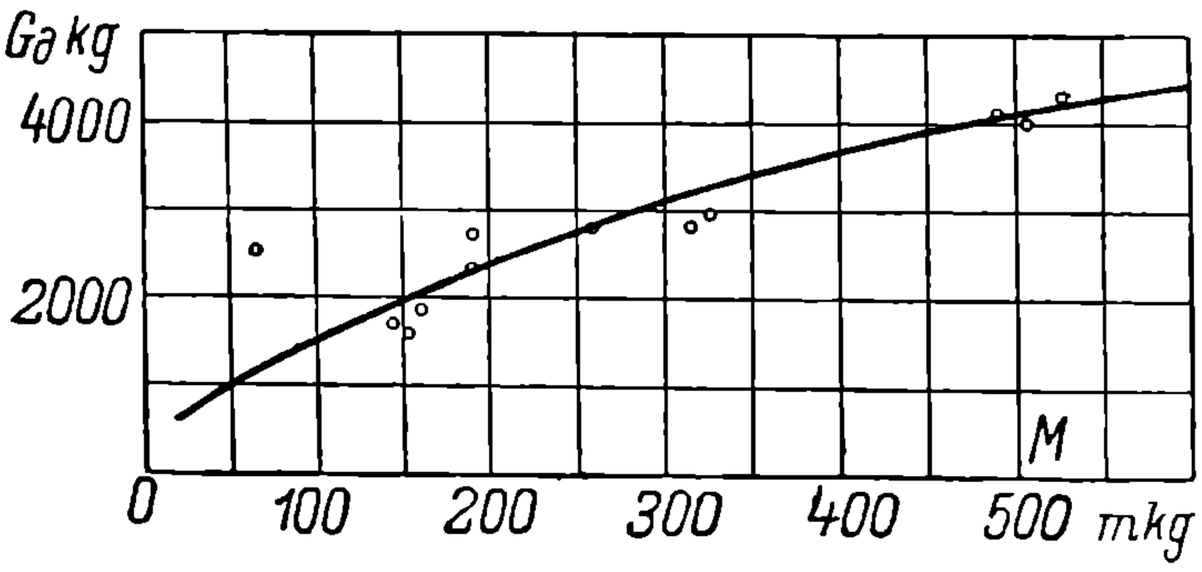


Рис. 46. Кривые веса тяговых двигателей в зависимости от момента их вращения.

Для характеристики существующих типов двигателей постоянного тока приведена табл. 8. В ней даны основные конструктивные параметры американских двигателей завода GEC.

В отношении градации мощностей тяговых двигателей постоянного тока пока определенных стандартов не имеется. Но вообще нормировка мощностей желательна, особенно в отношении трамвайных двигателей. Табл. 8 дает представление

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

ТАБЛИЦА 8.

Данные об американских тяговых электродвигателях GEC.

№№	Тип двигателей	Часовая мощность на валу в kW	При часовом токе об/мин.	Часовой ток I_h	Длительный ток I_∞			Сопротивление обмоток в Ω	Якорь							Щетки			Катушки главн. полюсов			Катушки доб. пол.			Вес мотора		К. п. д. при I_h	Отношен. I_∞ к I_h	Система вент.
					При 600 V	При 450 V	При 300 V		N	K	Числа пров. во впад./витк. в секц.	Z	Размеры проводов в mm²	Вес меди в kg	Вес всего як. в kg	Число отд. щеток	Рекомендуемое давление в kg/cm²	Размеры в mm²	Число витков	Размеры проводов в mm²	Вес всех катушек в kg	Число витков	Размеры проводов в mm²	Вес всех кат. в kg	Без перед. в kg	С перед. в kg			
1	258C	19,2	1236	37	35,2	34,9	32,4	1,217	1000	125	10/4	25	1,27×2,64	12,7	84	2	0,37—0,4	14×47,6	128,5	2,79×4,82	32,5	84,5	5,28×2,34	15,5	340	405	86,5	0,95	C.
2	265A	26,9	1125	51,5	40,5	39	36,5	0,78	–	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	535	640	87,5	0,79	„
3	247A	31,7	715	60	36,6	35,8	34,4	0,67	810	135	10,3	27	№ 13	22,7	182	4	0,28—0,31	12,7×31,8	88,5	5,58×3,68	52,7	73,5	2,92×5,96	29,1	685	790	88,2	0,677	„
4	203L	38,5	630	72	—	—		—	834	139	8/3	35	№ 11	31,8	250	4	0,31 – 0,33	12,7×35	102	36,5×0,72	91	64	34,3×0,81	40	1000	1200	89,2	—	„
5	203P	38,5	760	72	46	44,8	42	0,588	840	105	6/4	35	№ 11	38,7	214	2	0,28 – 0,3	14,3×70	93,5	25,4×1,09	69	64	35×0,81	32,8	850	1030	89,2	0,64	„
6	201G	50	710	92,5	44,1	45,3	45,6	0,487	702	117	6/3	39	2,54×4,26	35,5	273	4	0,33—0,36	14,3×28,6	76	26,2×1,45	87	54	47,6×1,07	42	1075	1290	90	0,48	„
7	263A	50	725	92,5	70,5	68	63,5	0,49	–	115	8/3	29	№ 8	30,5	314	4	0,21—0,23	14,3×44,6	76,5	36,5×0,89	73	54,5	32,5×1,015	39	875	1110	90	0,76	„
8	210E	53,8	537	99	—	—	—	0,502	750	125	10/3	25	№ 7	50	357	4	0,21 – 0,24	12,7×41,3	63	—	83,5	58	44,4×0,76	55,5	1170	1410	90,5	—	3.
9	205E	84,5	625	153	—	—	—	0,255	492	123	6/2	41	3 № 10	52,3	455	4	0,18 – 0,19	15,9×57	40	25,4×1,9	82	40	50,8×1,01	58	1520	1780	91,8	—	„
10	240A	84,5	662	153	83,5	81	77,6	0,30	580	145	10/2	29	2 № 9	63,5	—	4	0,16—0,18	15,9×57	48,5	27×1,78	78	42,5	42,8×1,09	47,5	1440	1710	91,8	0,546	C.
11	259A	92,3	842	167	109,5	107	103	0,201	516	129	6/2	43	7,62×2,16	54,5	455	6	0,12—0,13	15,9×44,4	53	28,2×1,78	84,5	36,5	2,38×2,16	41	1545	1820	92	0,655	„
12	254A	108	740	194	128,2	125	118,2	0,145	468	117	6/2	39	3,17×7,62	75,5	535	6	0,37—0,4	15,9×46	55	31,8×2,28	110	37,5	27×2,67	59	1750	2050	92,6	0,662	
13	248A	123	659	220	143	138,5	132	0,143	462	231	14/1	33	1,65×15,25	—	710	6	0,31 – 0,34	17,5×54	45	27×2,79	80	35,5	33,3×3,17	80	2300	2600	93	0,63	

НБ УДУНТ (ДІІТ)

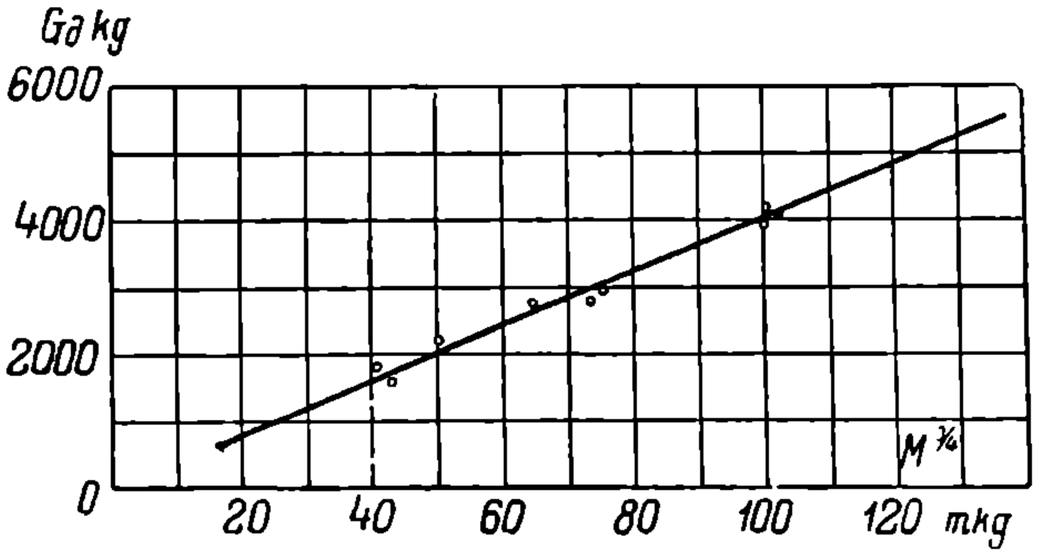


Рис. 47. Кривые веса тяговых двигателей в зависимости от $M^{3/4}$.

о мощностях, применяемых в американской практике. Европейские фирмы в своем каталоге имеют обычно меньше типов, чем американские.

Здесь полезно отметить предложение известного немецкого специалиста-инженера Wichert'a, рекомендовавшего строить ряд мощностей двигателей путем введения для каждого нового типа множителя $\sqrt[3]{2}$. На основании этого построена табл. 9, принятая фирмой BBC.

ТАБЛИЦА 9.

Тип оборудования	Мощность каждого двигателя в kW						
Для вагонов с двумя двигателями.....	31,5	39,5	50	63	79	100	126
Для вагонов с четырьмя двигателями.....	—	—	—	31,5	39,5	50	63

Данная таблица показывает, что при таком методе одна и та же серия двигателей удовлетворяет оборудованию с двумя и четырьмя двигателями.

II. КОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ОДНОФАЗНОГО ТОКА.

1. Основные принципы работы однофазных коллекторных двигателей.

Для получения вращающего момента от электрической машины необходим пространственный сдвиг между магнитодвижущими силами ее ротора и статора. Наиболее выгодное условие образования момента получается при угле сдвига, равном 90°. На рис. 48 слева приведена схема, при которой машина не может иметь вращающего момента, а в центре — схема, при которой таковой может быть получен в наиболее выгодных условиях, если, конечно, имеющийся здесь сдвиг м. д. с. будет непрерывно поддерживаться.

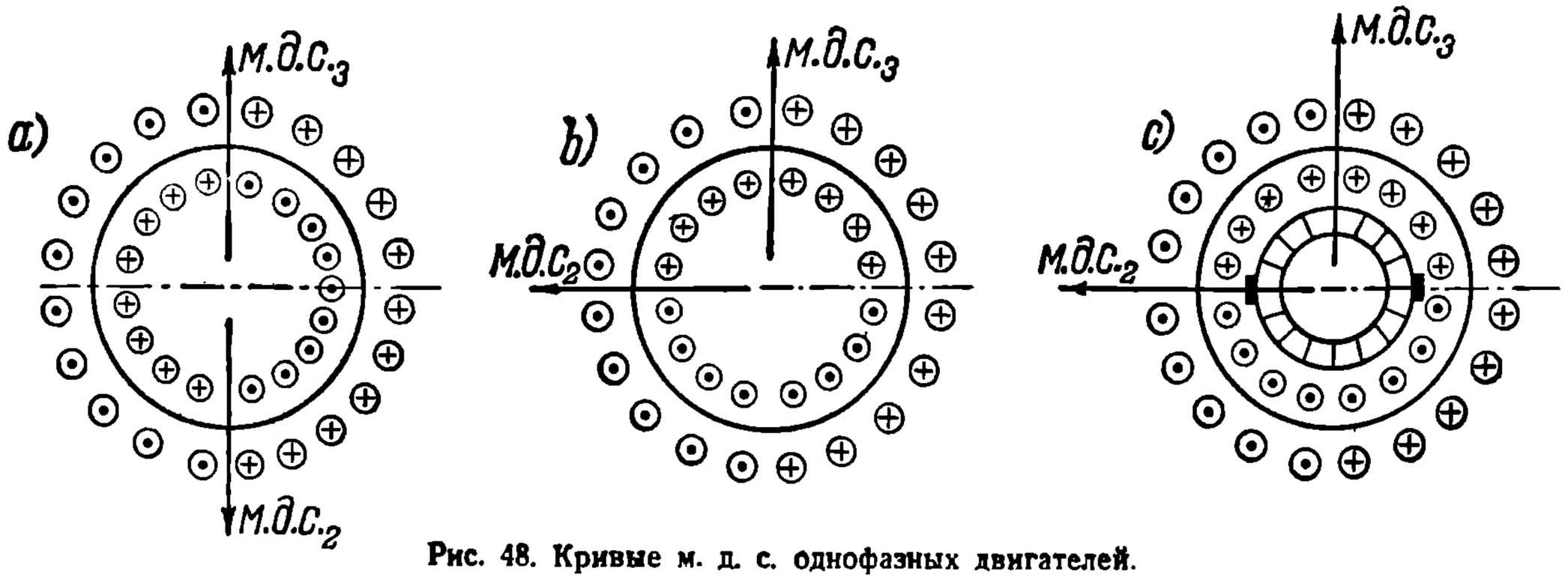


Рис. 48. Кривые м. д. с. однофазных двигателей.

Если обратиться к машинам постоянного тока, то у них пространственно постоянный сдвиг м. д. с. образуется благодаря применению щеток и коллектора (рис. 48c). При расположении щеток по нейтрали получается картина, соответствующая схеме в центре. Этот же самый метод получения нужного сдвига м. д. с. применен и в однофазных коллекторных машинах. Благодаря щеткам и коллектору однофазная машина, подчиняющаяся в общем случае схеме рис. 48-а и не имеющая начального вра-

НТБ УПИ УНТ (ДІТ)

щающего момента, обращается в машину, отвечающую всем основным требованиям, предъявляемым к ней тягой.

Нетрудно видеть, что магнитодвижущая сила ротора м. д. с.$_2$ действует по линии щеток и при передвижении их следует за ней. Если щетки с нейтрали сдвинуть на линию м. д. с.$_3$, вращающий момент будет равен нулю. В положениях щеток между линиями м. д. с.$_3$ и нейтралью вращающие моменты будут иметь промежуточные значения, достигая при условии неизменности тока наибольшого значения в положении нейтрали.

Второе важное свойство щеток и коллектора — в том, что с помощью их удается получать от ротора э. д. с., соответствующие частотам статорной обмотки. Из теории образования э. д. с. при вращении витка или обмотки без коллектора в пульсирующем поле известно, что в роторе тогда получаются э. д. с. переменной частоты. При таких условиях создавать непосредственную связь между ротором и статором не представляется возможным, так как взаимодействие э. д. с. разных частот практически недопустимо.

Использование щеток и коллектора радикально меняет дело. Действие пульсирующего однофазного потока на вращающийся в нем виток удобней всего изучать, раскладывая этот поток, стоящий неподвижно в пространстве, на две составляющие, вращающиеся в прямо противоположных направлениях с одними и теми же частотами, равными первичной и при амплитудах равными половине амплитуды основного пульсирующего поля. Сущность эффекта от такого разложения не изменится, так как в каждый данный момент сложение двух потоков, вращающихся с равными скоростями в прямо противоположные стороны, будет приводить к потоку, стоящему неподвижно в пространстве. При вращении виток будет перерезываться обоими составляющими полями. Если обозначить число оборотов полей через n_1 и ротора через n, то число перерезываний витка полем, вращающимся в одну сторону с ротором, будет пропорционально $n_1 - n$, а число его перерезываний вторым полем будет пропорционально $n_1 + n$. В результате виток будет получать две э. д. с. с частотами, пропорциональными величинам $n_1 - n$ и $n_1 + n$.

Если теперь отдельные витки и всю обмотку снабдить коллектором, то по периферии коллектора будут перемещаться две потенциальные кривые, из коих первая по отношению к любой пластине коллектора будет двигаться со скоростью $n_1 - n$, а вторая — со скоростью $n_1 + n$. Если бы щетки перемещались вместе с коллектором и были связаны с одним и тем же местом коллектора, то напряжение, измеряемое на них, было бы также подчинено закону двух частот, пропорциональных

$$n_1 - n \text{ и } n_1 + n.$$

Иная картина получается, если щетки, как это для них нормально, стоят неподвижно. При таких условиях абсолютная скорость передвижения потенциальных кривых по отношению к щеткам будет равняться сумме или разности скоростей перемещения потенциальной кривой по коллектору и скорости движения самого коллектора. Последний будет в абсолютном движении ускорять волну кривой, вращающейся в одну сторону с коллектором, на n, а волну, движущуюся против вращения коллектора, он будет замедлять на ту же величину. В результате абсолютная скорость вращения потенциальных кривых в ту и другую сторону будет равна n_1, а следовательно, в результате будет создаваться фактически одна стоящая неподвижно в пространстве потенциальная кривая, пульсирующая с частотой питающего тока. При таких условиях напряжение сети и напряжение на щетках будут иметь одинаковые частоты и могут как угодно сопрягаться друг с другом.

При изучении принципов действия коллекторных машин приходится иметь дело с двумя основными э. д. с. Первая э. д. с. пульсации вызывается изменением потока во времени и подчиняется общим правилам отставания во времени от потока, ее образующего, на 90°. Этот тип э. д. с. может проявляться или в виде э. д. с. самоиндукции, возникая в тех же обмотках, которые создают поток, или в виде э. д. с. трансформации, возникая в обмотках, подвергающихся действию потоков, производимых другими обмотками.

Второй тип э. д. с. вызывается вращением ротора в магнитном поле. Линия действия этой э. д. с. во времени совпадает с образующим ее потоком. Что же касается вопроса, должна ли она совпадать по направлению с потоком или быть расположенной к нему под углом в 180°, то его приходится решать в каждом конкретном случае отдельно, руководствуясь физической стороной процесса. Так, например, если рассматриваемая

НБ УДУНТ (ДІІТ)

э. д. с. проявляется в виде противоэлектродвижущей силы двигателя, то ее следует ориентировать по отношению к потоку таким образом, чтобы по направлению она противодействовала приложенному напряжению, направление вектора которого обычно устанавливается в первую очередь.

Выражение э. д. с. пульсации согласно теории переменных токов будет в дальнейшем изображаться в виде:

$$E_п = \sqrt{2}\pi\nu\, f W \Phi_{max} 10^{-8} \tag{11}$$

Э. д. с. вращения будет браться в форме:

$$E_в = \sqrt{2}\pi\nu_в f W \Phi_{max} 10^{-8}. \tag{12}$$

В обеих формулах: ν и $\nu_в$ — частота первичного тока и частота вращения ротора,

f — коэфициент обмотки,
W — число витков обмотки,
Φ_{max} — наибольшее значение магнитного потока.

Кроме этих э. д. с., как и вообще в машинах переменного тока, приходится иметь дело с э. д. с. активного и реактивного падений напряжения, которые в дальнейшем будут обозначены через Ir и Ix, где r и x соответственно активное и реактивное сопротивления обмоток. Полное падение напряжения будет браться в форме Iz.

Рассмотрим вращающий момент однофазных коллекторных двигателей. В двигателях постоянного тока и при нормальных системах в многофазных асинхронных машинах вращающий момент во времени остается неизменным. В коллекторных же двигателях картина получается иная, что можно видеть из нижеследующих соображений.

Тангенциальная сила K, действующая на проводник с током i, находящимся в поле с индукцией B, равна при длине проводника l_i:

$$K = iBl_i 10^{-1} \text{ дин.}$$

В случае синусоидального однофазного тока, считая рассматриваемый проводник одним из проводников роторной обмотки и беря общий случай сдвига тока и потока по фазе на угол φ, можно предыдущее выражение переписать в виде:

$$K = \frac{I_{max} \sin(\omega t + \varphi)\, B_{max} \sin \omega t\, l_i}{10 \times 2a},$$

где $2a$ соответствует числу ветвей роторной обмотки двигателя. То же самое выражение при замене I_{max} действующим значением тока и при переводе дин в kg принимает вид:

$$K = \frac{\sqrt{2} I B_{max} \sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t\, l_i}{9{,}81 \times 10^6 \times 2a} \text{ kg}.$$

При учете эффекта всех проводников ротора N:

$$K = \frac{\sqrt{2} I B_{max} N l_i \alpha \sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t}{9{,}81 \times 10^6 \times 2a},$$

где α учитывает переход от наибольшего пространственного периферийного значения индукции, к ее средней величине.

Вращающий момент при диаметре ротора D_2 в cm:

$$M = \frac{\sqrt{2} I B_{max} N l_i \alpha D_2}{9{,}81 \times 2 \times 10^6 \times 10^2 \times 2a} \sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t \text{ mkg}.$$

В этом выражении заменяем:

$\alpha B_{max} l_i D_2$ через $\frac{2p\Phi_{max}}{\pi}$

и

$\frac{N}{4a}$ через W.

Тогда, произведя тригонометрические выкладки, получим:

$$M = \frac{I \Phi_{max} 2p W}{9{,}81 \times \sqrt{2} \times 10^8 \pi} [\cos \varphi - \cos(2\omega t + \varphi)]. \tag{13}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Графически данное выражение может быть представлено так, как изображено на рис. 49, который показывает, что момент однофазной коллекторной машины пульсирует во времени с двойной частотой около среднего значения:

$$M_{cp} = \frac{I\Phi_{max} 2pW\cos\varphi}{9{,}81 \times \sqrt{2} \times 10^8 \pi} \text{ mkg.} \qquad (14)$$

Рассмотрение изменения M обнаруживает, что значения его при $\varphi \neq 0$ принимают даже отрицательные величины, соответствующие на рис. 49 заштрихованным площадкам.

Пульсирующий характер момента коллекторных двигателей с точки зрения тяги является весьма нежелательным, так как при таких условиях и тяговое усилие подчиняется закону пульсации, что может повлечь за собою целый ряд осложнений. Однако, с практической точки зрения, как будет особо отмечено в последующих главах, явление пульсации оказывается обычно неопасным.

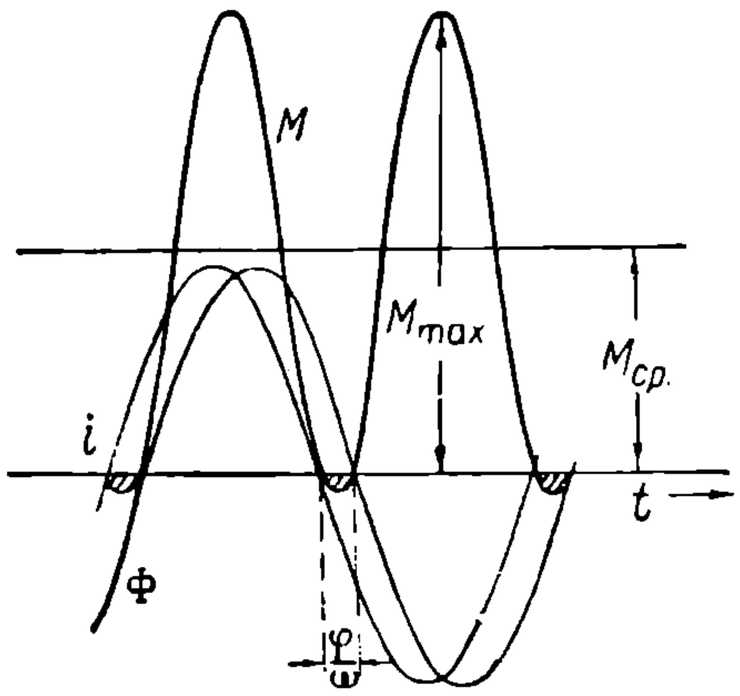


Рис. 49. Кривая вращающего момента однофазных коллекторных двигателей.

В отношении применения для тяги отдельных типов однофазных коллекторных двигателей нужно указать, что здесь находят себе применение только двигатели с последовательной характеристикой. Типы коллекторных двигателей, о которых может итти речь в тяге, следующие: последовательные, репульсионные со статорным возбуждением, репульсионные с роторным возбуждением и двигатели двойного питания.

2. Последовательные коллекторные двигатели.

Схемы соединений последовательных двигателей. Схема соединений обмоток последовательного двигателя приведена на рис. 50. Каждый современный последовательный двигатель содержит обмотку возбуждения F, роторную R и обмотку компенсационную K. Последняя имеет назначением компенсировать реакцию ротора, что улучшает процесс коммутации машины, а также и повышает коэфициент ее мощности, так как путем компенсирования поток ротора понижает общую самоиндукцию системы.

Вместо приведенной схемы иногда принимают систему, приведенную на рис. 51. Здесь компенсационная обмотка является короткозамкнутой. Вместе с обмоткой ротора она дает короткозамкнутую систему трансформатора. По своему эффекту данная схема практически аналогична предыдущей, так как остающийся продольный поток в трансформаторе при короткозамкнутой вторичной его обмотке, в данном случае остающийся поток ротора, практически весьма незначителен. Если пренебречь этим потоком, то схема рис. 51 по своему действию является равнозначущей схеме рис. 50. Некоторым преимуществом схемы рис. 51 является то, что при ней конструктивно легче выполнять компенсационную обмотку, так как при короткозамкнутой ее системе гораздо проще и свободней можно решить вопрос о количестве проводов, их сечении и об их изоляции.

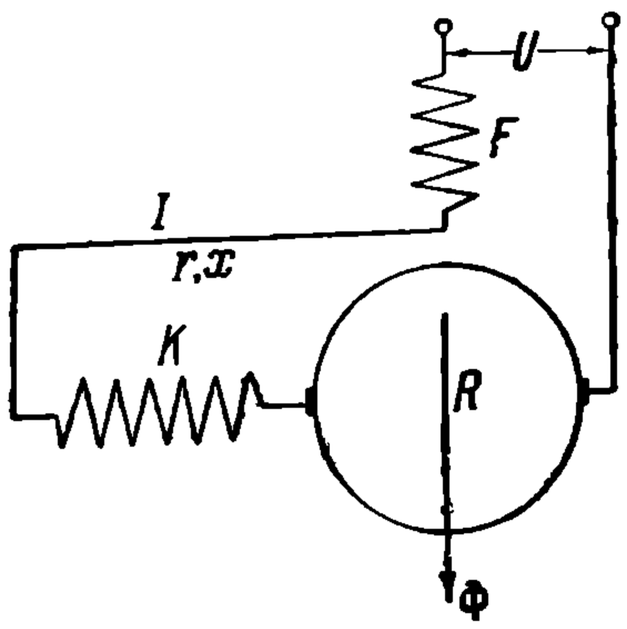


Рис. 50. Схема соединений обмоток однофазного последовательного двигателя.

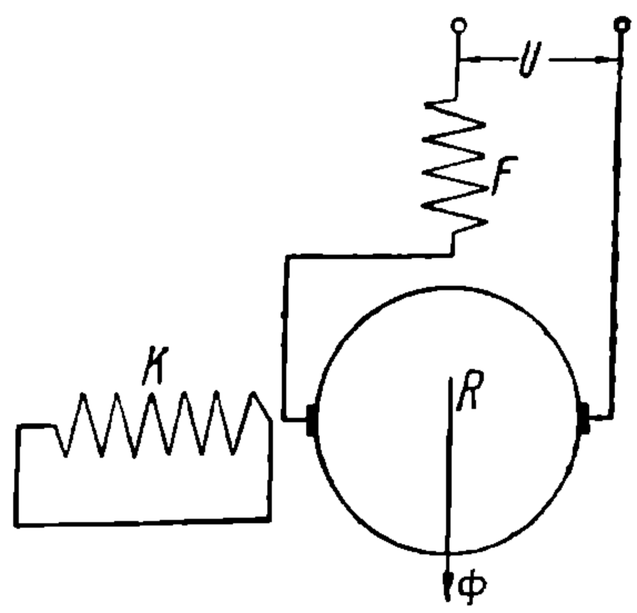


Рис. 51. Схема соединений обмоток однофазного коллекторного двигателя при короткозамкнутой компенсационной обмотке.

Диаграмма напряжений и э. д. с. последовательных двигателей. На рис. 52 построена диаграмма напряжений и э. д. с. последовательных двигателей. На ней в качестве основного вектора отложен ток I. Поток Ф, им образуемый,

НВ УДУНТ (ДІІТ)

принят отстающим от него на гистерезисный угол α. Как видно из диаграммы, при состоянии покоя напряжение $U_к$ компенсирует активное падение напряжения во всех обмотках Ir, реактивное Ix и э. д. с. самоиндукции от основного потока $E_п$ в обмотке возбуждения. При вращении ротора к указанным э. д. с. присоединяется еще новая э. д. с. $E_в$, получаемая от вращения ротора в основном потоке Ф. Роль этой э. д. с. аналогична противоэлектродвижущей силе двигателей постоянного тока, а потому во времени она должна быть отложена по линии потока Ф в направлении, компенсирующем приложенное напряжение. В случае генераторного режима вектор э. д. с. вращения должен быть отложен в противоположном направлении. Точка работы при генераторном режиме на диаграмме показана со значком „г"

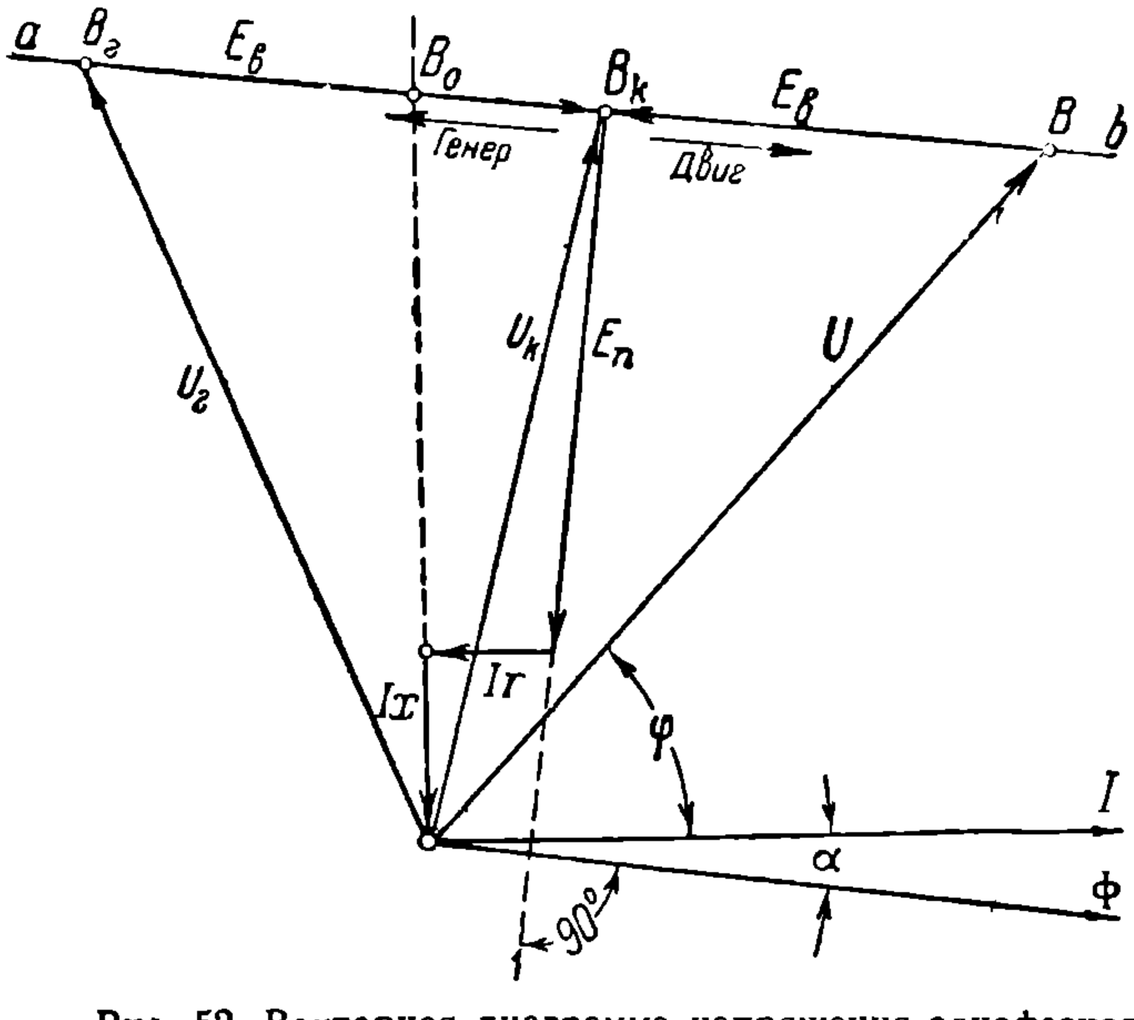


Рис. 52. Векторная диаграмма напряжения однофазного последовательного двигателя.

Как следует из выражения (12), $E_в$ изменяется при $\Phi = \text{const}$ пропорционально скорости вращения. Ввиду этого, если рассматривать процесс работы двигателя при $I = \text{const}$, геометрическим местом концов векторов напряжения должна быть прямая ab, причем отрезки ее в определенном масштабе будут характеризовать скорость вращения машины

Рабочая диаграмма. Рабочая диаграмма должна дать изменение нагрузочного тока при постоянном напряжении. Ее проще всего построить, исходя из диаграммы напряжения. Из теории переменных токов известно, что если для случая, подобного данному, взять диаграмму напряжения при $I = \text{const}$ и подвергнуть ее инверсии, перенеся в соответствующий квадрант координатной плоскости, то в результате получится диаграмма тока при $U = \text{const}$ (рис. 53).

Инверсия диаграммы напряжения, в данном случае — прямой ab, должна дать окружность с диаметром, направленным к вертикали под углом α. Все характерные точки диаграммы напряжения должны занять соответствующие места и на диаграмме тока. Так, например, точка короткого замыкания $B_к$ будет соответствовать $A_к$.

Для измерения скорости согласно общему правилу построения подобных диаграмм можно воспользоваться зеркальным изображением той прямой, которая измеряла скорость в диаграмме напряжения. Прямая $a'b'$, дающая зеркальное изображение ab, должна быть перпендикулярна к диаметру. Положение данной прямой безразлично, но для определения масштаба скоростей, кроме точки нулевой скорости, получаемой пересечением луча тока короткого замыкания, необходимо знать скорость еще для какого-либо режима машины.

Для того чтобы диаграмму тока можно было практически использовать, необходимо уметь на ее основании определять мощности и потери. Для определения их наиболее рационально воспользоваться методикой La Cour'a. Согласно его теории мощности и потери в круговых диаграммах могут измеряться величинами, пропорциональными перпендикулярам, опускаемым из концов векторов токов на соответственно построенные прямые (Л. 56). При построении искомых прямых наиболее просто строится прямая подведенной мощности $P = 0$ (рис. 53). Точно так же легко построить и прямую полезной мощности $P_м = 0$. Для нее являются характерными две точки нулевых значений — точка короткого замыкания $A_к$ и точка O, соответствующая бесконечно большой скорости. Через эти две точки прямая эта и проводится.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Потери машины могут быть приближенно установлены на основании диаграммы (52). Из нее следует, что выражение для подведенной мощности можно написать в виде:

$$P = E_в I \cos\alpha + E_п I \sin\alpha + I^2 r. \qquad (15)$$

В правой части данного выражения первый член дает меру механической мощности. Вторые же два члена можно приближенно считать характеризующими потери в железе и джоулевы потери. Так как $E_п$, пренебрегая насыщением, пропорциональна I, то все рассматриваемые потери можно принять пропорциональными квадрату тока. Отсюда прямая La Cour'a, характеризующая эти потери, должна быть касательной к окружности в точке нулевого значения тока, т. е. в точке O. Эта же самая прямая может явиться отправной и для определения моментов, так как они в последовательных машинах при сделанных допущениях в отношении пренебрежения насыщением также пропорциональны квадратам токов. Для полноты картины на диаграмме нанесено еще построение для определения к. п. д. Способ построения его обычный при кривых диаграммах. Следует еще раз отметить, что механические потери при построении не учтены.

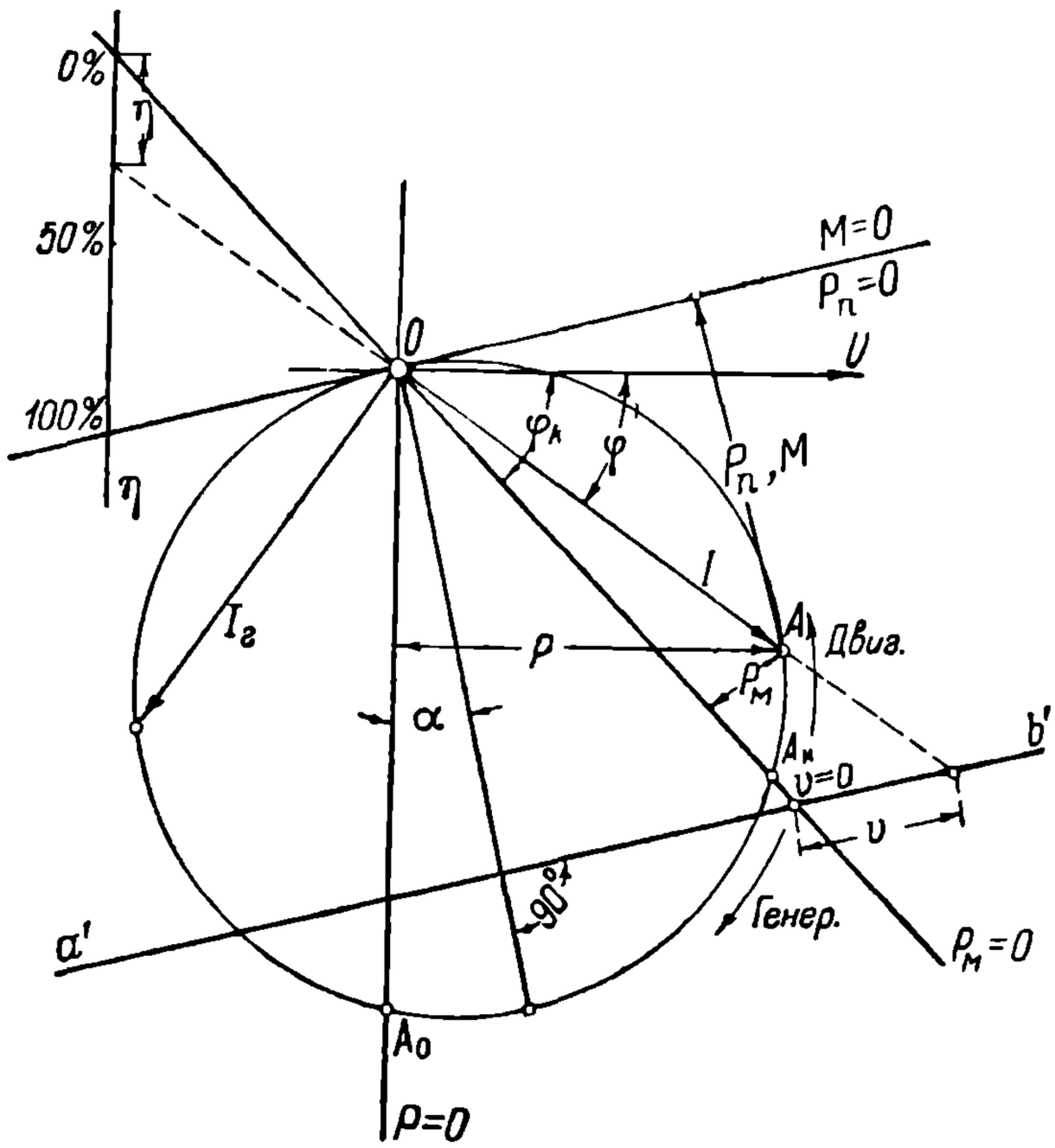


Рис. 53. Рабочая диаграмма тока однофазного последовательного двигателя.

На основании построенной диаграммы тока можно проанализировать все основные этапы работы коллекторной последовательной машины. Режим работы машины двигателем идет от точки $A_к$, покоя машины, до точки бесконечно большой скорости O.

При вращении машины с помощью постороннего механизма против момента ее, как двигателя, режим работы на окружности характеризуется движением векторов от точки A_k влево. Участок A_kA_0 соответствует переходному режиму, когда энергия на покрытие потерь машины частично покрывается сетью и частично механическим двигателем, приводящим ее в движение. При переходе через точку A_0 начинается область генераторного режима машины, продолжающегося до точки O.

Рабочая диаграмма токов построена при условии пренебрежения насыщением магнитной системы машины. В реальных условиях диаграмма не имеет круговой формы. Насыщение ее искажает, придавая ей форму неправильного эллипса. Чем больше насыщена машина, тем менее точные результаты можно получить из диаграммы. Искажают ее также и токи коммутации витков, замыкаемых щетками.

3. Репульсионные двигатели со статорным возбуждением.

Схема репульсионного двигателя со статорным возбуждением приведена на рис. 54. Машины имеют, как и в предыдущем случае, обмотку возбуждения, компенсационную и роторную. В данном случае щетки ротора — короткозамкнутые. Ввиду этого роторная обмотка с обмоткой компенсации составляют систему короткозамкнутого трансформатора. Энергия от статора к ротору передается здесь трансформаторным путем. Поэтому репульсионные двигатели очень часто называют двигателями с грансформаторным питанием.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Соотношение токов в статоре и роторе при положении покоя машины подчинено диаграмме рис. 55. Как и во всяком короткозамкнутом трансформаторе, ток в первичной обмотке состоит из небольшого намагничивающего тока I_0, создающего поток Φ_k, и тока, идущего на создание AW, компенсирующих AW_2 ротора. Последние создаются током I_{2k}, получаемым под действием э. д. с., образуемой в роторе потоком Φ_k и называемой э. д. с. короткого замыкания.

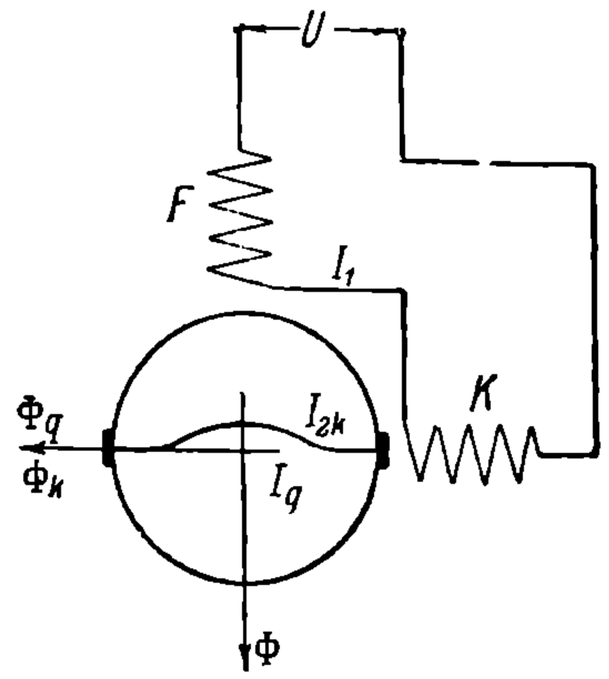


Рис. 54. Схема соединений репульсионного двигателя со статорным возбуждением.

В короткозамкнутом трансформаторе токи, если пренебречь небольшим током намагничивания, в первичных и вторичных цепях изменяются пропорционально друг другу. Следовательно, репульсионные двигатели должны быть причислены к двигателям с последовательной характеристикой.

Угол сдвига γ_1 между векторами токов I_1 и I_{2k} объясняется влиянием активного сопротивления роторной обмотки. В общем случае первичные и вторичные обмотки репульсионных двигателей могут иметь различные числа витков. Однако, для упрощения выкладок они будут приводиться к одному и тому же числу, как это принято делать при изучении теории подобных схем. Приведенные величины будут отмечаться значками сверху.

Основной вращающий момент репульсионного двигателя создается от взаимодействия основного потока Ф, создаваемого током I_1, и рабочего тока в роторе I_{2k}. При вращении ротора в потоке Ф, в его обмотке, кроме отмеченной небольшой э. д. с. короткого замыкания, создается э. д. с. вращения $E_{2в}$. Действуя в короткозамкнутых щетках, она дает генераторный ток I_q, образующий новый магнитный поток Φ_q, направленный по линии щеток так же, как и поток короткого замыкания (рис. 56). Поток Φ_q создает в роторной обмотке э. д. с. пульсации $E_{2п}$, которая вместе с активным и реактивным падениями напряжений уравновешивает э. д. с. $E_{2в}$. Угол γ_2, как и в предыдущем случае, вызывается влиянием активной составляющей роторной обмотки. С большой точностью можно принять $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$.

Диаграмма напряжения и э. д. с. репульсионного двигателя при нагрузке изображена на рис. 57. При состоянии покоя напряжение U_k компенсирует падения напряжений в первичной цепи $I_1 r_1$ и $I_1 x_1$, составляющие $I_{2k} r_2$ и $I'_{2k} x'_2$, соответствующие падениям напряжения во вторичной цепи, и э. д. с. самоиндукции $E_п$ от главного потока в обмотке возбуждения. При вращении машины к этим э. д. с. присоединяется еще э. д. с., получаемая в компенсационной обмотке вследствие трансформаторного действия на нее потока Φ_q. Последний, образуя $E_{2п}$ в обмотке ротора, одновременно с этим создает трансформаторную э. д. с. и в обмотке компенсационной $E_m = E'_{2п}$. Законы изменения $E'_{2п}$ и E_m одни и те же.

Э. д. с. вращения $E_{2в}$ имеет выражение:

$$E_{2в} = \sqrt{2}\,\pi \nu_в f_2 W_2 \Phi_{max}\, 10^{-8}. \qquad (16)$$

Э. д. с. пульсации:

$$E_{2п} = \sqrt{2}\,\pi \nu f_2 W_2 \Phi_{q\,max}\, 10^{-8}. \qquad (17)$$

Пренебрегая падениями напряжения, можно положить $E_{2в} = E_{2п}$, и тогда получится из выражений (16 и 17):

$$\Phi_q = \frac{\nu_в}{\nu} \Phi. \qquad (18)$$

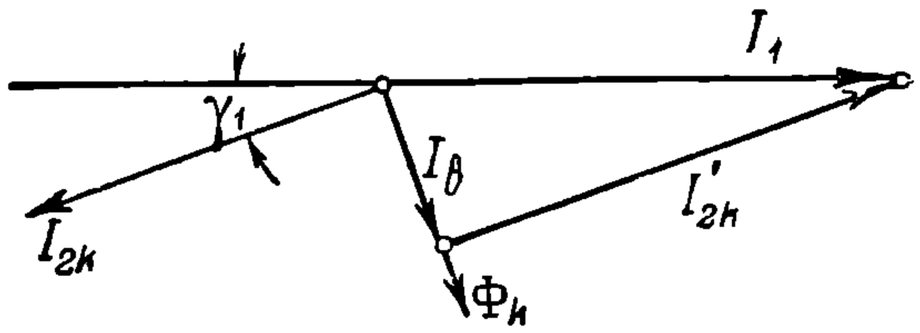


Рис. 55. Диаграмма токов в рабочих обмотках репульсионного двигателя при покое.

Данное соотношение является основным для репульсионных двигателей. Оно показывает, что поперечный поток Φ_q определяется скоростью движения ротора. При скоростях ниже синхронных $\Phi_q < \Phi$, при синхронизме $\Phi_q = \Phi$ и при сверхсинхронных скоростях $\Phi_q > \Phi$. Потоки Ф и Φ_q, будучи сдвинуты в пространстве под углом 90° и во времени под углом близким к той же величине, образуют вращаю-

НТБ УГУНТ (ДІІТ)

щееся поле. Поле это — эллиптического типа, и только при синхронной скорости оно обращается в круговое.

Выражения (16 и 17) показывают, что, если исследовать диаграмму (57) при $I = \text{const}$, а следовательно и при $\Phi = \text{const}$, то геометрическим местом концов векторов напряжения будет прямая ab, причем отрезки $B_k B$, как и в последовательных двигателях, будут в определенном масштабе определять скорости вращения. Анализ диаграммы обнаруживает, что по характеру она очень близка к диаграмме последовательного двигателя. Переход от нее к диаграмме тока может быть осуществлен тем же методом инверсии. Очевидно, рабочая диаграмма, так же как и для последовательных двигателей, будет окружностью.

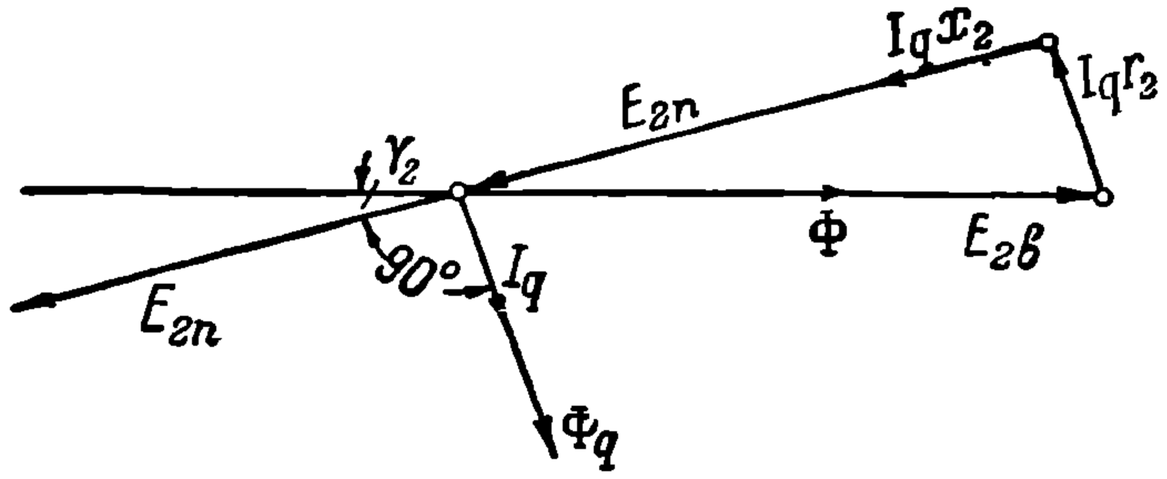


Рис. 56. Диаграмма образования поперечного поля репульсионного двигателя.

В отношении мощности, развиваемой репульсионным двигателем, имеется небольшое отличие. Благодаря наличию в роторе двух составляющих тока I_{2k} и I_q, получаются и две составляющие мощности. На основании диаграммы (57):

$$P_м = E_{2в} I_{2k} \cos\gamma - E_{2в} I_q \sin\gamma. \qquad (19)$$

Первая составляющая аналогична мощности последовательного двигателя. Она соответствует мощности машины, как двигателя. Вторая вызывается намагничивающим генераторным током I_q. Мощность эта — генераторная, преодолеваемая за счет первой. Генераторная мощность при нормальных режимах, ввиду незначительности угла γ, существенного значения не имеет, но при больших скоростях она может достигнуть большой величины. Этим объясняется, почему идеальный холостой ход репульсионного двигателя должен мыслиться при конечной скорости, а не при бесконечно большой, как это имеет место при последовательных двигателях. Все, что было сказано относительно мощностей репульсионного двигателя, естественно, относится и к вращающим моментам. Последние так же, как и мощности, имеют положительную и отрицательную составляющую.

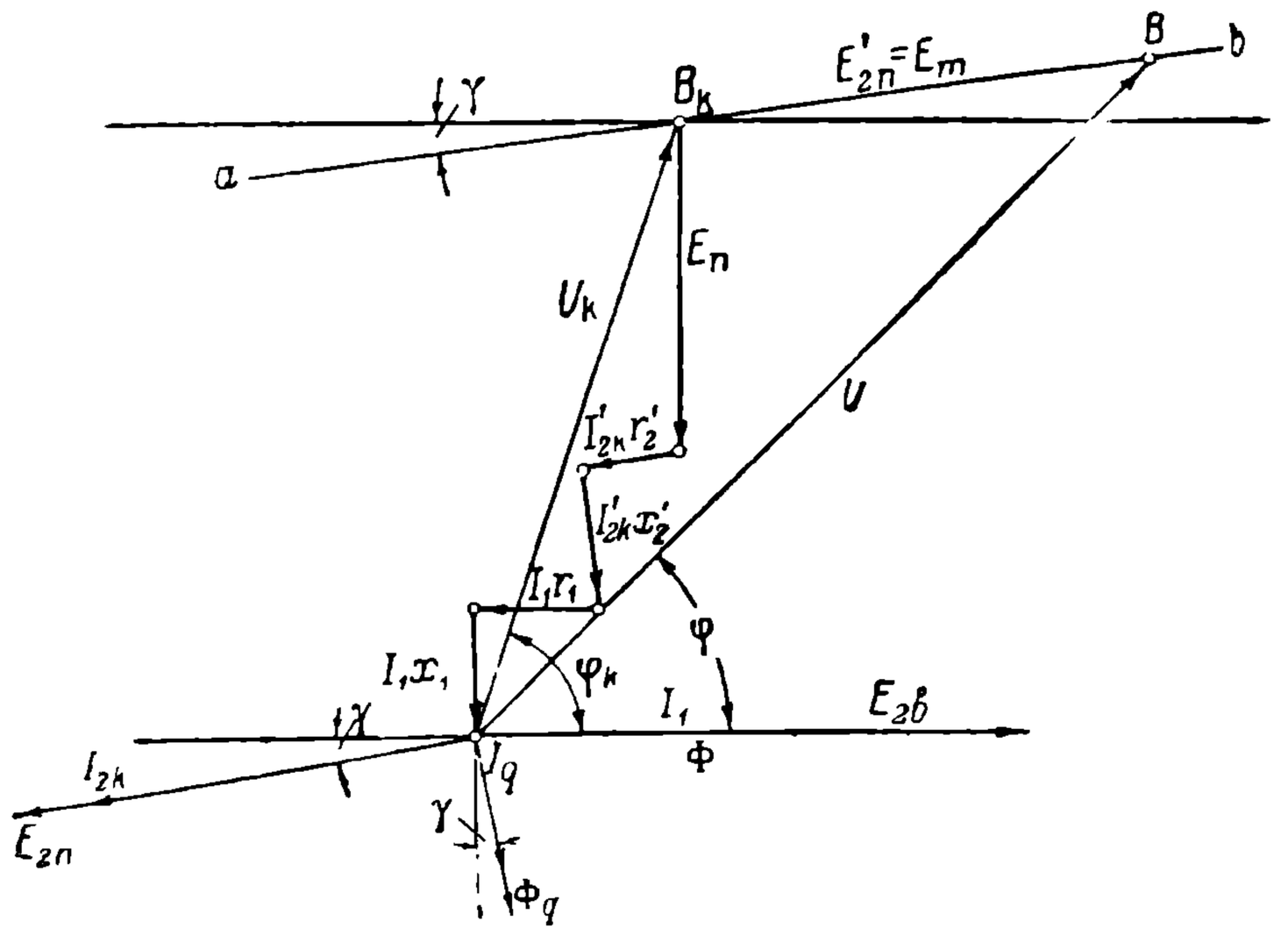


Рис. 57. Векторная диаграмма напряжения репульсионного коллекторного двигателя со статорным возбуждением.

Разобранная система репульсионных двигателей относится к двигателям с фиксированным положением щеток. На практике большим распространением пользуются двигатели с передвижными щетками (рис. 58). Характерной особенностью этой системы двигателей является наличие на статоре одной только обмотки. В зависимости от положения щеток общая м. д. с. статора разлагается на две состав-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

щие м. д. с.$_1$ и м. д. с.$_3$, соответствующие обмоткам компенсационной и возбудительной. При угле сдвига $\alpha = 0$ составляющая м. д. с.$_3 = 0$, а при $\alpha' = 90°$, по тому же закону — м. д. с.$_1 = 0$. Рабочее положение щеток получается между этими двумя крайними положениями. В зависимости от положения щеток меняется и вращающий момент. В указанных двух крайних положениях он равняется нулю. Наибольшее его значение получается нормально при α, близким к 15°.

Пускать в ход репульсионные двигатели можно с помощью сдвига щеток. При $\alpha = 90°$ они занимают так называемое холостое положение, и тогда $I_{2k} = 0$. Сдвигая щетки с данного положения, можно по желанию регулировать пусковые токи и пусковые моменты. Сдвиг щеток с холостого положения в ту или другую сторону определяет то или другое направление вращения машины.

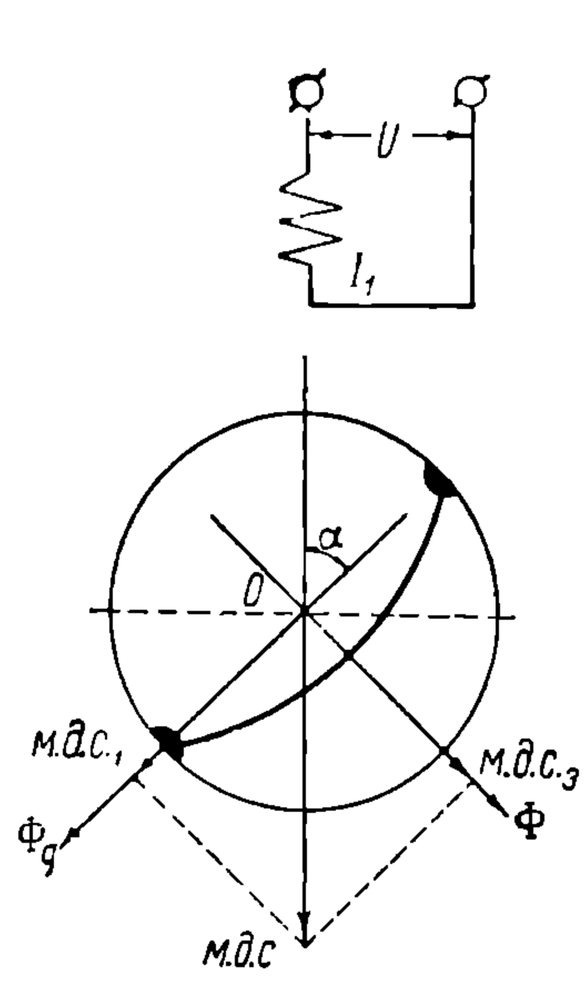


Рис. 58. Схема соединений репульсионного двигателя с передвижными щетками.

Особую конструкцию репульсионных двигателей представляет система Déri (рис. 59). Здесь имеется на каждую пару полюсов по две пары щеток, причем в каждой паре одна щетка A неподвижна, а другая B подвижна. Основной принцип работы машины — такой же, как и в предыдущем случае. Холостое положение щеток здесь получается в случае совмещения подвижной и неподвижной щеток одной и той же пары. Полное короткое замыкание системы имеет место при совмещении подвижных и неподвижных щеток различных пар.

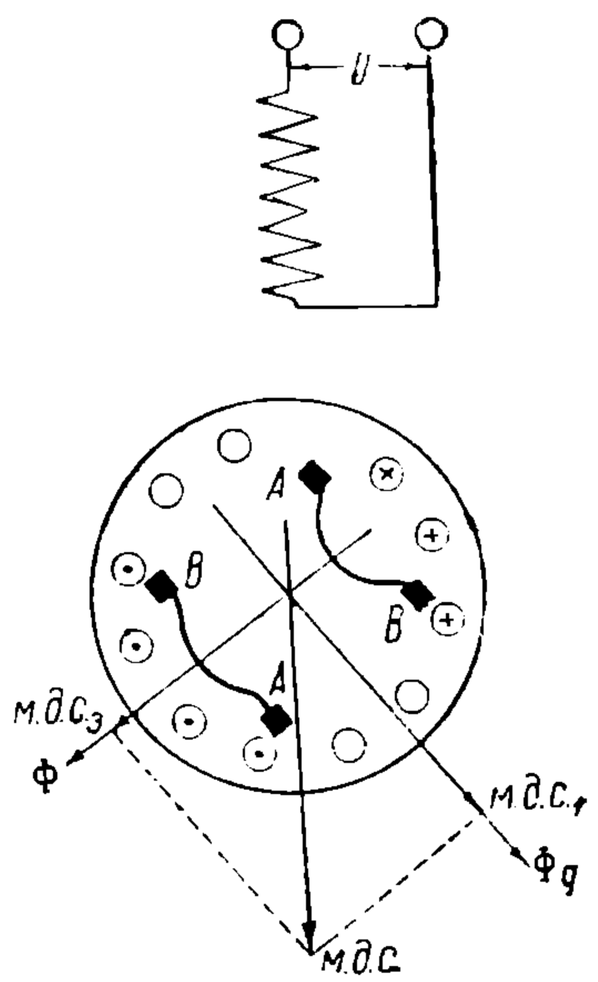


Рис. 59. Схема репульсионного двигателя Déri.

Оригинальную картину представляет здесь распространение токов в обмотке ротора. Токи получаются только в тех частях обмотки, которые замыкаются щетками. В тех же витках, которые находятся на прочих частях периферии ротора, токов не имеется. В результате кривая магнитодвижущей силы ротора получает трапецоидальную форму. Это дает некоторые преимущества двигателю Déri, так как при таких кривых получается лучшая взаимная компенсация роторной и статорной цепей. При нормальных роторных обмотках кривая их магнитодвижущей силы имеет форму треугольника, что при обычной трапецоидальной форме м. д. с. статора ввиду разного характера кривых дает менее совершенную компенсацию.

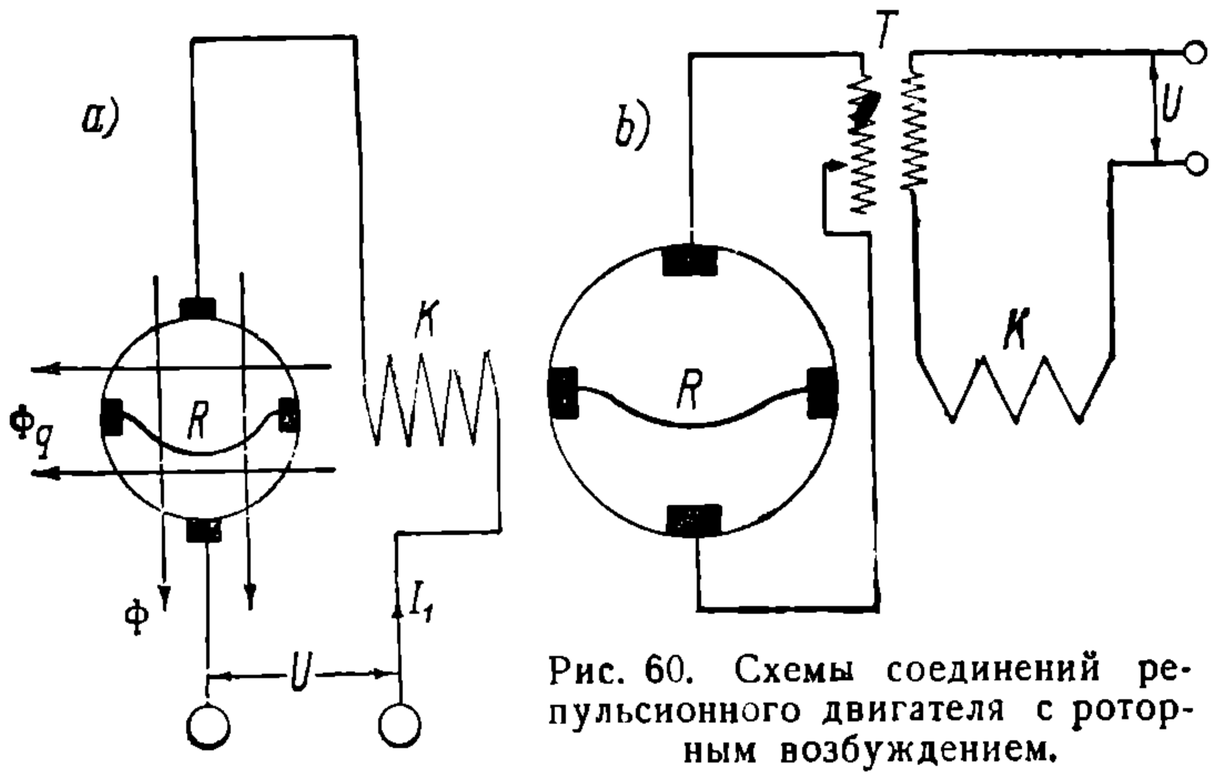


Рис. 60. Схемы соединений репульсионного двигателя с роторным возбуждением.

В отношении основных принципов работы репульсионные двигатели с передвижными щетками не отличаются от таковых с неподвижными. Машины работают на основе тех же диаграмм, которые были построены и для предыдущего типа двигателя.

4. Репульсионные двигатели с роторным возбуждением.

Схемы таких двигателей приведены на рис. 60 (a и b). Схемы a и b рис. 60 отличаются только наличием во второй сериесного трансформатора T, дающего возможность регулировать соотношением ампервитков рабочей и возбудительной

НБ УДУХТ (ДІТ)

цепей. Принципиального отличия трансформатор T не вносит. При рассматриваемой системе на статоре помещается только одна обмотка компенсации. Ротор имеет две пары щеток. Из них первая, как короткозамкнутая, является обычной для репульсионных машин. Вторая же пара присуща только данной системе и имеет целью создавать поток возбуждения. В данном случае одна и та же обмотка ротора исполняет функции рабочей и возбудительной обмоток. Рабочие и возбудительные токи ротора, идя по диаметральным направлениям, в каждый данный момент складываются друг с другом, образуя результирующий ток, но для ясности вопроса их можно мыслить действующими независимо друг от друга.

Принцип работы рассматриваемого двигателя в основе остается тем же самым, что и для репульсионного двигателя со статорным возбуждением. Различие заключается только в том, что здесь обмотка возбуждения вращается, благодаря чему в ней, кроме э. д. с. пульсации, получается еще и э. д. с. вращения. Если обратиться к рис. 60-а, то из него видно, что для обмотки возбуждения при пренебрежении $\Phi_к$ активным потоком, в отношении создания э. д. с. вращения, является поток Φ_q. Новая э.д.с. вращения будет определяться равенством:

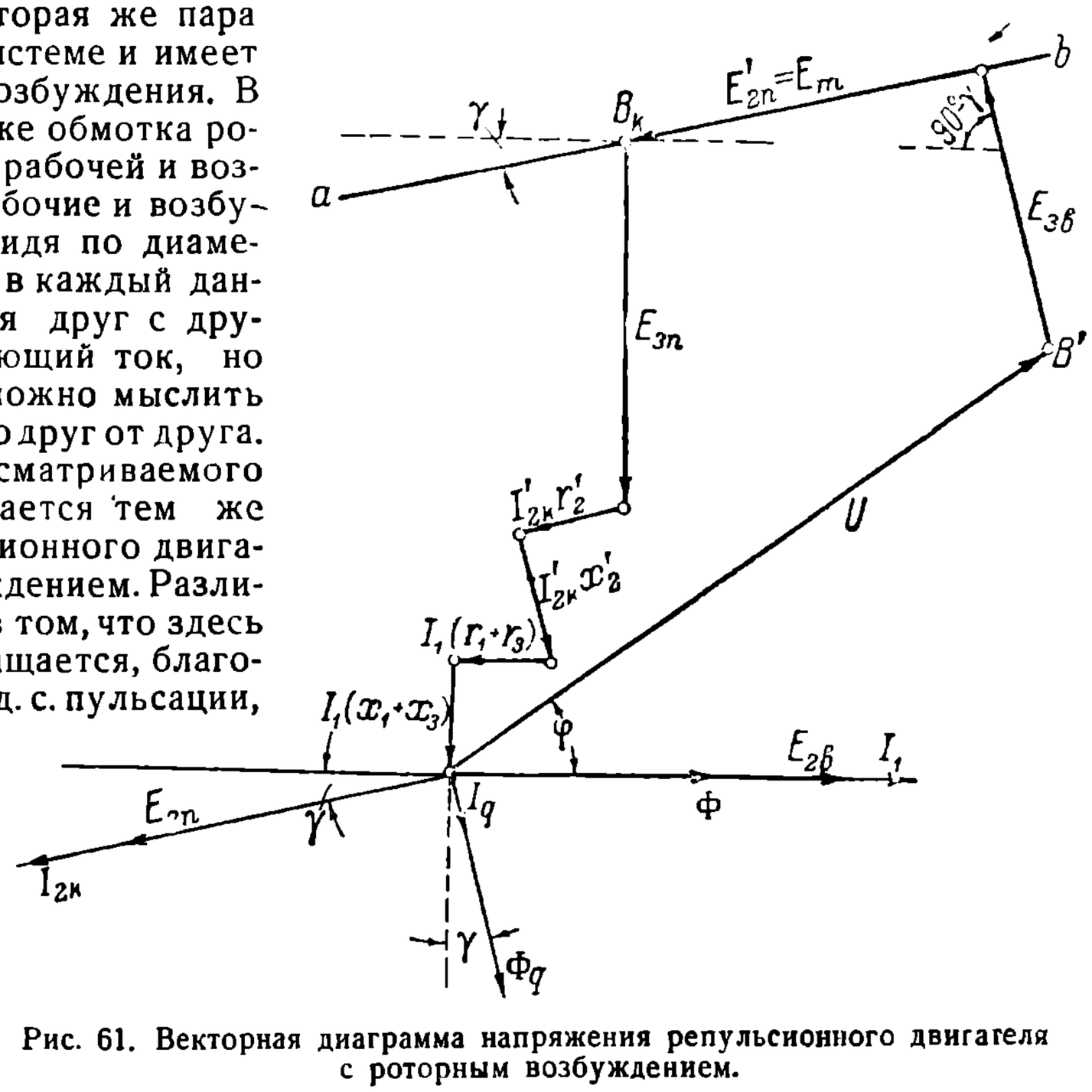


Рис. 61. Векторная диаграмма напряжения репульсионного двигателя с роторным возбуждением.

$$E_{зв} = \sqrt{2}\pi\nu_в f_2 W \Phi_{q\,max} 10^{-8}. \qquad (20)$$

Иначе это можно написать на основании формулы (18) в виде:

$$E_{зв} = \sqrt{2}\pi \frac{\nu^2_в}{\nu} f_2 W_2 \Phi_{max} 10^{-8} \qquad (21)$$

При определении момента, развиваемого репульсионным двигателем с роторным возбуждением, следует иметь в виду новую составляющую, получаемую от взаимодействия тока возбуждения I_1 с потоком Φ_q. В двигателях со статорным возбуждением этой составляющей не имеется, так как обмотка возбуждения находится в неподвижном состоянии. Если проанализировать направления рассматриваемого момента, то он оказывается действующим в ту же сторону, что и основной момент.

Диаграмма напряжения и э. д. с. репульсионных двигателей с роторным возбуждением приведена на рис. 61. Для пояснения ее следует только разобрать вопрос о направлении э. д. с. $E_{зв}$. Линия действия последней должна совпадать с линией действия потока, ее образующего, в данном случае Φ_q. Для ответа на вопрос, в какую сторону $E_{зв}$ должна быть направлена, следует исходить из того, что она является э. д. с. режима машины в качестве двигателя. Ввиду этого $E_{зв}$ должна составлять с ориентированным уже активным падением напряжения обмотки возбуждения угол меньше 90°, так как обе эти составляющие являются факторами, вызывающими потребление энергии из сети.

Анализируя установленное таким образом направление $E_{зв}$, можно видеть, что она действует почти прямо противоположно э. д. с. пульсации в обмотке возбуждения. Отношение этих двух э. д. с., как показывают формулы (11 и 21), может быть представлено в виде:

$$\frac{E_{зп}}{E_{зв}} = \frac{\sqrt{2}\pi\nu f_2 W_2 \Phi_{max} 10^{-8}}{\sqrt{2}\pi \frac{\nu^2_в}{\nu} f_2 W_2 \Phi_{max} 10^{-8}} = \left|\frac{}{\nu_в}\right|^2 \qquad (22)$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Равенство E_{3n} и $E_{3в}$ получается при синхронизме, когда $\nu = \nu_в$. Если пренебречь падениями напряжений в обмотках, то при этой же скорости $\cos\varphi$ равен единице. При скоростях выше синхронной машина работает упреждающими токами.

Для определения характера рабочей диаграммы репульсионного двигателя с роторным возбуждением следует исходить, как и раньше, из геометрического места концов векторов напряжения. Как видно из диаграммы (рис. 61), при условии $I_1 = \text{const}$ конец вектора напряжения B' определяется величинами E_m и $E_{3в}$. Первая э. д. с. при условии $I_1 = \text{const}$ изменяется пропорционально частоте вращения в первой степени, а вторая — пропорционально квадрату. Следовательно, конец вектора напряжения, определяемого координатами, пропорциональными первой и второй степени $\nu_в$, должен двигаться по параболе. Отсюда приходим к заключению, что кривая тока, как обратная параболе, должна быть сложной кривой высшего порядка типа кардиоиды. Практического значения данная кривая иметь не может ввиду ее сложности и невозможности нанесения на нее прямых мощностей и потерь.

Как это следует из теории рассматриваемого двигателя основное преимущество его заключается в компенсировании э. д. с. пульсации обмотки возбуждения и, как следствие этого, в улучшении $\cos\varphi$. Недостатки его заключаются в бо́льшем количестве щеток на коллекторе, что ухудшает к. п. д. и увеличивает число мест коммутирования тока. Кроме того, в данном двигателе неблагоприятны кривые магнитодвижущих сил ротора, так как они имеют треугольную форму. Для регулирования процесса работы репульсионного двигателя с роторным возбуждением часто применяется схема рис. 60-b. Как было уже отмечено, обмотка возбуждения здесь включается через сериесный трансформатор, соответственно секционированный. Присоединяя обмотку возбуждения к той или другой секции, можно регулировать соотношение ампервитков рабочей и возбудительной цепей.

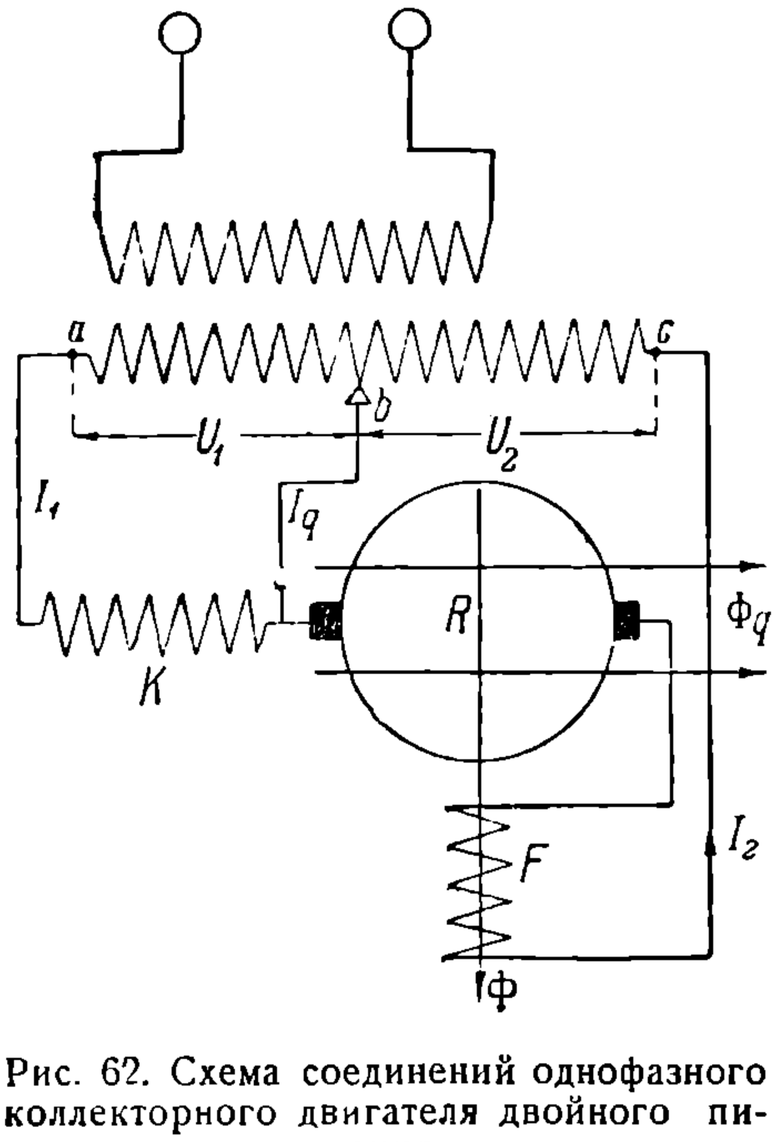


Рис. 62. Схема соединений однофазного коллекторного двигателя двойного питания.

Репульсионный двигатель с роторным возбуждением одновременно был изобретен французом Latour'ом и немцами Winter'ом и Eichberg'ом. Ввиду этого данный двигатель часто называется двигателем Winter — Eichberg — Latour'a.

5. Коллекторные однофазные двигатели двойного питания.

Наиболее часто применяемая схема включения двигателей двойного питания приведена на рис. 62. Из этой схемы видно, что данный двигатель одновременно является последовательным и репульсионным. При совмещении контактов *a* и *b* машина является последовательной с короткозамкнутой компенсационной обмоткой. При совмещении зажимов *b* и *c* получается репульсионная машина, отличающаяся от нормальной только тем, что обмотка ее возбуждения оказывается в цепи ротора, а не статора. При промежуточном положении контакта машина работает частично как последовательная и частично как репульсионная, почему она и получила название машины двойного питания. Обмотка возбуждения здесь находится в роторной цепи, и потому поток Ф создается током ротора.

Характерной особенностью рассматриваемого двигателя является способ возникновения поперечного потока Φ_q Последний в отличие от обычных репульсионных машин создается статорной компенсационной обмоткой. Величина этого потока определяется напряжением U_1. Чем больше это напряжение, тем больше и поперечный поток. По существу поток Φ_q здесь аналогичен потоку Φ_k репульсионных двигателей, но только в отличие от последнего при соответствующих U_1 он может достигать больших значений, так как роторная цепь здесь не короткозамкнутая, а имеет благодаря находящейся в ней обмотке возбуждения большое реактивное падение напряжения, которое наряду с э. д. с. вращения E_n в зависимости от вели-

НВ УДУНТ (ДІІТ)

чины U_1 в большей или меньшей степени компенсируется э. д. с. E_m, индуктируемой трансформаторно в роторе потоком Φ_q. Ротор здесь, будучи последовательно соединенным с обмоткой возбуждения, как и в обычных последовательных двигателях, поперечного потока типа Φ_q не создает. Этим объясняется, почему в данном типе двигателей поперечное поле образуется статорной обмоткой.

Возможность регулировать поток Φ_q с помощью изменения U_1 является основным преимуществом данного двигателя. Изменение поперечного потока Φ_q дает возможность в широких пределах скорости машины получать наивыгоднейшее соотношение его величины и величины основного рабочего потока. Получение желательных соотношений Φ и Φ_q особенно важно с точки зрения улучшения коммутирования, что будет особо отмечено при изложении этого вопроса в последующем.

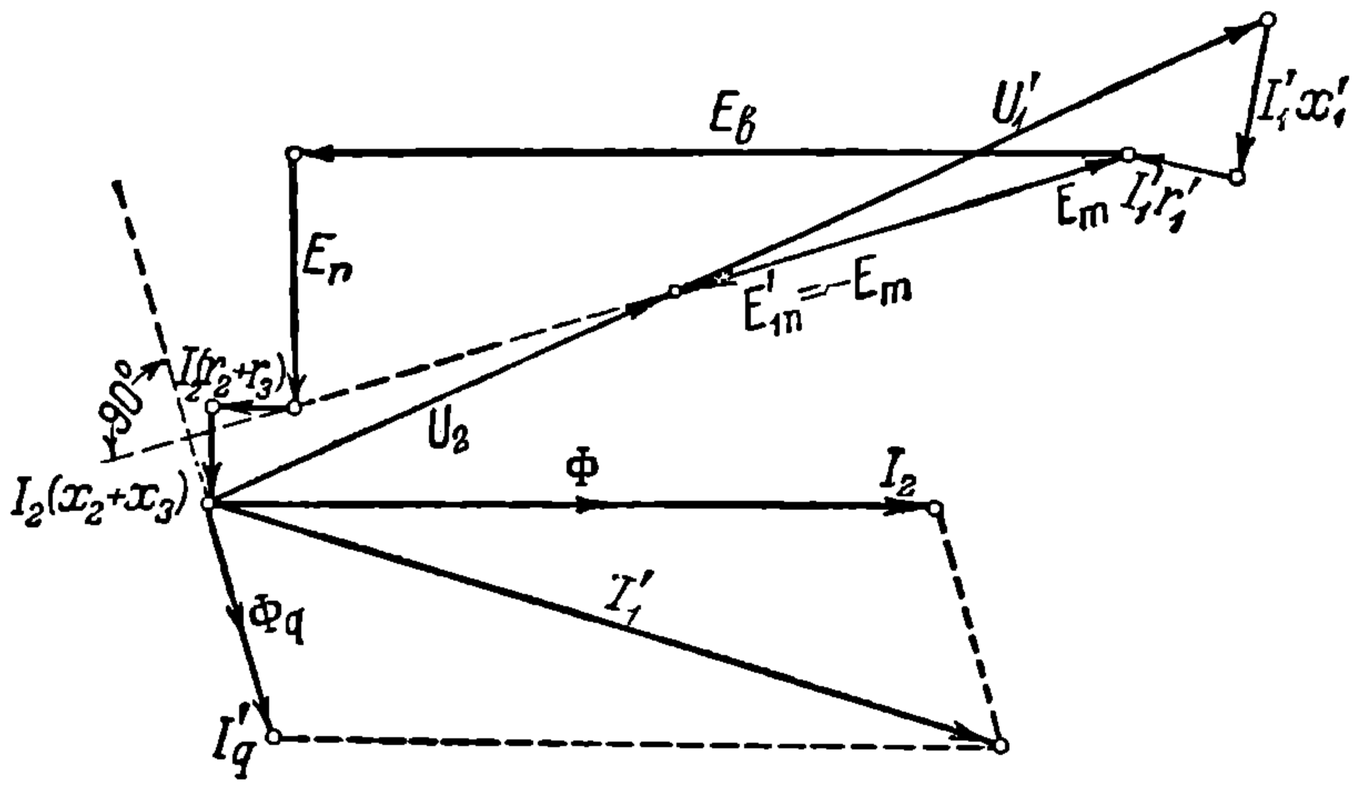


Рис. 63. Векторная диаграмма напряжения коллекторного двигателя двойного питания.

Диаграмма напряжения и э. д. с. двигателя двойного питания приведена на рис. 63, причем здесь, в отличие от предыдущего, витки компенсационной обмотки приведены к роторной, что удобно делать из-за наличия в цепи ротора обмотки возбуждения.

В цепи компенсационной обмотки напряжение сети U_1 уравновешивается э. д. с. пульсации E_{1n}' и падениями напряжения I'_1r_1' и I'_1x_1'. В роторной цепи U_2 вступает во взаимодействие с э. д. с. вращения $E_в$, с э. д. с. самоиндукции обмотки возбуждения E_n, падениями напряжения $I_2(r_2+r_3)$, $I_2(x_2+x_3)$ и, наконец, э. д. с. E_m, создаваемой трансформаторно потоком Φ_q. Эта э. д. с., будучи ориентированной на диаграмме под углом 180° к E_{1n}' благодаря встречному включению обмоток ротора и компенсационной в цепи ротора исполняет функции напряжения сети U_1' и является носительницей мощности, передаваемой от статора к ротору трансформаторным эффектом. При $U_2=0$ вся мощность, перерабатываемая ротором, передается от статора. В данном случае E_m одна является источником рабочего напряжения ротора. В промежуточных положениях между a и c она действует совместно с U_2, и рабочее напряжение ротора фактически определяется геометрической суммой E_m и U_2. Мощности, определяемые U_1 и U_2, здесь одного знака. При совмещении a и b все рабочее напряжение определяется вектором U_2 Если изменить взаимное положение контактов b и c, то рабочее напряжение у ротора будет определяться геометрической разностью E_m и U_2. Мощности, передаваемые на ротор трансформаторно и потребляемые им непосредственно от сети, здесь будут разного знака, и рабочий эффект машины будет определяться их разностью.

Как уже выяснено, режим данного двигателя составляется из режимов последовательного и репульсионного двигателей, рабочие диаграммы которых — окружности. У двигателей двойного питания эти диаграммы также являются окружностями.

Разобранная схема двойного питания принадлежит SSW. К ней близка схема Alexanderson'a. Кроме этих схем, имеется и ряд других систем двойного питания, например, Punga, Osnos'a, но практически они не получили применения.

6. Конструктивные формы однофазных коллекторных двигателей.

В отношении своей формы коллекторные однофазные двигатели конструируются по типу подвесноосевых и опорнорамных. Последние, в свою очередь, разделяются на ординарные и сдвоенные. Якорноосевые системы здесь применения не имеют.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

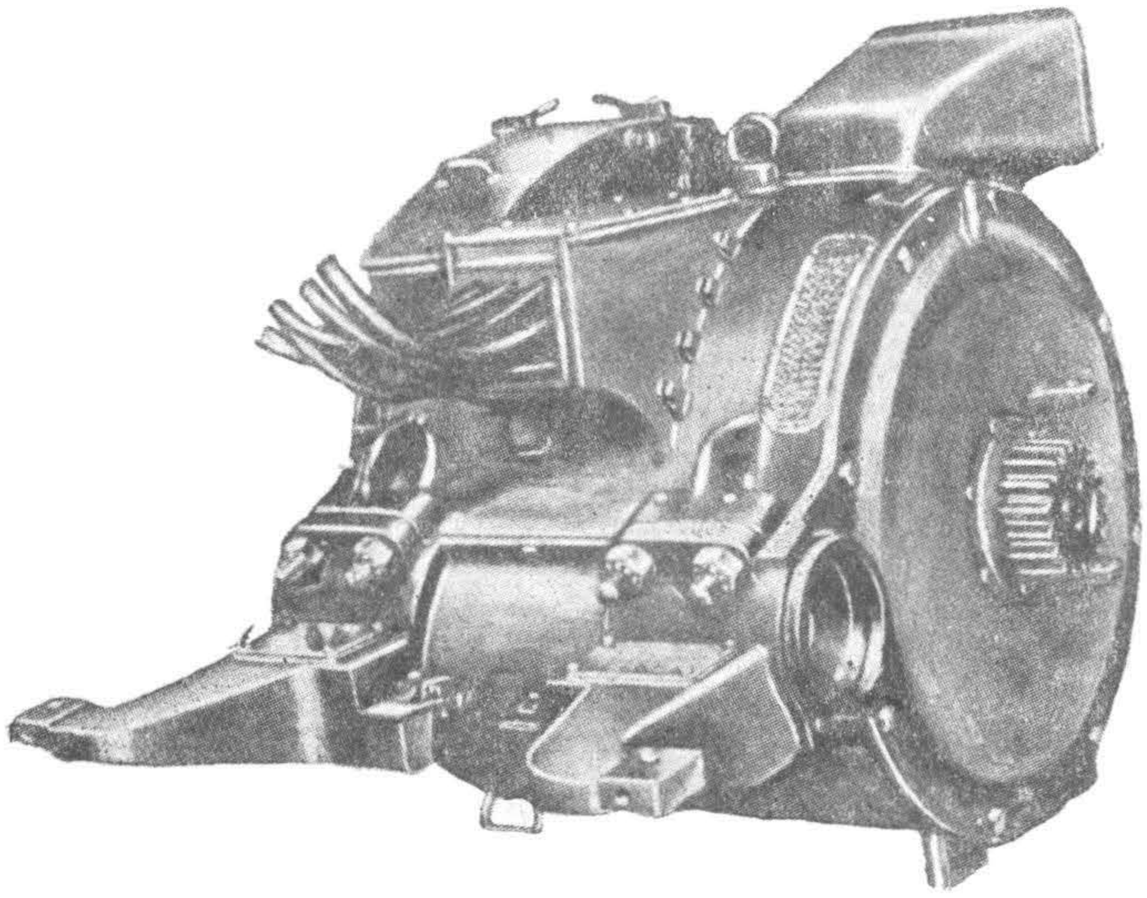


Рис. 64. Подвесноосевой двигатель однофазного тока.

На рис. 64 приведен вид подвесноосевого двигателя. С внешней стороны подвесноосевые двигатели однофазного тока очень похожи на двигатели постоянного тока такого же типа. Однако, по внутреннему устройству они значительно различаются. Все активное железо приходится делать при переменном токе из динамной жести, так как в противном случае получились бы недопустимо большие потери на токи Фуко. В соответствии с этим активная часть статора делается самостоятельной и вставляется в кожух, который активной роли в проведении магнитного потока не играет.

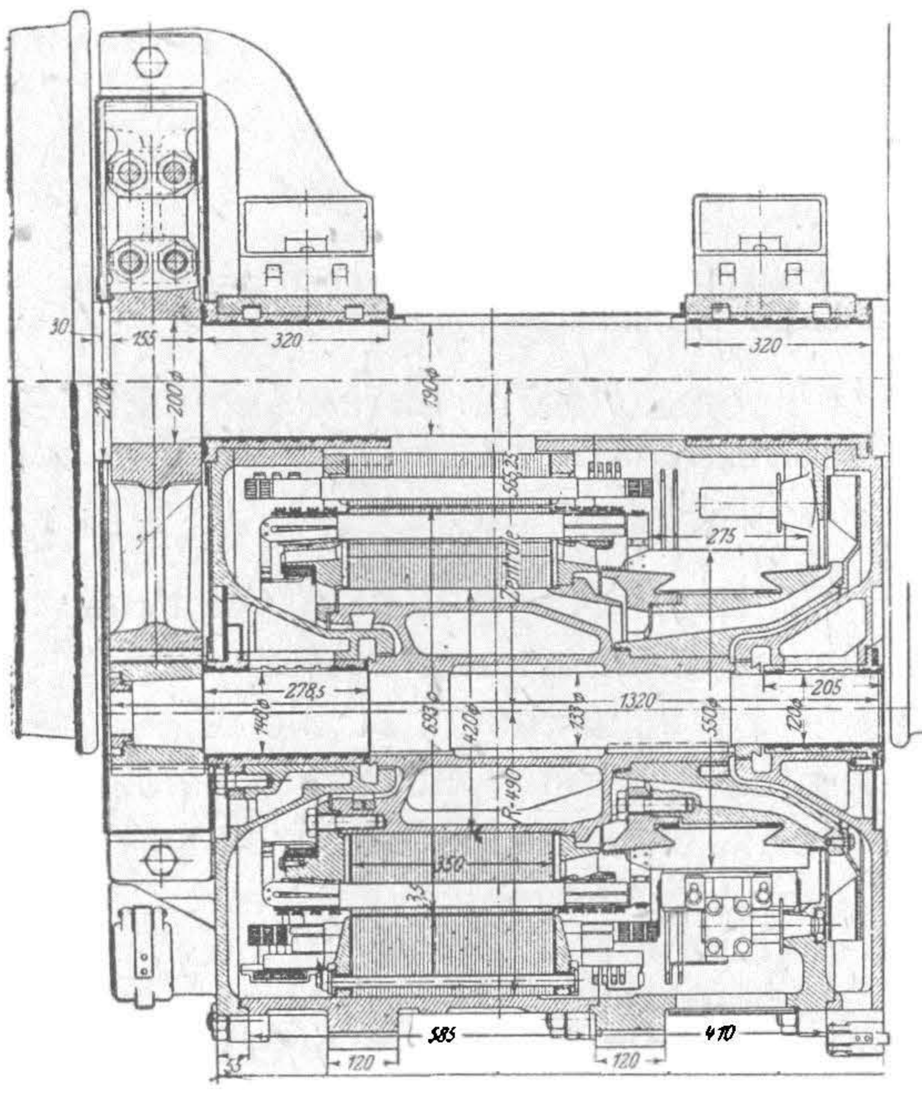


Рис. 65. Продольный разрез коллекторного однофазного двигателя подвесноосевого типа мощностью 275 PS завода SSW.

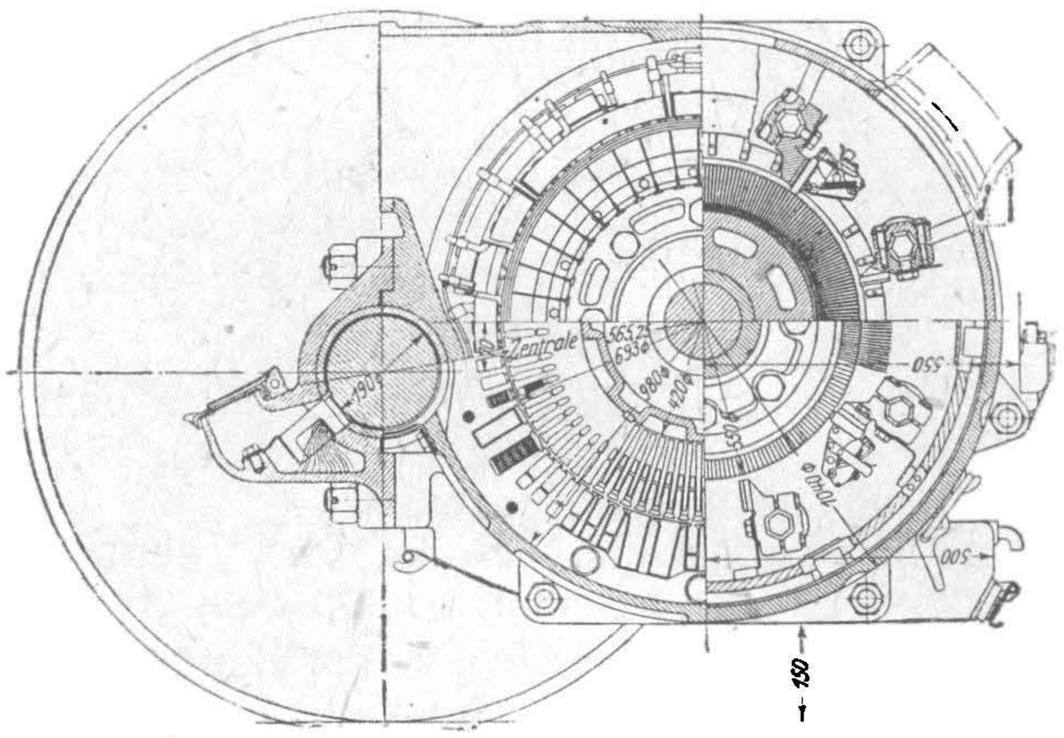


Рис. 66. Поперечный разрез коллекторного однофазного двигателя подвесноосевого типа мощностью 275 PS завода SSW.

Кожух обычно конструируется таким образом, чтобы обеспечить наиболее интенсивное охлаждение машины. Разрезы двигателя подвесноосевого типа приведены на рис. 65 и 66. Область применения подвесноосевых двигателей — главным образом моторные вагоны. Однако, в последнее время эта система начинает получать распространение и для электровозов.

Опорнорамный двигатель сдвоенного типа приведен на рис. 67. При конструировании его осуществлена такая же идея, как и у двигателей постоянного тока. Следует отметить, что к

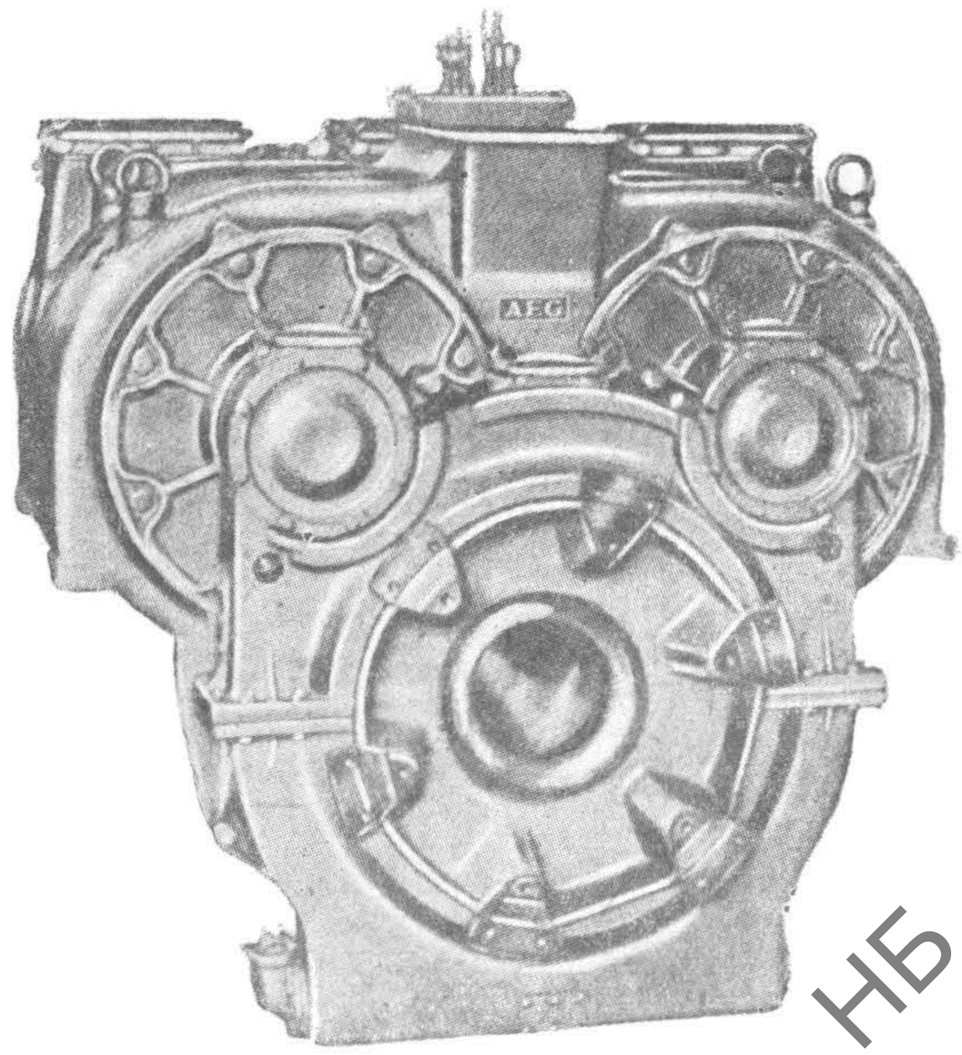


Рис. 67. Опорнорамный двигатель однофазного тока типа близнецов завода AEG мощностью 780 PS.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

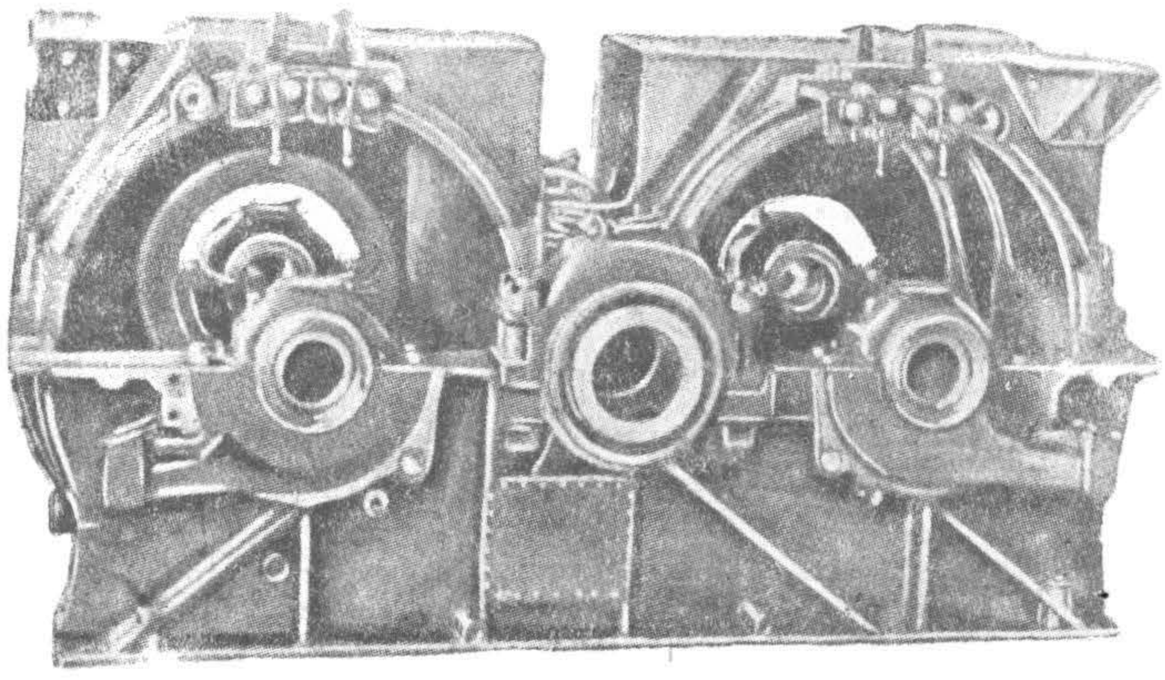


Рис. 68. Стойло-станина для однофазных коллекторных двигателей.

однофазным двигателям эта система, выполненная впервые Вестингаузом, стала применяться еще раньше, чем к двигателям постоянного тока. Внутренние активные железные массы так же, как и вообще при переменном токе, собираются из динамного железа. Отличительным свойством этой системы двигателей является их компактность.

В случае применения двигателей больших мощностей часто, особенно в германской практике, прибегают к помещению их станин в особые стойла (рис. 68).

Причины появления таких конструкций объясняются необходимостью самой точной установки отдельных частей двигателя как по отношению друг к другу, так и по отношению к отдельным частям локомотива и его передаточного механизма. Без применения таких заранее центрированных и соответственно обработанных стойл правильная установка двигателей представляет большие трудности, и в результате это ведет к вредными напряжениям и всякого рода паразитным явлениями как в двигателях, так и в передаточных механизмах.

Типы ординарных опорнорамных двигателей приведены на

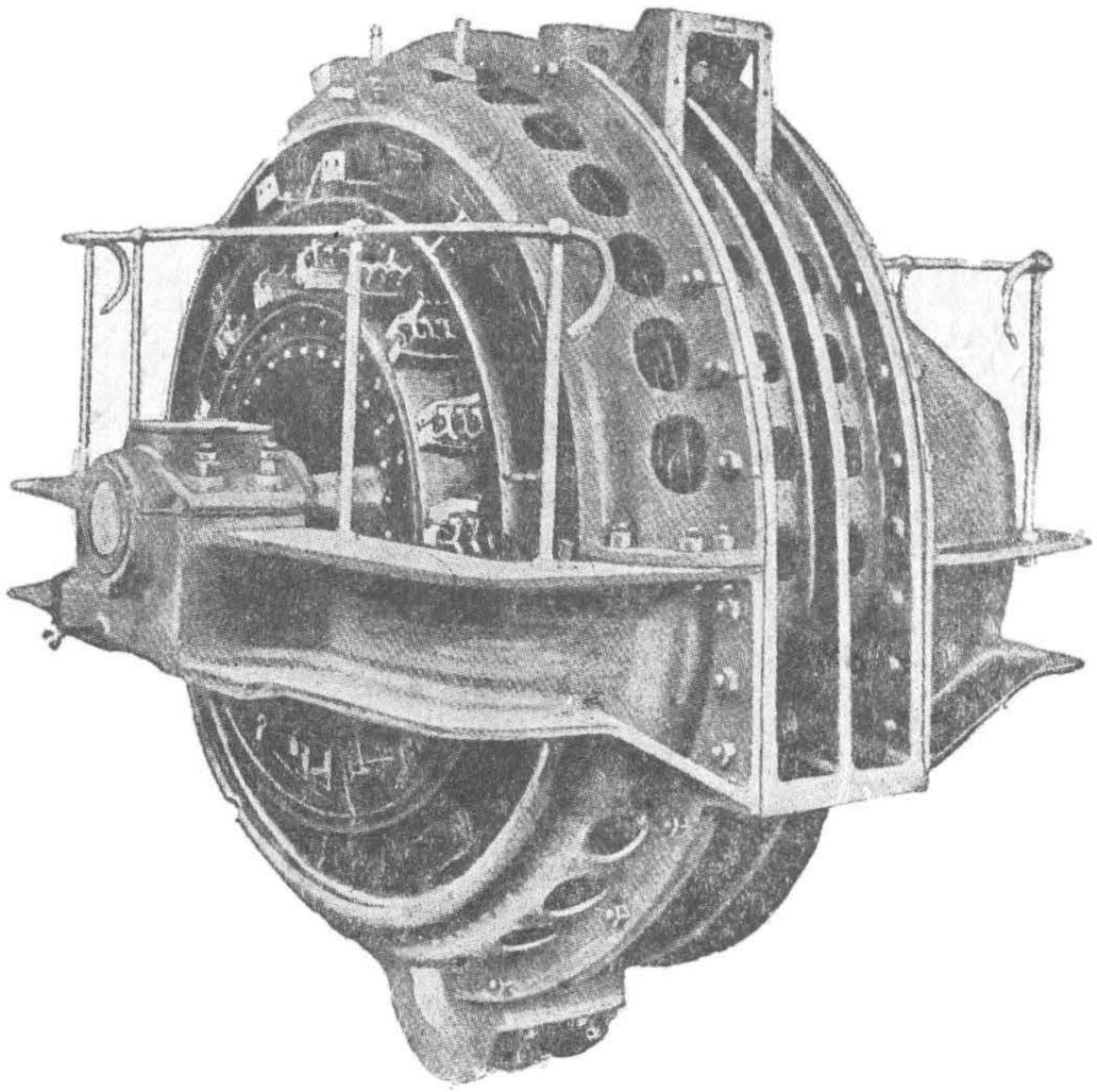


Рис. 69. Опорнорамный двигатель MFO на 1250 PS.

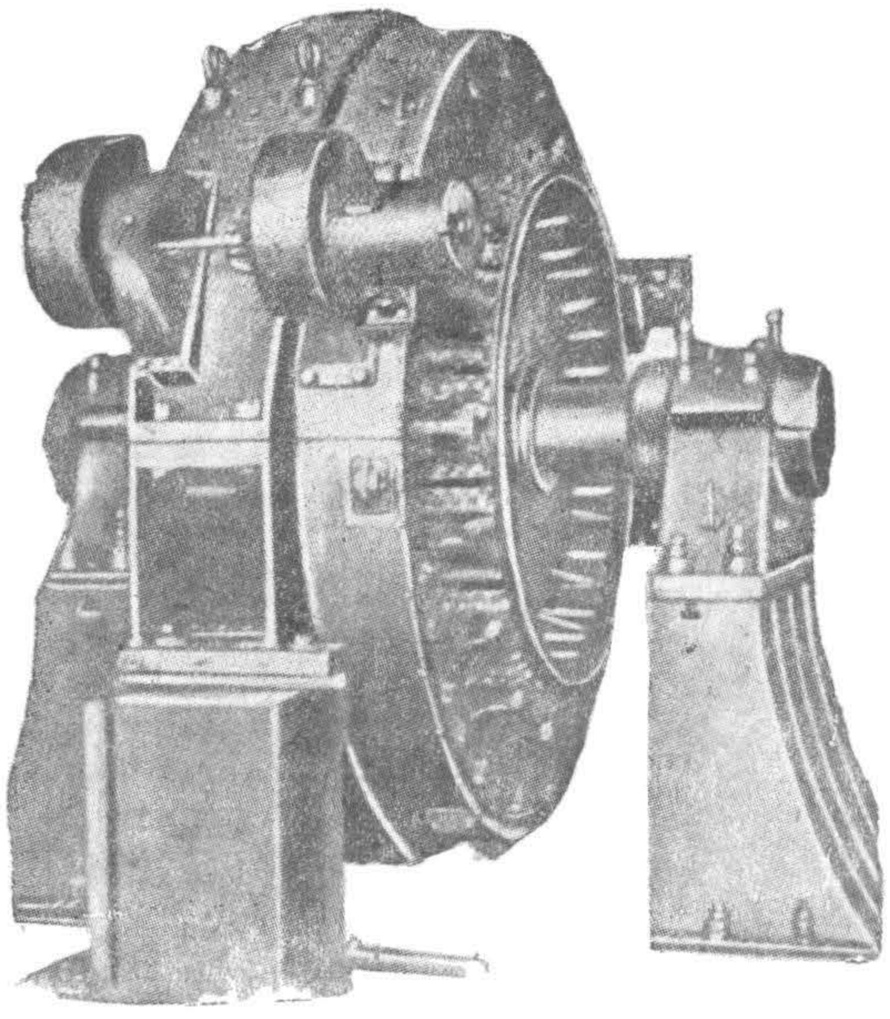


Рис. 70. Опорнорамный двигатель завода Bergmann'a на 3000 PS.

рис. 69 и 70. Подобные двигатели устанавливаются на раму локомотива в собранном виде, или же отдельно устанавливается станина со статором и отдельно ротор на его подшипниках. Разрезы опорнорамных двигателей приведены на рис. 71 и 72. Интересную конструкцию представляет вертикальный двигатель австрийских ж. д. постройки SSW (рис. 73).

Как показывают приведенные разрезы, роторы и статоры современных коллекторных двигателей конструируются по типу зубчатых систем. Некоторые различия существуют в способе укладки возбудительных и компенсационных обмоток. Компенсационные обмотки есть стремление распределить как можно равномерней по всей периферии, дабы лучше компенсировать реакцию ротора.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Обмотки возбуждения распределять равномерно по всей окружности не целесообразно, так как в этом случае получается невыгодная форма кривой магнитного поля. Поэтому ее в большинстве случаев распределяют или в части впадин, или концентрирован-

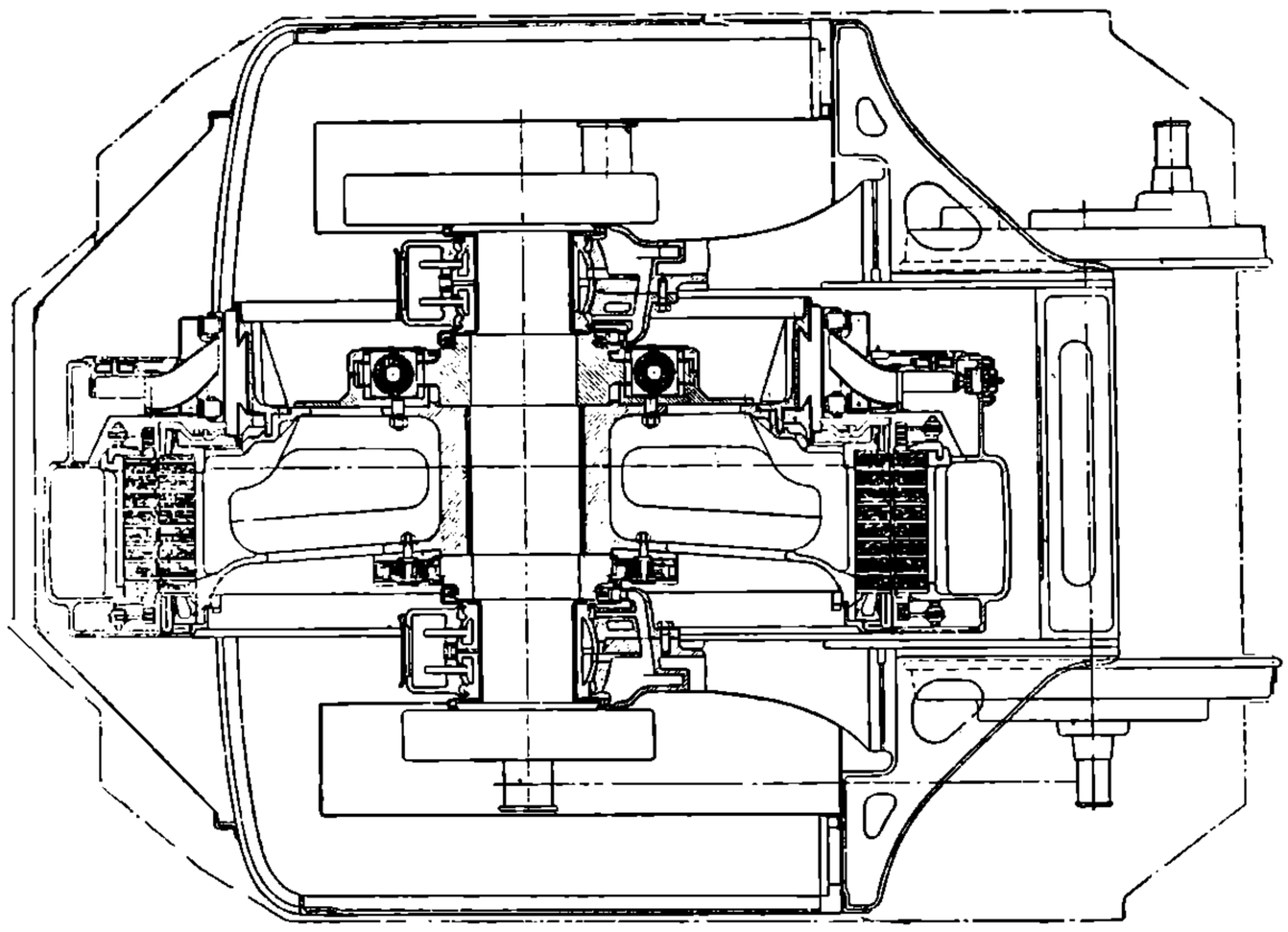


Рис. 72. Разрез опорнорамного двигателя завода Bergmann'a мощностью 3000 PS.

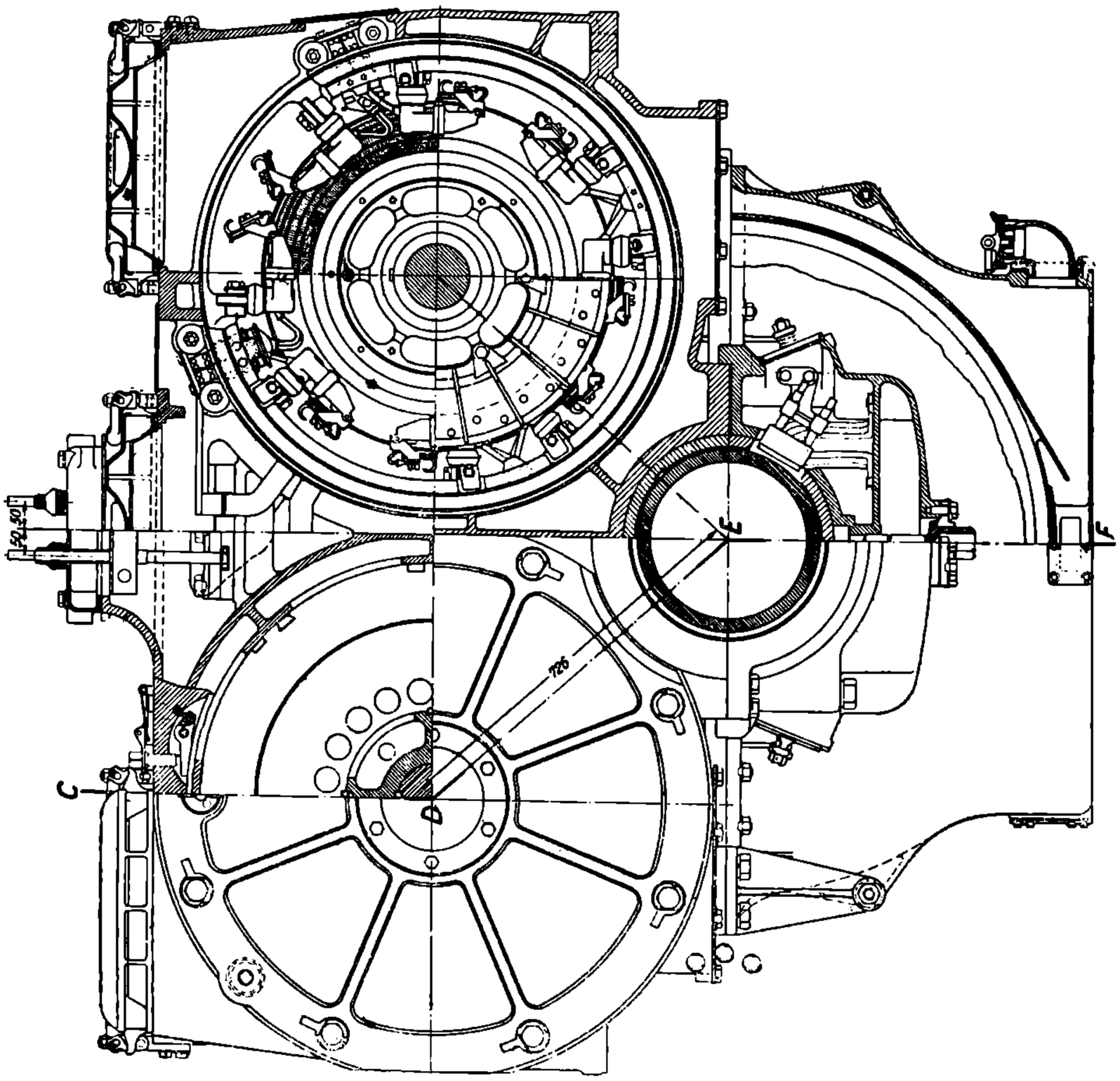


Рис. 71. Разрез сдвоенного коллекторного однофазного двигателя AEG мощностью 780 PS.

но. В первом случае впадины делаются различной формы. В одних помещаются только проводники компенсационной обмотки, а в других, кроме того, и проводники обмотки возбуждения. При концентрированном распределении обмотка возбужде-

НБ УГУНТ (ДІТ)

ния располагается в выемке. В этом случае фактически получается машина с явно выраженными полюсами.

Кроме компенсационной и возбудительной обмоток, однофазные коллекторные двигатели по большей части имеют и обмотки добавочных полюсов. В качестве таких полюсов нормально берутся специально для этого зубцы увеличенного размера, расположенные в зоне коммутирования.

При выборе сечения проводов часто бывает рационально брать их различными для отдельных обмоток, комбинируя последовательное и параллельное соединение отдельных их частей. Для компенсационной обмотки, располагаемой в большом числе впадин, желательно для лучшего использования впадин прибегать к массивным сечениям. Теперь очень часто помещают в каждую впадину по одному стержню. Стержни иногда вставляются необмотанными и изолируются целиком от корпуса слюдой или миканитом. Отдельные стержни объединяются в обмотки с помощью лобовых, соответственно изогнутых пластин.

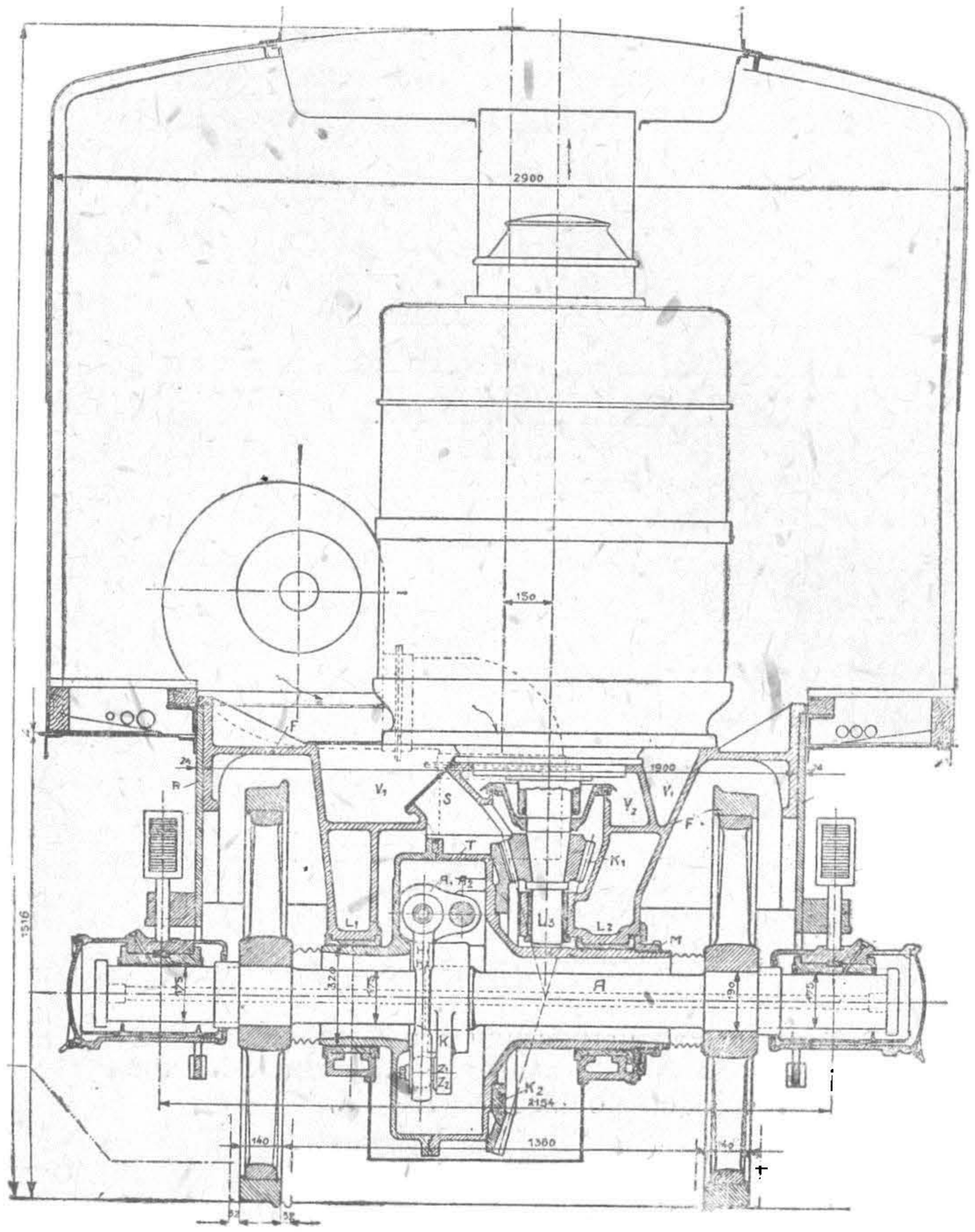


Рис. 73. Вертикальный двигатель электровоза австрийских жел. дор.

Обмотки главных и добавочных полюсов чаще делаются из более легких сечений, поддающихся обработке на шаблонах. Так как они концентрируются или в небольшом количестве впадин, или целиком в отдельных выемках, то вопрос об использовании места здесь особой роли не играет. Соединение полюсов в таких случаях может производиться параллельно или последовательно-параллельно.

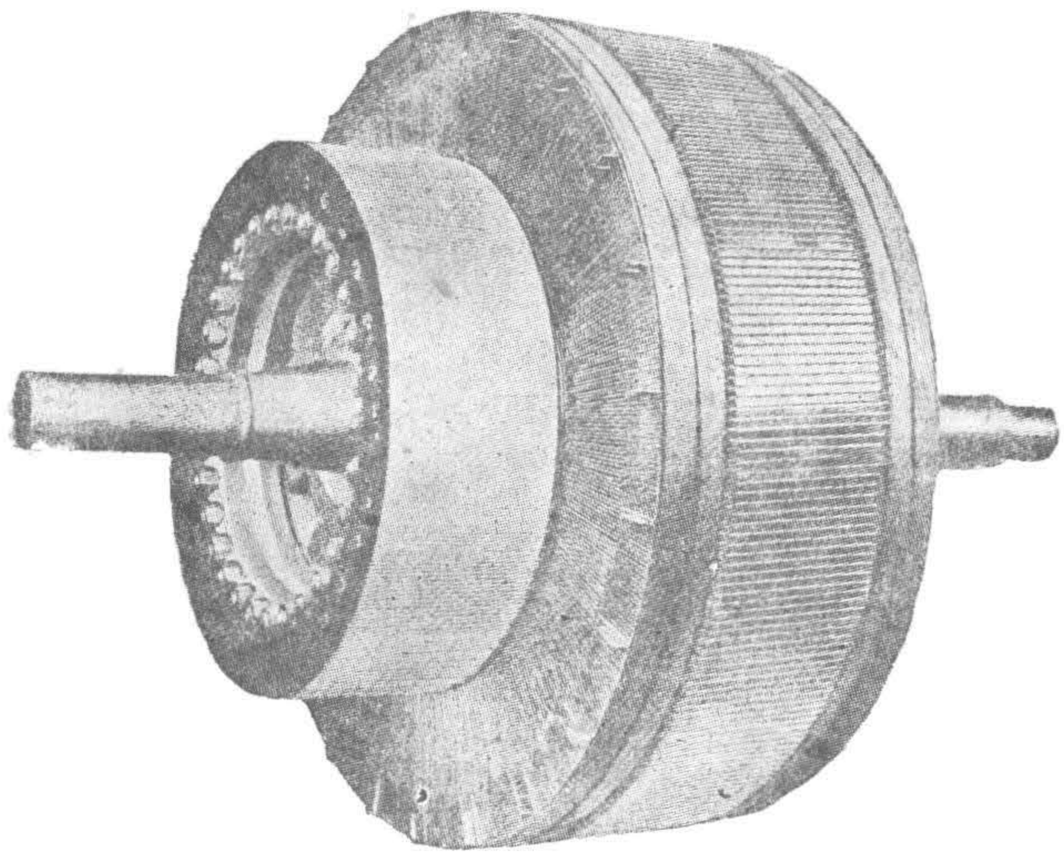


Рис. 74. Ротор однофазного коллекторного двигателя часовой мощностью 1250 PS.

Железо роторов у однофазных коллекторных двигателей, как общее правило, монтируется на солидных звездообразных втулках. В некоторых случаях насадка ротора на вал производится с помощью промежуточных пружин. Примером может служить двигатель Bergmann'a (рис. 72). Здесь ротор свободно лежит на валу, причем между ротором и валом проложена бронзовая втулка. Связь ротора с валом создается посредством спиральных и листовых пружин. Пружины имеют назначением отчасти сглаживать пульсацию вращающего момента, а главное — успокаивать паразитные колебательные процессы, возникающие в некоторых типах электровозов при их движении.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Вид ротора коллекторного двигателя приведен на рис. 74. Значительные затруднения при конструировании однофазных двигателей приходится преодолевать в отношении устройства щеткодержателей, так как их приходится иметь обычно в большом количестве. Для облегчения доступа к отдельным щеткам в настоящее время начали часто применять крепление щеткодержателей к особым зубчатым кольцам, которые можно поворачивать в направляющих статора с помощью зубчатого сцепления.

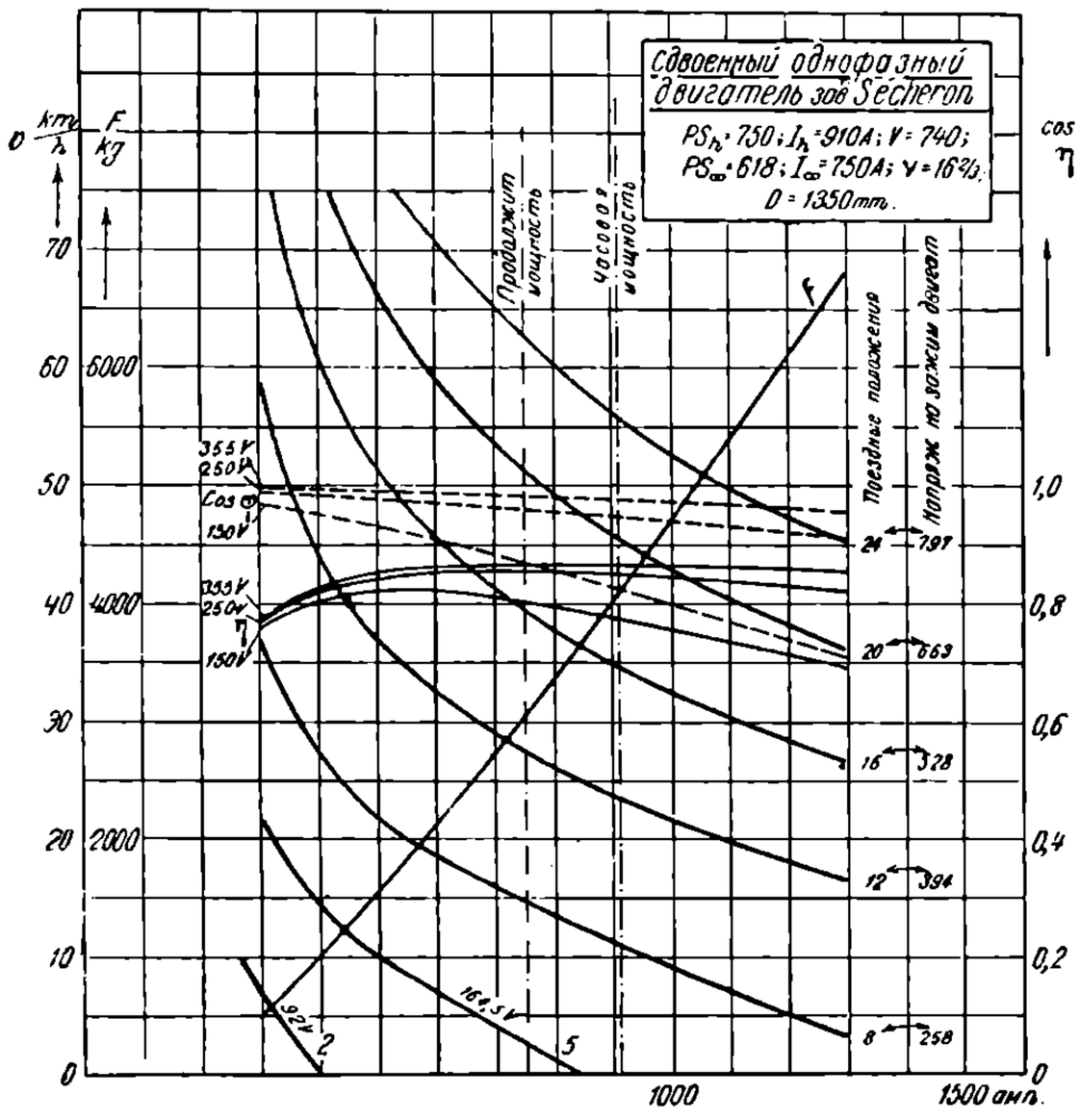


Рис. 75. Тяговые характеристики однофазного последовательного коллекторного двигателя завода Sécheron часовой мощностью 750 PS.

7. Характеристики тяговых коллекторных двигателей однофазного тока.

Двигатели однофазного тока так же, как и тяговые двигатели других категорий, характеризуются мощностями часовыми и длительными. Нормально коллекторные однофазные двигатели работают от промежуточных трансформаторов, понижающих высокое напряжение сети до напряжения на коллекторе. Трансформаторы применяются секционированными с постепенным повышением вторичных напряжений от начального пускового до нормального. На рис. 75 и 76 приведены тяговые характеристики основных типов коллекторных однофазных двигателей. Анализ приведенных характеристик дает возможность видеть, что насыщение у коллекторных двигателей в среднем несколько ниже, чем у двигателей

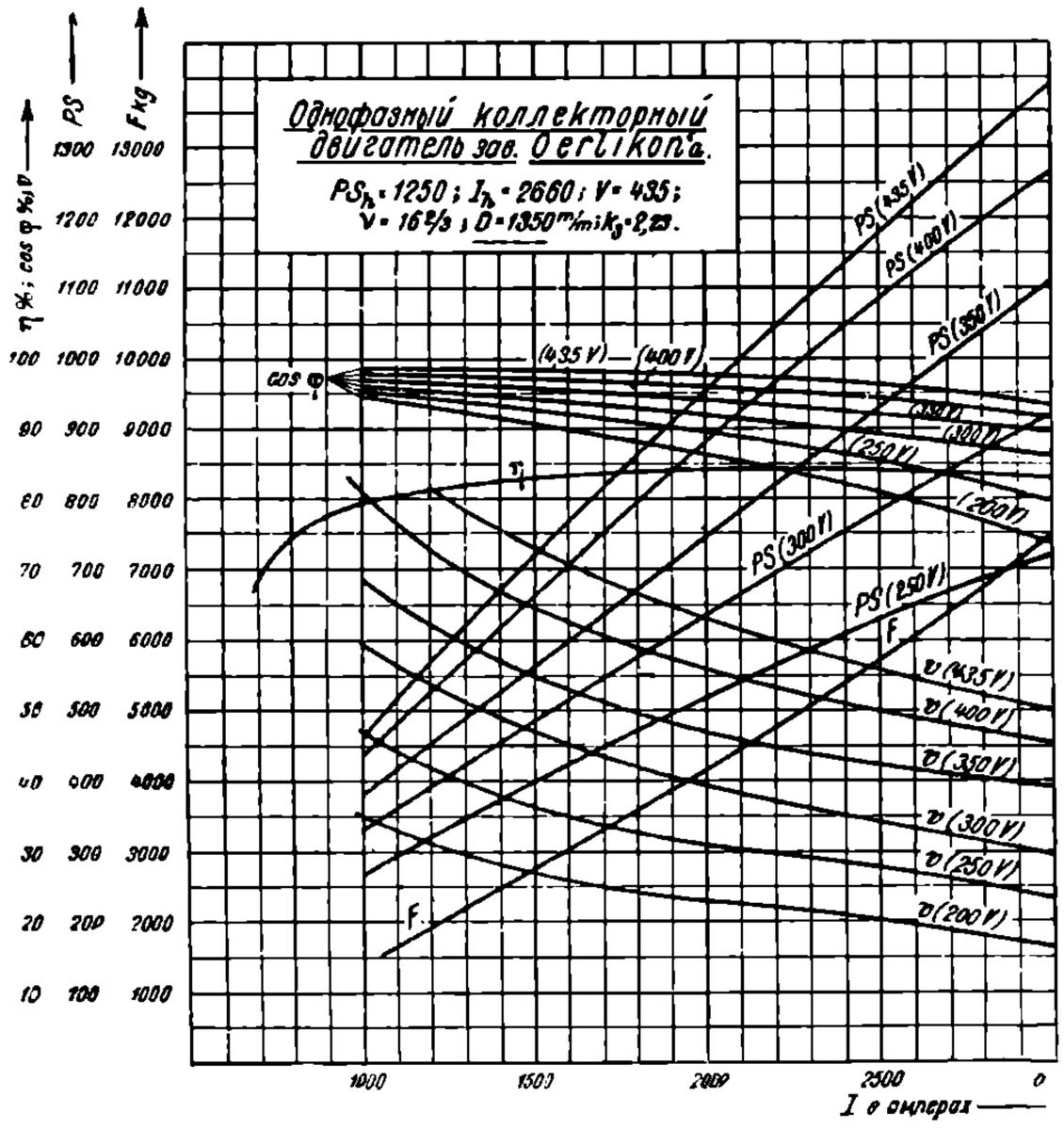


Рис. 76. Тяговые характеристики однофазного последовательного коллекторного двигателя MFO часовой мощностью 1250 PS с учетом потерь в трансформаторе.

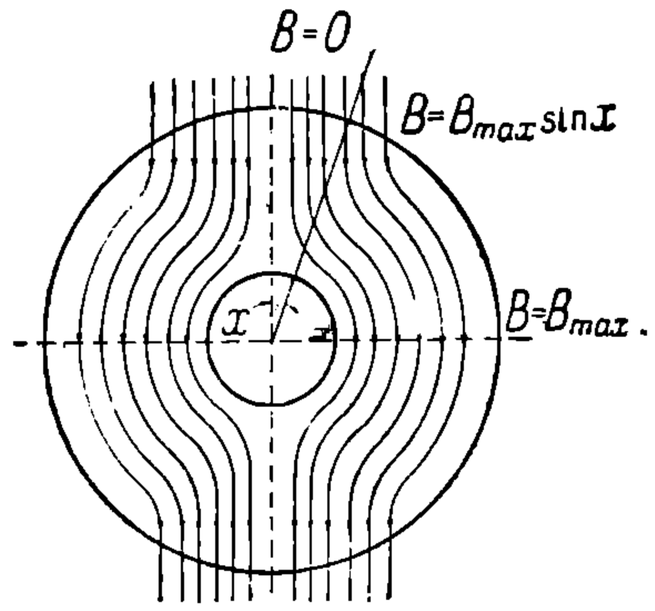


Рис. 77. Распределение индукции в железе однофазного последовательного двигателя.

постоянного тока. Ввиду этого они в большей мере приближаются к идеальным последовательным машинам.

При изучении потерь у коллекторных однофазных машин следует обратить внимание на потери в железе. Они состоят из роторных и статорных потерь. Последние подчиняются общим законам, и определение их не встречает особых затруднений. Гораздо сложнее

НБ УДУНТ (ДІІТ)

обстоит дело с потерями в роторе. На рис. 77 приведена картина распределения магнитного поля по сечениям железа ротора. В сечении, перпендикулярном к направлению магнитных линий, получается наибольшая индукция; в положении, сдвинутом на 90°, она равна нулю. Если принять указанное изменение индукций по отдельным сечениям в зависимости от угла их наклона подчиняющимся синусоидальному закону, то средние потери на токи Фуко и гистерезис могут быть определены выражениями:

$$P_{\Phi} = k_{\Phi} B^2_{max} \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 x \, dx = 0{,}5 \, k_{\Phi} \, B^2_{max}, \tag{23}$$

$$P_г = k_г B^{1{,}6}_{max} \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^{1{,}6} x \, dx \cong 0{,}55 \, k_г B^{1{,}6}_{max}, \tag{24}$$

где k_{Φ} и $k_г$ — постоянные, зависящие от типа машин.

При вращении ротора эти потери начинают меняться в зависимости от скорости. В случае однофазного пульсирующего поля, являющегося характерным для последовательных двигателей, потери могут быть представлены в виде:

$$P_{\Phi} = 0{,}25 \, k_{\Phi} B^2_{max} \left[\left(1 + \frac{\nu_в}{\nu} \right)^2 + \left(1 - \frac{\nu_в}{\nu} \right)^2 \right], \tag{25}$$

$$P_г = 0{,}275 \, k_г \, B^{1{,}6}_{max} \left[\pm \left(1 - \frac{\nu_в}{\nu} \right) + \left(1 + \frac{\nu_в}{\nu} \right) \right]. \tag{26}$$

В последнем выражении, данном Radt'ом, нужно брать тот из двух знаков, который первое выражение делает положительным (Л. 56).

Магнитные потери репульсионных двигателей, а также и двигателей двойного питания, работающих в общем случае с эллиптическим полем, подчиняются законам, присущим полям этого типа (Л. 56).

Коэфициент полезного действия у коллекторных двигателей нормально оказывается значительно ниже, чем у двигателей постоянного тока. Объясняется это увеличением магнитных потерь, возрастанием механических и электрических потерь, вызываемых щетками, а также и повышением коммутационных потерь.

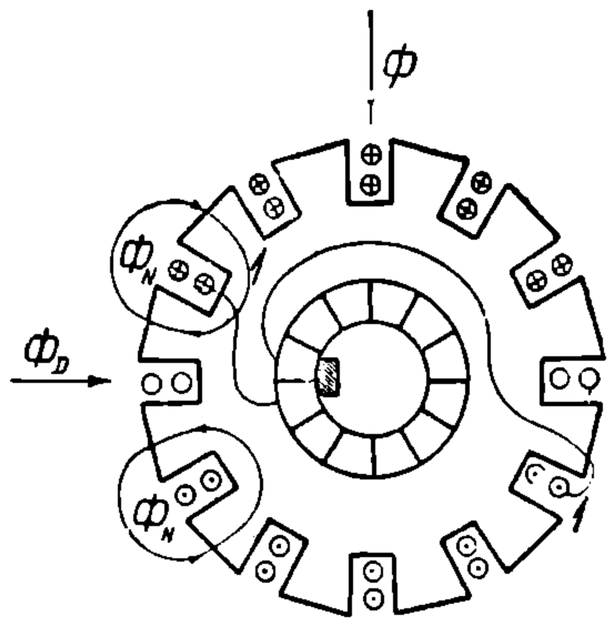


Рис. 78. Схема коммутации однофазного коллекторного двигателя.

8. Процесс коммутации однофазных коллекторных двигателей.

Схема коммутирования однофазных коллекторных двигателей приведена на рис. 78. Как известно, процесс коммутации характеризуется тем, что за ее период ток в каждом проводнике, проходящем зону коммутации, меняет свое направление. Если, например, направление тока в проводнике до подхода к зоне коммутации охарактеризовано крестом, то после окончания коммутирующего процесса вместо креста должна быть точка. Таким же образом во время коммутации должно меняться и поле, создаваемое каждым коммутирующимся проводником. Если во впадинах имеется их несколько одновременно, то они образуют общее поле впадин Φ_N, которое при процессе коммутации в соответствии с токами в каждом проводнике также непрерывно претерпевает изменение. Указанное изменение поля Φ_N, естественно, должно сопровождаться образованием в витках, замыкаемых накоротко щетками, э. д. с. Последняя носит название реактивной или искровой э. д. с. коммутации. В дальнейшем она будет обозначаться через Δe_N. Отметим, что искровая э. д. с. имеет место во всех коммутаторных машинах, независимо от того, машины ли это постоянного или переменного тока. В случае переменного тока только еще накладывается режим пульсации самого тока. На рис. 78 виток, замыкаемый накоротко щеткой, образуется проводниками 1 и 1′. Кроме э. д. с. Δe_N, при коммутации приходится считаться с возможностью образования в короткозамкнутом витке э. д. с. вращения от того потока, который находится в зоне коммутации.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Практически при коллекторных двигателях чаще всего здесь приходится иметь дело с потоком добавочных полюсов Φ_D.

Общее выражение для искровой э. д. с. может быть дано в виде:

$$\Delta e_N = \sqrt{2}\, S_к \frac{N}{2K} l_i v B_{N_{max}} 10^{-6} \qquad (27)$$

Здесь $S_к \frac{N}{2K}$ — число одновременно последовательно замкнутых щеткой витков, v — окружная скорость ротора и $B_{N_{max}}$ — эквивалентная индукция, вызываемая потоком Φ_N, окружающим впадину. По Арнольду (Л. 56), эта величина:

$$B_{N_{max}} = \frac{2\sqrt{2A}S\lambda_N t_1}{t_1 + b_d - \frac{a}{p}\beta_d}. \qquad (28)$$

В этом выражении λ_N означает эквивалентную магнитную проводимость впадины, t_1 — шаг зубцов, β_d и b_d — ширина пластины и ширина щетки, приведенные к периферии ротора. Поток Φ_N и индукция B_N определяются законом изменения тока ротора. Ввиду этого Δe_N во времени совпадает по фазе с током ротора.

Э. д. с., получаемая в короткозамкнутом витке, при вращении его в поле добавочных полюсов Φ_D или вообще во всяком другом поле, направленном по линии щеток, может быть представлена в виде:

$$\Delta e_D = \sqrt{2 S_к} \frac{N}{2K} l_i v B_{D_{max}} 10^{-6} \qquad (29)$$

Фаза данной э. д. с. зависит от $B_{D_{max}}$, представляющей индукцию в месте коммутирования витка. Если $B_{D_{max}}$ образуется добавочными полюсами, то Δe_D совпадает во времени с вектором тока. Направление же она может иметь или одинаковое с током, или обратное, в зависимости от включения зажимов обмотки добавочных полюсов. Направление выбирается с таким расчетом, чтобы она действовала напротив Δe_N и ее компенсировала.

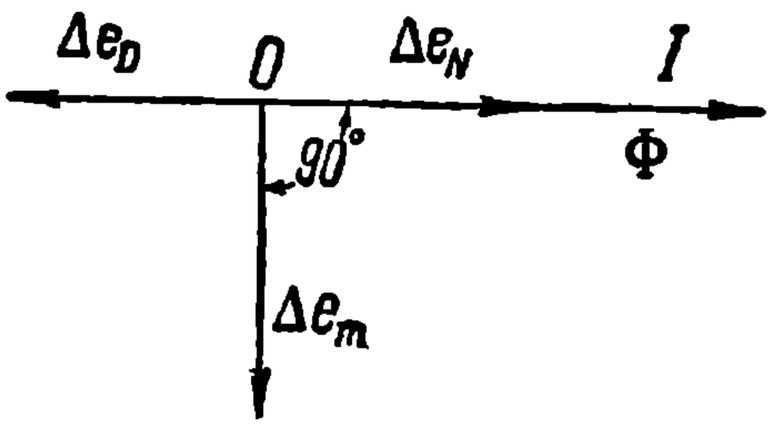


Рис. 79. Векторная диаграмма э. д. с., действующих в короткозамкнутых щетками витках однофазных последовательных коллекторных двигателей.

Кроме указанных э. д. с., однофазные коллекторные двигатели в короткозамкнутых витках имеют еще и э. д. с. пульсации от главного потока. Как показывает схема, поток Ф полностью пронизывает короткозамкнутый виток, в результате чего в нем появляется трансформаторная э. д. с. Значение ее можно представить в виде:

$$\Delta e_m = \sqrt{2}\,\pi\nu S_к \frac{N}{2K} \Phi_{max} 10^{-8}. \qquad (30)$$

Направление векторов трех разобранных э. д. с. во времени применительно к последовательному двигателю с нормальным включением добавочных полюсов представлено на рис. 79. Приведенная диаграмма дает благоприятную компенсацию искровой э. д. с. Последняя и Δe_D направлены навстречу друг другу. Подчинены они одному и тому же закону изменения, так как B_N и B_D определяются током ротора, и обе э. д. с. пропорциональны скорости. Ввиду этого достаточно скомпенсировать Δe_N и Δe_D для одной скорости, чтобы иметь практически хорошую компенсацию и для других. При пренебрежении насыщением можно считать компенсацию идеальной для всех режимов.

Значительно хуже обстоит вопрос с компенсированием э. д. с. трансформации. Фазы Δe_m и Δe_D имеют угол в 90°. При таких условиях даже частичная компенсация невозможна. В целях использования добавочных полюсов для борьбы с Δe_m приходится усложнить систему. Наиболее удачной схемой в этом отношении следует считать предложенную Behn-Eschenbourg'ом (рис. 80 и 81). Отличие ее от нормальной заключается только в том, что параллельно обмотке добавочных полюсов включено активное сопротивление. Благодаря этому ток ротора, подходя к цепи

НВ УДУНТ (ДІІТ)

добавочной обмотки, разветвляется на составляющие I_r и I_D, из которых первая во времени упреждает его, вторая от него отстает. Полученную таким образом Δe_D можно разложить на $\Delta e'_D$ и $\Delta e''_D$. Из них первая компенсирует Δe_N, а вторая Δe_m.

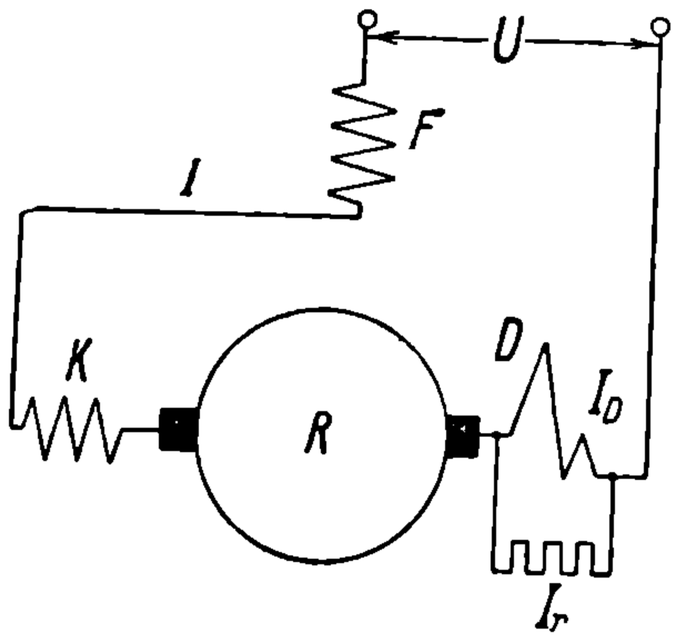


Рис. 80. Схема включения добавочных полюсов по системе Behn-Eschenbourg'a.

Недостаток системы Behn-Eschenbourg'a в том, что э. д. с. пульсации может быть компенсирована только при каком-либо одном режиме. Объясняется это различием в закономерности изменения Δe_m и $\Delta e''_D$

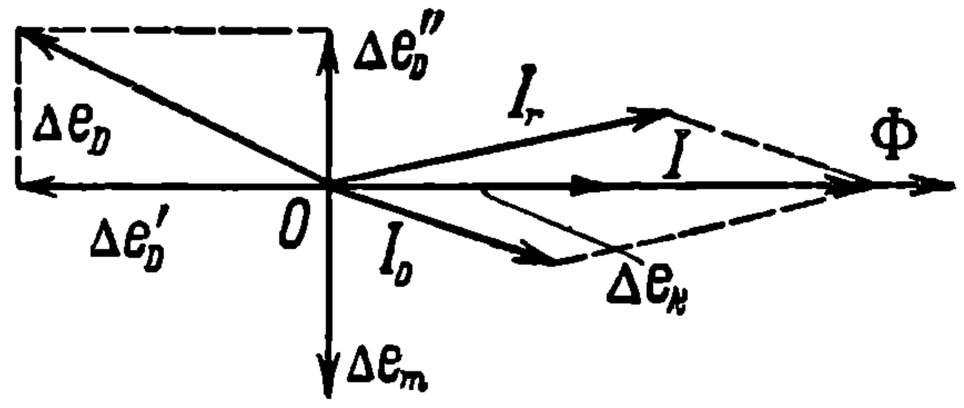


Рис. 81. Векторная диаграмма э. д. с., действующих в короткозамкнутых витках при коммутации по схеме Behn-Eschenbourg'a.

Первая не зависит от скорости, вторая же прямо ей пропорциональна. Обычно полную компенсацию делают для средних режимов работы. Что касается компенсирования Δe_N, то она подчинена такому же закону изменения, как и $\Delta e'_D$, и потому компенсирование здесь получается удовлетворительное для всех режимов.

Из других схем, преследующих ту же цель — компенсировать одновременно Δe_N и Δe_m, следует обратить внимание на последовательно-параллельное включение обмотки добавочных полюсов (рис. 82). Здесь по обмотке добавочных полюсов проходят главный ток I и добавочный I_d, обусловливаемый приложенным напряжением сети U_D (рис. 83). Токи I и I_d создают результирующий поток Φ_D Если пренебречь падением напряжения в цепи добавочных полюсов, то напряжение U_D должно уравновешиваться э. д. с. самоиндукции их обмотки E_D, образуемой ре-

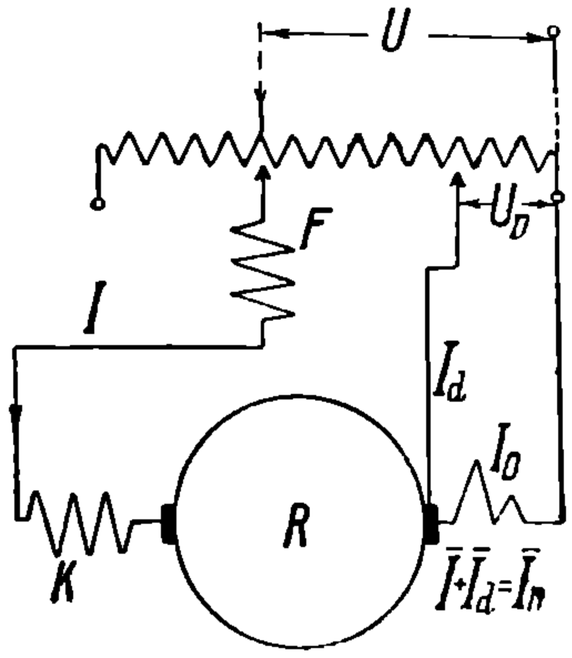


Рис. 82. Схема коммутации коллекторного последовательного двигателя при смешанном питании добавочных полюсов.

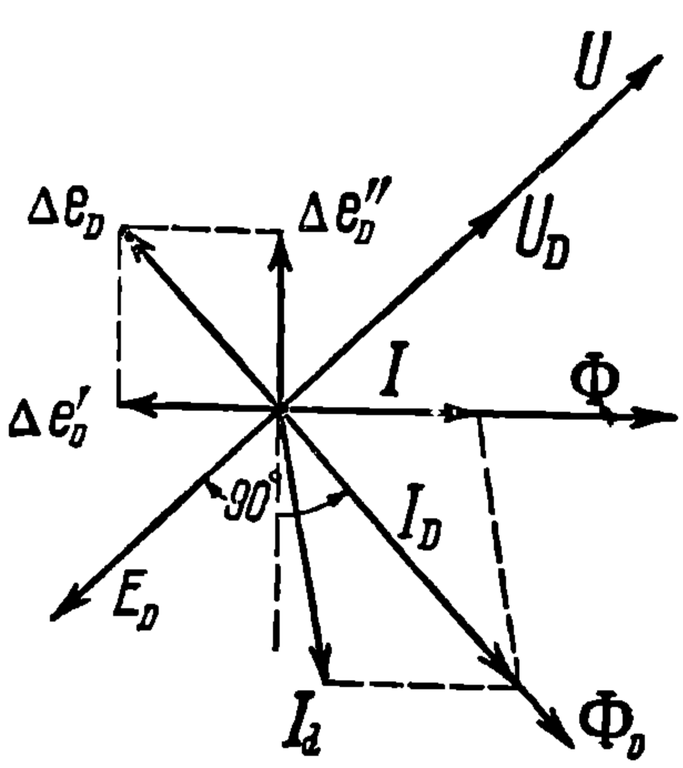


Рис. 83. Векторная диаграмма э. л. с, коммутации при смешанном питании добавочных полюсов.

зультирующим полем Φ_D. Это дает возможность установить фазу потока Φ_D. Последний должен упреждать образуемую им E_D на угол в 90°. В результате э. д. с. добавочных полюсов Δe_D здесь, как и в схеме Behn-Eschenbourg'a, дает составляющие, компенсирующие Δe_N и Δe_m

Основные недостатки у этой схемы такие же, как и у предыдущей. Компенсировать Δe_m можно только при одном режиме. Искровая э. д. с. Δe_N и здесь компен-

НБ УИУНТ (ДІІТ)

сируется достаточно удовлетворительно, хотя участие в ее компенсации составляющей тока I_d, совпадающей с I, несколько осложняет процесс, так как I_d и I подчинены различной закономерности. Некоторое улучшение в отношении регулирования рассматриваемой системы может дать включение катушки переменной самоиндукции L (рис. 84). При включении ее получается новая э. д. с. $I_d x_L$. Как показано на рис. 85, эта э. д. с. дает возможность сдвигать фазу E_D относительно U_D и тем самым подбирать такое соотношение отдельных векторов, которое является наиболее благоприятным для коммутирования.

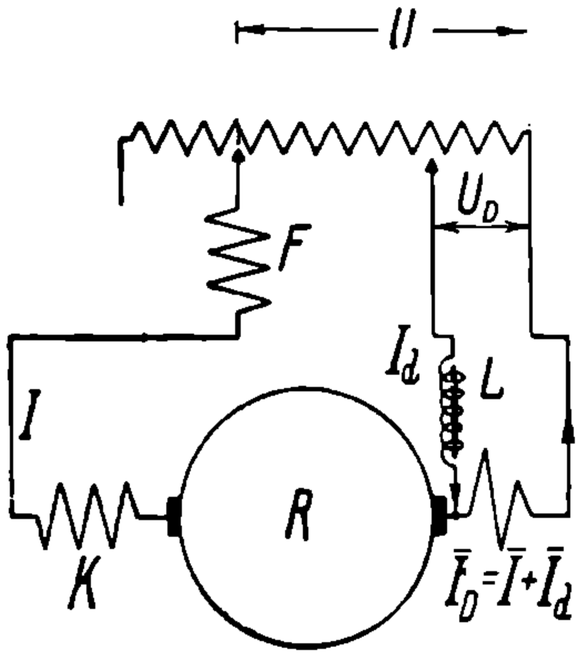


Рис. 84. Схема смешанного возбуждения добавочных полюсов с введением переменной самоиндукции.

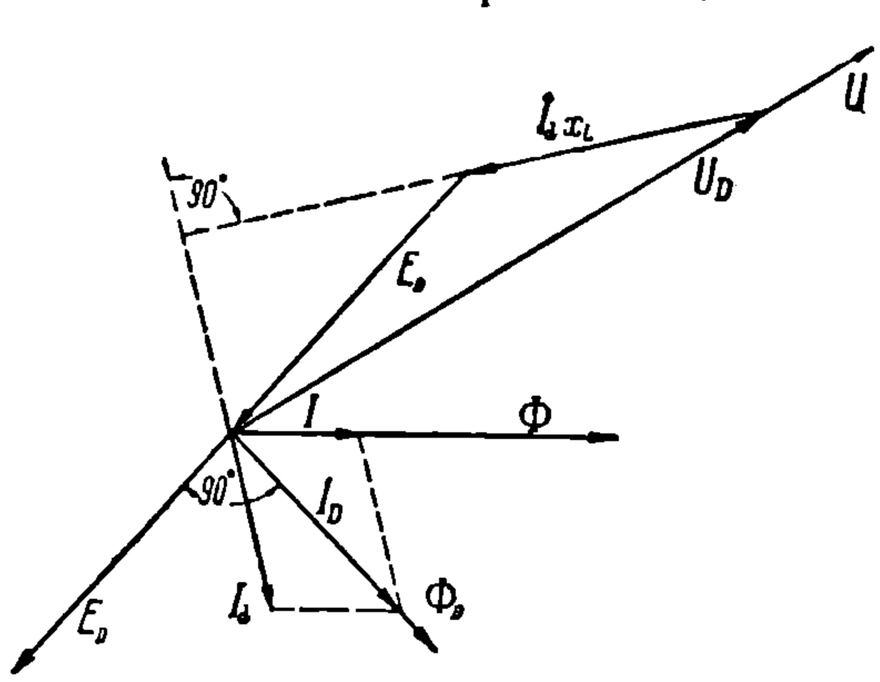


Рис. 85. Векторная диаграмма коммутации при смешанном питании добавочных полюсов при переменной самоиндукции.

Вариантом только что разобранной системы может служить применение для добавочных полюсов двух отдельных обмоток, из которых одна является нормальной, включенной последовательно с ротором, а вторая — шунтовой, приключаемой к напряжению сети (Л. 56).

Совершенно особый способ борьбы с э. д. с. пульсации предложил Lamme (рис. 86). По его идее в провода, соединяющие проводники обмотки ротора с коллекторными пластинами вставляются добавочные сопротивления. В результате этого цепь короткозамкнутых витков получает большое сопротивление, и этим самым ослабляется эффект, обусловливаемый Δe_N и Δe_m. Преимущество этой схемы в том, что она одинаково радикально действует как при пуске в ход машины, так и при каких угодно скоростях. В этом отношении она имеет значительное преимущество перед всеми схемами добавочных полюсов. Недостаток ее — в дополнительных потерях, вызываемых прохождением тока через сопротивления r.

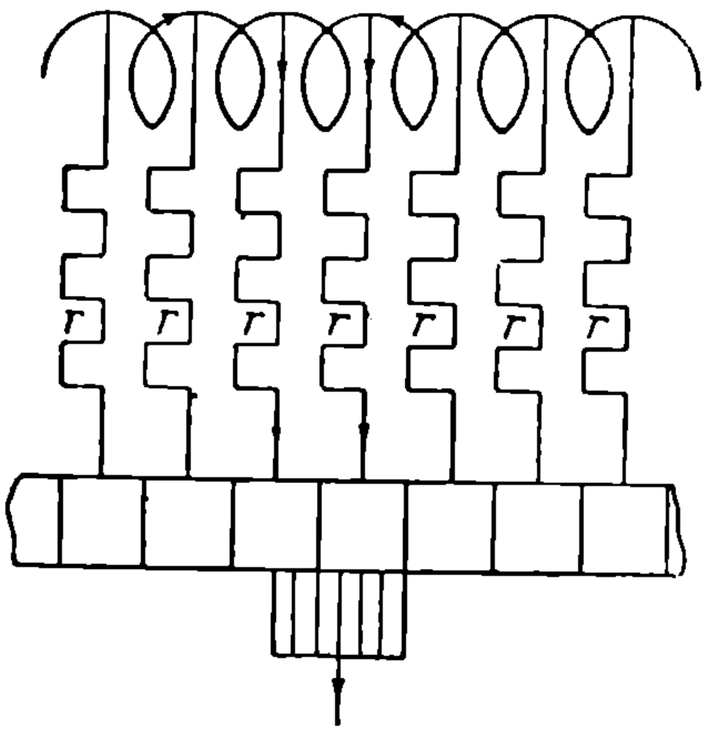


Рис. 86. Схема коммутации по системе Lamme.

В отношении выполнения этих сопротивлений существуют различные методы. Наиболее распространенный метод — выполнять их в виде тонкой проволоки высокого сопротивления, прокладываемой внизу тех же впадин, которые служат и для основных обмоток. Иначе решает этот вопрос BBC. Эта фирма делает сопротивления в виде пластин, помещаемых между коллектором и ротором.

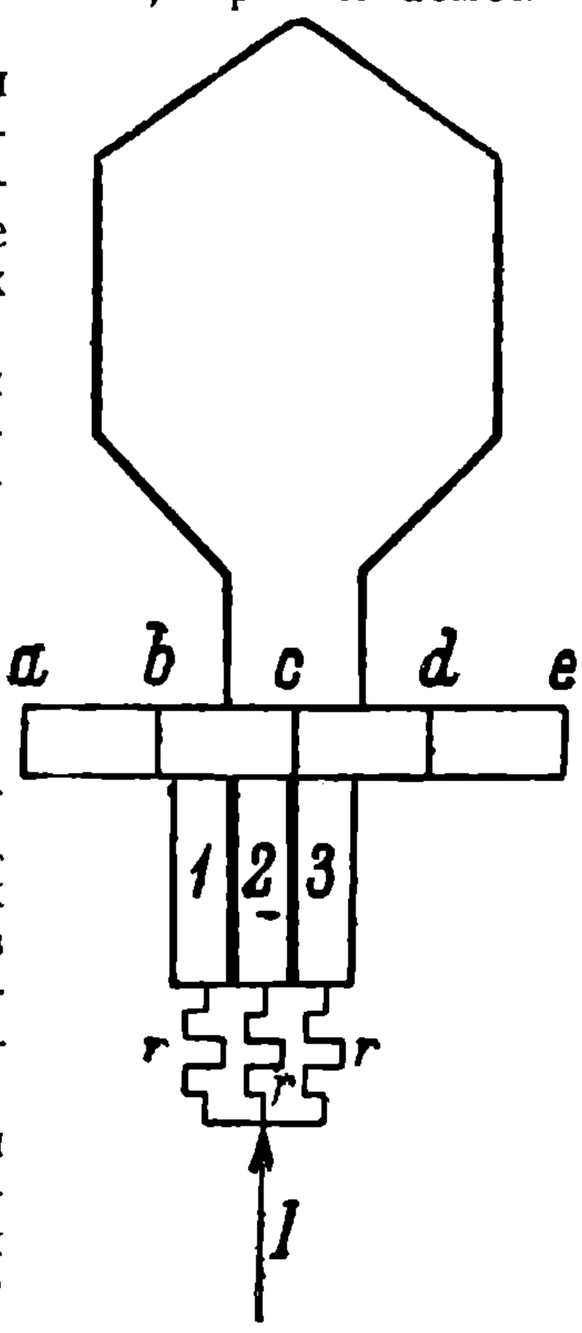


Рис. 87. Схема коммутации при слоистых щетках.

Кроме метода Lamme, в настоящее время для улучшения коммутации начинает рекомендоваться другой способ, близкий к нему по своей основной идее. Бази-

НВ УЛУНТ (ДІІТ)

руется он на применении так называемых слоистых щеток (рис. 87). Как видно из приведенной схемы, в данном случае щетка подразделяется на ряд отдельных элементов с относительно небольшой шириной каждого. На рис. 87 взяты три элемента 1, 2 и 3, но, вообще говоря, их можно взять и большее количество. Элементы отделяются друг от друга слоем изоляции, например бакелитом, и плотно сжимаются поперечными болтами.

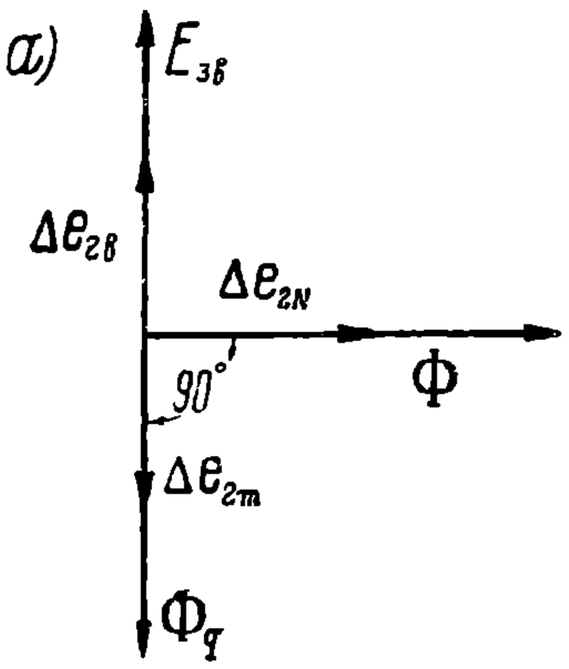


Рис. 88-a. Векторная диаграмма э д. с. в короткозамкнутых щетками витках репульсионных двигателей.



Рис. 88-b. Векторная диаграмма э.д.с. получаемых в витках, замыкаемых накоротко возбудительными щетками репульсионного двигателя с роторным возбуждением.

При такой конструкции щеток в цепь короткозамкнутого витка включается дополнительное сопротивление, состоящее из продольных элементов щеток и вспомогательных сопротивлений *r*. Принципиальным недостатком этой схемы является то, что при ней в моменты перекрытия отдельными элементами щеток двух соседних пластин получается частичное короткое замыкание витков. Этого можно было бы избежать только в том случае, если бы ширина элементов 1, 2, 3 была бы меньше ширины слоев изоляции между пластинами *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, что практически трудно осуществимо. Однако, процесс короткого замыкания в данном случае не является таким опасным, как при сплошной широкой щетке. Чем уже элементы 1, 2, 3, тем больше сопротивления они дают в поперечном направлении. На этом свойстве и основана идея рассмотренного метода. Потери в дополнительных сопротивлениях здесь также имеют место.

Переходя к процессу коммутирования репульсионных двигателей, приходится его исследовать путем учета влияния как главного потока Ф, так и поперечного Φ_q. Прежде всего следует рассмотреть процесс коммутирования короткозамкнутых щеток, являющихся необходимою принадлежностью всех типов репульсионных двигателей. В витках, замыкаемых накоротко этими щетками, индуктируется, помимо $\Delta e_{2т}$ э. д. с. пульсации от потока Ф, и э. д. с. вращения от потока Φ_q. Первая выражается согласно общей формуле (30), а вторая — по типу формулы (29). Переходя от индукций к потокам, последнюю формулу применительно к Φ_q можно представить в виде:

$$\Delta e_{2в} = \sqrt{2}\,\pi \nu_в S_к \frac{N}{2K} \Phi_{q_{max}} 10^{-8} \qquad (31)$$

При таких условиях, если учесть выражение (18), можно получить отношение:

$$\Delta e_{2в} = \left| \frac{\nu_в}{\nu} \right|^2 \Delta e_{2т} . \qquad (32)$$

Расположение во времени векторов Δe_{2N}, $\Delta e_{2т}$ и $\Delta e_{2в}$ при допущении $\gamma = 0$ дано на рис. 88-a. Вектор $\Delta e_{2в}$, как образуемый вращением витка в поле Φ_q, должен совпадать с линией этого потока. Что касается направлений $\Delta e_{2в}$ и $\Delta e_{2т}$ друг относительно друга, то они таковы же, как и направления $E_{зв}$ и $E_{зп}$ в репульсионных двигателях с роторным возбуждением, о которых была речь выше. По своему характеру $\Delta e_{2в}$ аналогична $E_{зв}$ и $\Delta e_{2т}$ аналогична $E_{зп}$. Отсюда следует, что $\Delta e_{2в}$ и $\Delta e_{2т}$ должны действовать навстречу друг другу.

Наиболее благоприятны условия коммутирования для рассматриваемых щеток при синхронной скорости. Выражение (32) показывает, что в этом случае $\Delta e_{2в}$ равна $\Delta e_{2т}$ и остается только одна э. д. с. Δe_{2N}.

Для щеток возбуждения, имеющихся у репульсионных двигателей с роторным возбуждением, картина коммутирования получается иная. Помимо э. д. с. искровой здесь образуется э. д. с. пульсации от потока Φ_q и э. д. с. вращения от потока Ф (рис. 88-b).

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Первая имеет выражение:

$$\Delta e_{3m} = \sqrt{2}\pi\nu S_к \frac{N}{2K} \Phi_{q_{max}} 10^{-8}. \quad (33)$$

По фазе эта э. д. с. должна отставать от потока Φ_q на 90°.

Вторая:

$$\Delta e_{3в} = \sqrt{2}\pi\nu_в S_к \frac{N}{2K} \Phi_{max} 10^{-8}. \quad (34)$$

Направление $\Delta e_в$ во времени удобней всего установить, исходя из уже построенной э. д. с. E_2 (рис. 60). Если принять во внимание, что направления $\Delta e_{3в}$ и $E_{2в}$ должны совпадать, как образуемые одним и тем же эффектом вращения в поле Ф, и учесть соотношение (18), то при всех режимах (рис. 88-b) должна получаться полная взаимная компенсация Δe_{3m} и $\Delta e_{3в}$. Таким образом, щетки возбуждения находятся в благоприятных условиях в отношении коммутирования. Здесь приходится иметь дело только с искровой э. д. с.

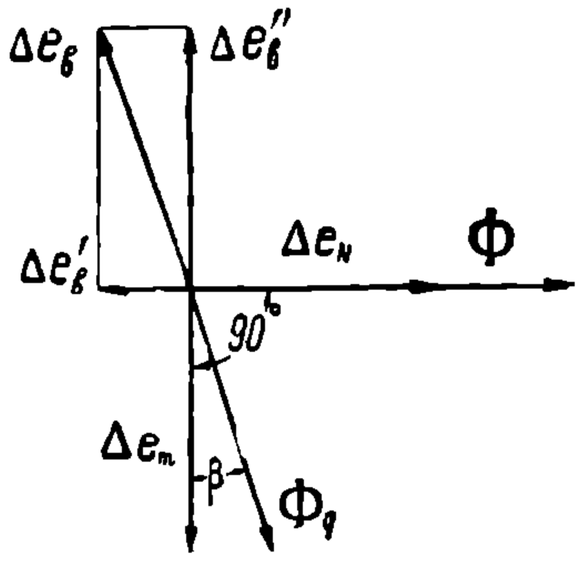


Рис. 89. Векторная диаграмма коммутации коллекторного двигателя двойного питания.

Репульсионные двигатели нормально работают без добавочных полюсов. Это объясняется тем, что в них добавочные поля приходится создавать в зоне, где проходят мощные основные потоки Ф и Φ_q. Вытеснить эти потоки из зоны коммутации и заменить их добавочными полями практически не представляется возможным. Вообще следует сделать заключение, что коммутирование тока в репульсионных двигателях находится в тяжелых условиях и становится более или менее удовлетворительным при скоростях синхронных или близких к ним. Однако, и при этих скоростях искровые э. д. с. оказываются некомпенсированными.

Более благоприятными получаются условия коммутирования в двигателях двойного питания (рис. 89). В короткозамкнутых секциях здесь индуктируются такие же э. д. с., как у репульсионных двигателей с короткозамкнутыми щетками, но здесь можно регулировать поток Φ_q, зависящий от величины напряжения U_1 (рис. 63). Как показывают выражения (30) и (31), для взаимной компенсации Δe_m и $\Delta e_в$, аналогичной здесь $\Delta e_{2в}$, необходимо соблюсти равенство:

$$\nu_в \Phi_q = \nu \Phi. \quad (35)$$

Поток Φ_q образуется под действием U_1. Пренебрегая падениями напряжения в обмотке компенсации:

$$E_m \cong U'_1 \cong \sqrt{2}\pi\nu f_2 W_2 \Phi_{q_{max}} 10^{-8} \quad (36)$$

С другой стороны, как показывает диаграмма (рис. 63), приближенно можно считать, что э. д. с. вращения $E_в$ уравновешивается полным напряжением сети:

$$E_в \cong U \cong \sqrt{2}\pi\nu_в f_2 W_2 \Phi_{max} 10^{-8} \quad (37)$$

Отсюда, для соблюдения равенства (35), необходимо иметь соотношение напряжений U'_1 и U, подчиняющееся условию:

$$U_1' = U\left(\frac{\nu}{\nu_в}\right)^2 \quad (38)$$

Данное выражение показывает, что для взаимного компенсирования Δe_m и $\Delta e_в$ требуется с изменением скорости непрерывно менять U_1.

Диаграмма э. д. с. коммутирования для двигателей двойного питания приведена на рис. 89. Из нее следует, что э. д. с. $\Delta e_в$ участвует в компенсации Δe_m своей составляющей $\Delta e''_в$ и в компенсировании Δe_N — составляющей $\Delta e'_в$. Последняя ввиду малого значения угла β обычно недостаточна для полной компенсации Δe_N.

Общее заключение в отношении двигателей двойного питания таково, что особых преимуществ эта система не имеет. Регулировка компенсации требует непрерывного изменения напряжения U_1, что практически для всех режимов осуществить не представляется возможным. Кроме того, и с компенсацией искровой э. д. с. получается также осложнение.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Произведенное рассмотрение процесса коммутирования коллекторных двигателей показывает, что оно протекает в тяжелых условиях. Более удовлетворительно обстоит дело с напряжением между коллекторными пластинами. Объясняется это применением для коллекторных двигателей трансформаторов, понижающих подводимое к коллектору напряжение, благодаря чему двигатели удается строить на относительно небольшие напряжения. Кроме того, в коллекторных двигателях, работающих с компенсационными обмотками, не приходится бояться реакции ротора, а также для них не так опасны и отрывы токоприемника от провода, так как машина уже сама по себе приспособлена к работе с переменным током. Она не имеет активных сплошных железных частей, и потому в процессах переходных режимов не приходится опасаться токов Фуко, сильно осложняющих эти процессы.

9. Основные расчетные данные коллекторных однофазных двигателей.

При рассмотрении общей теории коллекторных однофазных двигателей было выяснено, что их коммутирование протекает в тяжелых условиях. Главною причиною этого, как было указано, является э. д. с. трансформации, возникающая в короткозамкнутых щетками секциях. Значение этой э. д. с. настолько велико, что ее принято вводить в расчет коллекторных однофазных машин, как основной фактор. При такой постановке вопроса выражение мощности машин $P_м$ можно получить на основании следующих выкладок:

$$P_м = E\, I_2 \cos(E\, I_2)\, 10^{-3}\,\text{kW};$$

$$E_в = \sqrt{2}\,\pi\,\nu_в\, f_2 W_2\, \Phi_{max}\, 10^{-8}$$

или

$$E_в = 2\sqrt{2}\,\frac{pn}{60}\,\frac{N}{4a}\,\Phi_{max}\,10^{-8}.$$

С другой стороны, согласно выражению (30):

$$\Delta e_m = \sqrt{2}\,\pi\,\nu\, S_к\,\frac{N}{2K}\,\Phi_{max}\,10^{-8}.$$

Так как при ширине щетки b и ширине коллекторной пластины β — $S_к \cong \frac{b}{\beta}\,\frac{p}{a}$

$$\Delta e_m = \sqrt{2}\,\pi\,\nu\,\frac{b}{\beta}\,\frac{p}{a}\,\frac{N}{zK}\,\Phi_{max}\,10^{-8}$$

Отсюда, определяя $E_в$ через Δe_m и принимая $\cos(E_в I_2) \cong 1$, мощность можно выразить соотношением:

$$P_м \cong \frac{\Delta e_m I_2 K n \beta}{10^3 \times 60\,\pi\,\nu\, b}\,\text{kW}. \tag{39}$$

Для момента на основании того же метода получается выражение:

$$M \cong \frac{\Delta e_m I_2 K \beta}{2 \times 9{,}81\,\pi^2\,\nu\, b}\,\text{mkg}. \tag{40}$$

Соотношение (39 и 40) могут дать ответ на вопрос о влиянии важнейших расчетных величин на экономику производства машины. Предварительно необходимо указать, что значения Δe_m в однофазных коллекторных машинах не должны выходить из определенных весьма узких пределов. На основании опыта для двигателей, работающих без сопротивления Lamme, не рекомендуется брать его выше 3 — 3,5 V. Дальше следует иметь в виду, что с точки зрения экономики желательно для каждой заданной мощности иметь возможно малым ток I_2, что дает возможность брать меньшие сечения проводов.

Как показывают формулы (39) и (40), если принимать Δe_m равными предельным значениям, можно добиться понижения тока I_2 при $P_м = \text{const}$ прежде всего снижением первичной частоты, входящей в знаменатель приведенных формул. Частота оказывает существеннейшее влияние на размеры коллекторной машины, и этим объясняется, почему однофазные дороги работают на частотах 15—25 Hz. Вопрос о создании совершенного коллекторного двигателя на 50 Hz в настоящее время ждет еще пока своего разрешения.

Кроме частоты, как показывают формулы (39) и (40), для понижения тока выгодно брать как можно больше коллекторных пластин K. Поэтому современные тяговые

НВ УДУНТ (ДІІТ)

электродвигатели имеют нормально по одному витку на пластину, причем имеются даже двигатели, как, например, фирмы Bergmann'a, у которых на пластину взято всего только по полувитку. По той же причине у современных коллекторных однофазных двигателей обычно обмотки изготовляются с $a = p$. Дальнейший анализ формул показывает, что выгодно также иметь по возможности малое отношение ширины щетки b к ширине пластины β. В настоящее время чаще всего берут это отношение равным двум. Очень большое влияние на вес коллекторных двигателей, как и вообще электрических машин, оказывает число оборотов n, так как мощность растет пропорционально этому числу.

Если перейти теперь к отдельным системам коллекторных двигателей, то целесообразные соотношения расчетных величин наиболее просто можно выбрать у последовательных двигателей. Эта система непосредственно не связана никакими особыми условиями в отношении связи первичных частот со скоростями вращения. Последовательные двигатели могут работать одновременно и при низких частотах и при больших скоростях. В настоящее время считается наиболее выгодным иметь для них частоты $15—16^2/_3$ Hz и работать при скоростях значительно выше синхронных, с превышением их в три—четыре раза.

Гораздо сложнее обстоит вопрос с двигателями репульсионными. Благодаря вышеуказанным их свойствам, они и в отношении коммутации и в отношении к. п. д., а в случае роторного возбуждения и в отношении $\cos\varphi$ наиболее благоприятно работают при скоростях, близких к синхронным. Они как бы привязаны к синхронизму. Ввиду этого, работу их рационально подчинять соотношению

$$\nu = \frac{pn}{60} \tag{41}$$

Соблюдение этого равенства очень сильно осложняет расчет машины. Уменьшение ν, выгодное для двигателя, влечет за собою при заданном p уменьшение n, что для машины крайне невыгодно. Играть на величине p можно только в относительно узких пределах. В результате, для репульсионных двигателей по большей части не удается добиться выгодных соотношений ν и n. В отношении частоты считается, что для них наиболее целесообразна частота 25 Hz. На указанные обстоятельства одним из первых обратил внимание Ossanna. Он пришел к выводу, что репульсионные двигатели должны быть тяжелее последовательных, и что увеличение мощности их, начиная приблизительно с 300 PS, мало влияет на понижение весового их коэфициента. Предельную мощность для репульсионных двигателей при $\nu = 25$ Hz Ossanna определил в 1000 PS и при $\nu = 15$ в 800 PS. Для последовательного же двигателя он дал 2000 PS. Последующая практика строительства в основе подтвердила точку зрения Ossann'ы. Двигатели репульсионные не строились на мощность выше 800 PS. Двигатели же последовательные доведены до 3000 PS. Теперь можно считать неоспоримым фактом, что репульсионные двигатели менее выгодны. Подтверждением этому может служить вся практика последних лет строительства однофазных дорог. В настоящее время репульсионные двигатели совершенно вытеснены последовательными. Двигатели двойного питания теперь также почти совсем не применяются. Хотя эта система по своим расчетным соотношениям близка к последовательным, но она, не имея значительных преимуществ, сложней последних в отношении схемы включения и регулировки, чем и объясняется относительно малое ее распространение.

При расчете однофазных последовательных двигателей большое внимание приходится уделять правильному выбору диаметра и длины железа ротора. При относительно больших мощностях, на которые по большей части строятся последовательные двигатели, следует стремиться брать по возможности большие по габариту длины роторов, что особенно подчеркивает в своей работе Müller.

Очень важное влияние оказывает на размеры двигателя правильный выбор числа полюсов. В коллекторных двигателях оно в значительной степени определяется трансформаторной э. д. с. коммутации. Чтобы не превысить допустимых норм для Δe_m, поток, приходящийся на каждую пару полюсов, необходимо соответственно ограничивать. В результате по подсчетам Müller'a мощность на каждую пару полюсов в коллекторных двигателях нормально не превосходит 50—60 PS. Примерный ряд Müller'a приведен в табл. 10.

Данные величины мощностей приведены для двигателей с одним витком на коллекторную пластину. При полувитке по данным Müller'a для $2p = 32$ можно

НТБ УГАЛУНТ (ДІІТ)

ТАБЛИЦА 10.

Нормальные мощности коллекторных двигателей при различных числах полюсов

$2p$	PS	n	Примечания
8	400	1000	Число оборотов определено по предельной допустимой окружной скорости ротора.
12	600	670	
16	800	500	
20	1000	400	
24	1200	333	
32	600	250	

получить мощность до 3000 PS, как это и имеет место в двигателях Bergmann'a.

В отношении напряжения на коллекторе для рассматриваемых двигателей имеют значение все соображения, приведенные в отделе двигателей постоянного тока. Но, кроме того, здесь имеются еще и добавочные факторы, диктующие понижение напряжения даже тогда, когда это по условиям общей экономики расчета невыгодно. Причина этого лежит.в той же э. д. с. трансформации. Ограничение величин магнитных потоков вызывает и ограничение э. д. с. вращения ротора, а как следствие этого—и напряжений сети. Нормально напряжение на коллекторе последовательных двигателей колеблется в пределах 250—350 V. Для больших мощностей эти напряжения не являются экономическими. Этим обстоятельством объясняется, почему фирма BBC повышает напряжения до 600—650 V, имея возможность это сделать, так как ее двигатели работают с добавочными коммутационными сопротивлениями Для репульсионных двигателей напряжения можно брать выше, чем для последовательных, доводя их до 800 V.

Обмотки роторов коллекторных однофазных двигателей делаются или петлеобразными, или волновыми при $a = p$. Широко распространено применение эквипотенциальных соединений (рис. 90). Для уменьшения потерь в меди на токи Фуко иногда применяют секции. состоящие из отдельных, по вертикали разделенных подсекций. В некоторых случаях для верхних и нижних проводов применяют разные профиля. Вверху сечение шире, а внизу уже. Благодаря этому получаются несколько лучшее использование периферии ротора и меньшие потери на токи Фуко в меди проводов, так как верхние, наиболее в этом отношении угрожаемые,

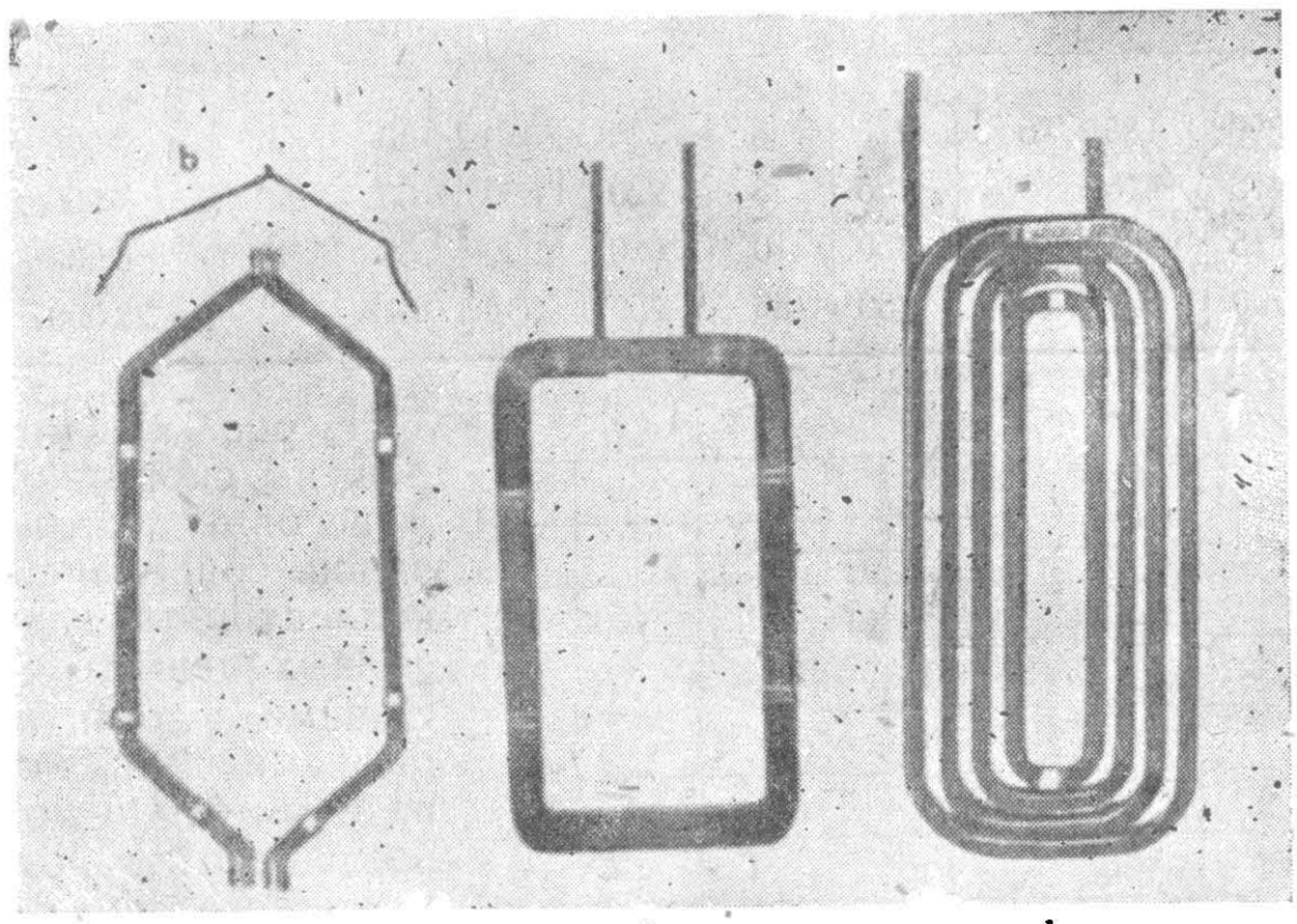


Рис. 90. Элементы обмоток коллекторных однофазных двигателей.
Обозначения:
a—виток роторной обмотки, *b*—эквипотенциональное оединение, *c*—катушка возбудительной обмотки, *d*—катушка обмотки компенсации.

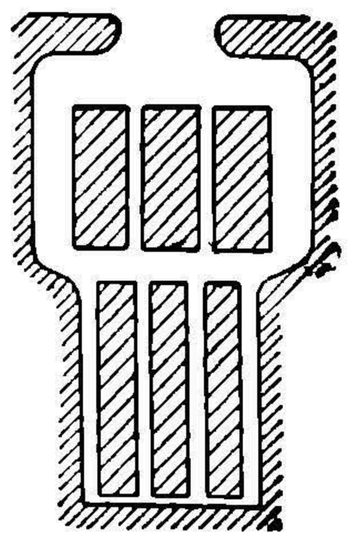


Рис. 91. Схема впадины для уменьшения потерь.

провода получают сечения с меньшей высотой (рис. 91). Изоляция обмоток коллекторных двигателей, особенно роторных, берется возможно высокого качества. Большое применение имеют композиции слюды. Очень часто применяется для обмотки проводов тонкая шелковая лента с обклейкой ее слюдой. Обмотки с хлопчатобумажной изоляцией часто компаундируются.

Из особенностей конструкции коллекторных двигателей следует отметить довольно распространенное применение скошенных зубцов Линия зубцов ориентируется не параллельно оси вала, а с наклоном к нему. Скос чаще всего берется

НВ УГУНТ (ДІТ)

на ширину одного деления зубцов. Появление указанной конструкции объясняется стремлением уменьшить высшие гармоники, вызываемые зубцами. Таблица 11 дает представление о влиянии скоса зубцов на процентное отношение амплитуд гармоник э. д. с. к напряжению на коллекторе.

Средние ориентировочные расчетные данные для коллекторных однофазных двигателей приведены в табл. 12.

ТАБЛИЦА 11.

Влияние скоса зубцов на гармоники.

PS_h	Тип	Опыт	Э.д.с. гармоник в % от U сети
450	ELM	Без скоса	2,00
То же	То же	Со скосом на 1 впадину	0,11

ТАБЛИЦА 12.

Основные расчетные параметры однофазных коллекторных двигателей.

Названия	Значения
Плотность тока ротора $S_я$ в A/mm²	3,5—5,5
Значения AS	350—500
Произведение $AS \times S_я$.	1 300—2 000
Индукция в междужелезном пространстве .	7 600—8 000
Междужелезное пространство в mm .	2,5—3
Трасформаторная э. д. с.	2—4
Наибольшая окружная скорость ротора в m/sec .	50—60
То же коллектора в m/sec .	40—45

Общие данные о современных коллекторных двигателях приведены в табл. 13.

ТАБЛИЦА 13.

Основные данные тяговых однофазных коллекторных двигателей.

Фирма	Тип	KW_h	KW_∞		U	$2p$	n_h	n_{max}	Окружная скорость		Вес в kg
									Ротор	Кол.	
AEG	Под. ос.	220	185	25	275	8	820	1 330	43	36	3 000
SSW	Под. ос.	475	415	$16^2/_3$	325	8	920	1 350	55	40	4 900
WASSEG	Сдвоенн.	575	465	$16^2/_3$	350	10	1 050	1 920	56	43	6 000
Bergmann	Рычажн.	2 200	1 650	$16^2/_3$	350	36	250	380	51	43	22 000

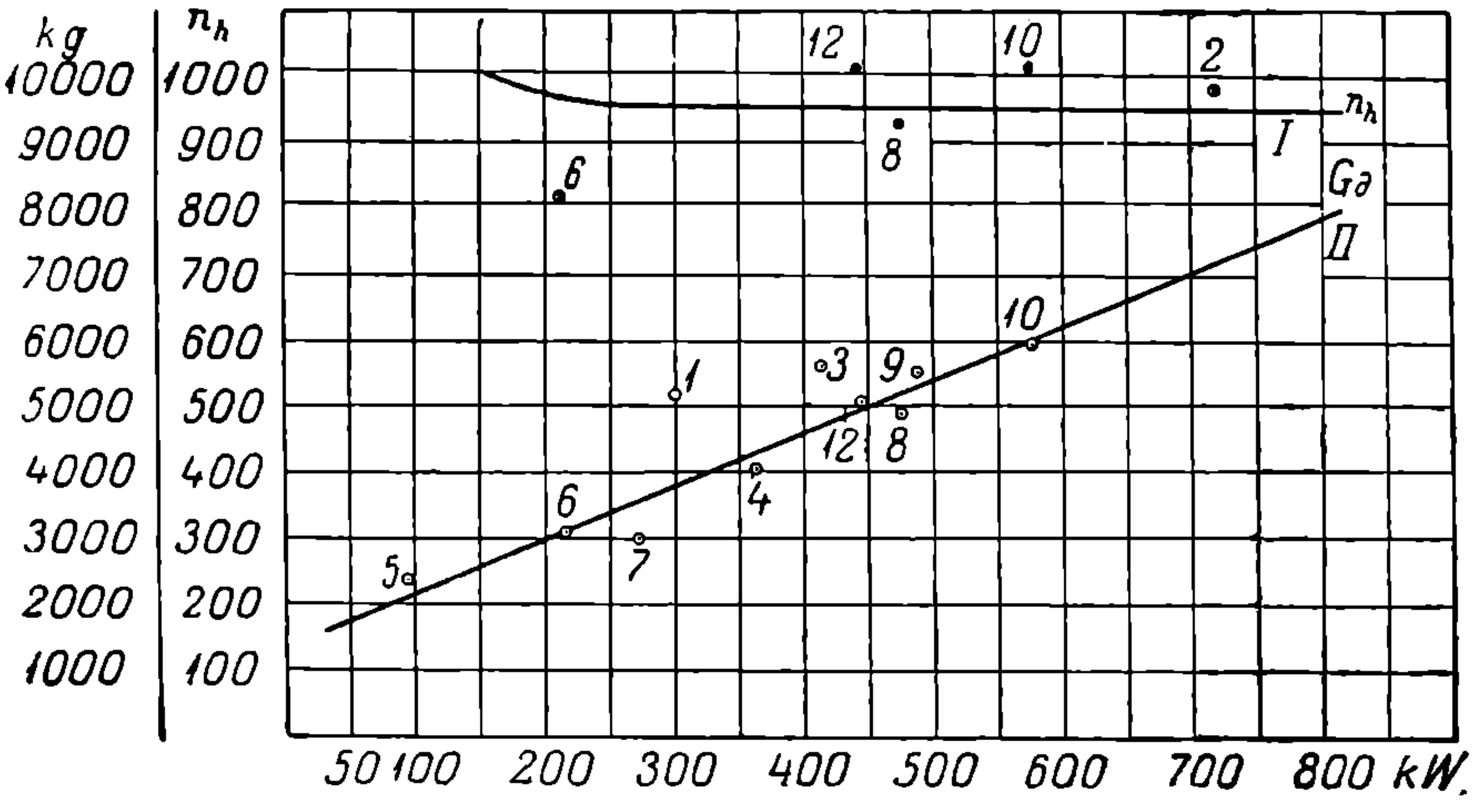


Рис. 92. Кривые чисел оборотов часового режима и весов коллекторных однофазных двигателей в зависимости от часовой мощности.

На рис. 92 изображены скоростные и весовые соотношения современных коллекторных однофазных двигателей. Одними и теми же цифрами здесь обозначены кружки, относящиеся к одному и тому же двигателю. Приведенные кривые показывают очень высокую быстроходность рассматриваемых двигателей. Только при таких условиях веса их удается удержать в нормах, близких к весам двигателей постоянного тока. Тихоходные коллекторные двигатели в настоящее время применяются значительно реже. Экономика их расчета базируется на применении высоких окружных скоростей за счет больших диаметров роторов и коллекторов.

НВ УГЛУНТ (ДІІТ)

Стоимость коллекторных двигателей нормально получается значительно выше стоимости двигателей постоянного тока. Объясняется это расходом меди на компенсационные обмотки, невыгодными с точки зрения экономики производства напряжениями на коллекторе, дорогим статорным железом и усложнениями в конструкции.

III. ТРЕХФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ.

1. Основные принципы работы асинхронных многофазных двигателей.

Как известно, основным условием работы многофазных асинхронных двигателей является наличие вращающего поля. Схема многофазной асинхронной машины применительно к трехфазной системе приведена на рис. 93. Статорные обмотки I, II и III тяговых асинхронных двигателей, как и вообще двигателей этой системы, могут включаться звездой и треугольником. Обмотки ротора выполняются или в виде фазных, подобно статорным, или в виде короткозамкнутых.

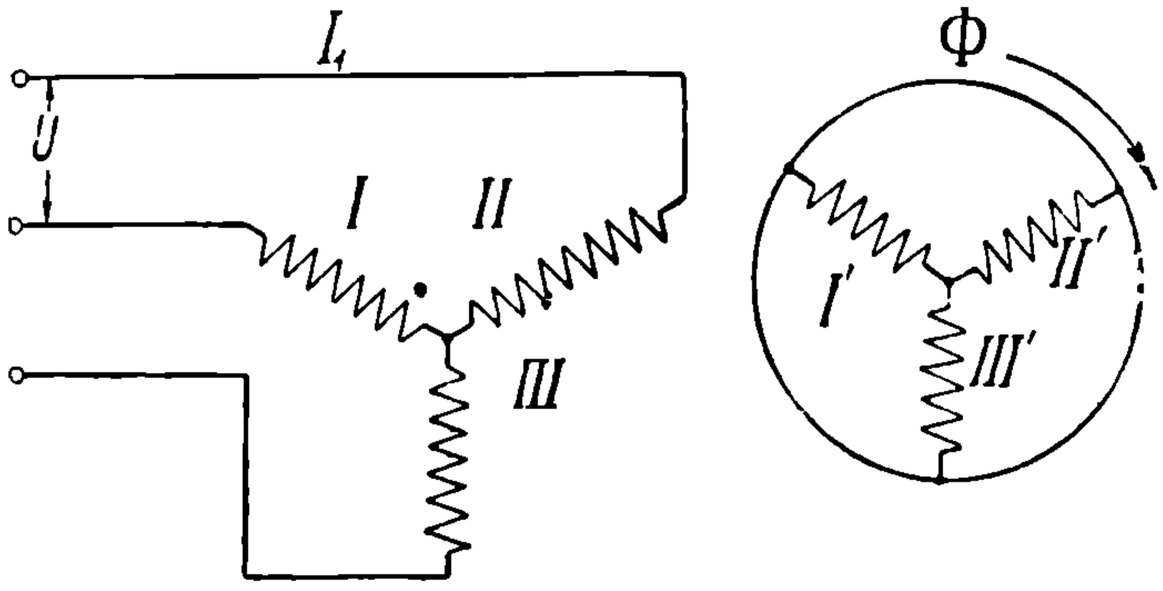


Рис. 93. Схема цепей трехфазного асинхронного двигателя

Вращающий момент асинхронных двигателей получается от взаимодействия вращающегося поля Ф с роторным током I_2. Поток Ф, перемещаясь в пространстве по периферии ротора, увлекает последний за собою. Ротор стремится вращаться с такою же скоростью, как и поток. Однако, в силу потерь и нагрузочных моментов, он отстает от поля и самостоятельно может вращаться только со скоростями ниже синхронной. Чем больше нагрузка, тем ниже скорость вращения ротора, тем больше, как говорят, его скольжение по отношению к потоку.

В дальнейшем, как это общепринято, скольжение ротора будет определяться выражением:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}, \tag{42}$$

где n_1—число оборотов вращения поля и n—число оборотов ротора.

При состоянии покоя $n = 0$ и $s = 1$. При синхронизме $n_1 = n$ и $s = 0$. При скоростях выше синхронных $n > n_1$ скольжение делается отрицательным Начиная с холостого хода до синхронизма и выше, можно достигать увеличения скоростей асинхронной машины только путем вращения ее посторонним механическим двигателем. Если машину вращать в обратном направлении против момента ее, как двигателя, то выражение для скольжения получает вид:

$$s = \frac{n_1 + n}{n_1}. \tag{43}$$

Диаграмма э.д.с. и напряжения. При вращении поток Ф перерезывает провода ротора и индуктирует в них э.д.с. E_{2s}. Чем больше скольжение, тем чаще режет поток провода ротора и тем больше э.д.с. При состоянии покоя э.д.с. статора и э.д.с. ротора, приведенная к числу витков статорной обмотки, равны. Для всякого другого режима между ними должно существовать соотношение:

$$E_{2s} = sE_1 = \sqrt{2}\pi s \nu_1 f_1 W_1 \Phi_{max} 10^{-8} \tag{44}$$

При изменении скорости вращения ротора частота э.д.с. E_{2s}, а следовательно, и роторного тока меняются. Роторная частота ν_2 зависит от числа перерезываний роторных витков Ф. Следовательно, она определяется скольжением, и выражение для нее должно иметь вид:

$$\nu_2 = \nu_1 s. \tag{45}$$

Под влиянием э.д.с. E_{2s} в роторе появляются ток I_2, подчиняющийся условию.

$$\bar{E}_{2s} = \bar{I}_2 r_2 + \bar{I}_2 x_{2s}. \tag{46}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Это выражение показывает, что в каждый данный момент э. д. с. ротора равняется геометрической сумме активного и реактивного падений напряжения, причем последнее так же, как и E_{2s}, зависит от скольжения, так как с изменением роторных частот меняется и x_{2s}, равное sx_2. При введении скольжения выражение (46) может быть изображено в виде:

$$\overline{E}'_{2s} = s\overline{E}_1 = \overline{I}'_2 r_2 + \overline{I}'_2 x'_{2s}.$$

Иначе оно может быть переписано:

$$\overline{E}'_2 = \overline{E}_1 = \overline{I}'_2 \frac{r_2'}{s} + \overline{I}'_2 x'_2. \cdot \qquad (47)$$

Здесь r'_2 и x'_2,— приведенные к статору активное и реактивное сопротивления ротора при состоянии покоя машины.

Анализ выражения (47) показывает, что работу асинхронной машины можно рассматривать как работу трансформатора, во вторичной обмотке которого активное сопротивление меняется по закону $\frac{r'_2}{s}$. При таких условиях диаграмма э. д. с. и напряжения асинхронной машины может быть изображена согласно рис. 94.

Рабочая диаграмма. Как показывает диаграмма (рис. 94), напряжение сети U создает намагничивающий ток I_2, дающий основной поток Ф, который отстает от него на гистерезисный угол α. Поток Ф производит в статоре э. д. с. самоиндукции E_1 и в роторе э. д. с. трансформации E_2. Последняя, как показывает формула (47), дает ток в роторе I_2 и уравновешивается составляющими $I_2 \frac{r_2}{s}$ и $I_2 x_2$. М. д. с. ротора вызывает компенсирующую м. д. с. в статоре, в результате чего там появляется рабочая составляющая тока I'_2, которая, складываясь с $I_в$, дает первичный ток I_1.

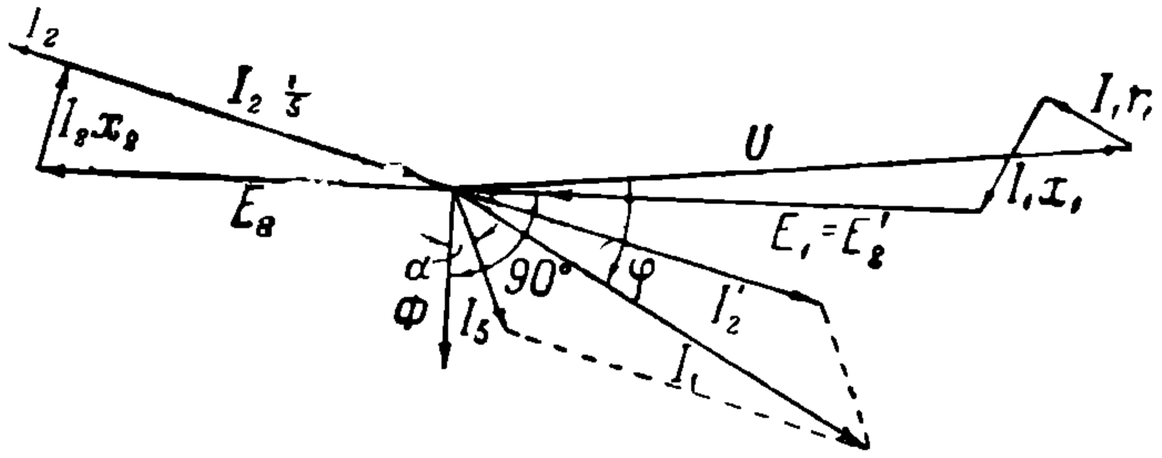


Рис. 94. Векторная диаграмма напряжения асинхронной многофазной машины.

В результате, напряжение сети в каждый данный момент уравновешивается геометрической суммой E_1, $I_1 r_1$ и $I_1 x_1$.

При изучении работы асинхронной машины очень удобно согласно теории La Cour'a (Л. 55), исходить из схемы замещения (рис. 95). Схема замещения имеет своим назначением упростить анализ работы машины. В частности, она преследует цель устранить электромагнитные связи-системы, как очень сильно осложняющие анализ, и заменить их соответственно подобранными непосредственными электрическими соединениями. Из рассмотрения приведенной схемы (рис. 95) видно, что она полностью отвечает сущности работы асинхронной машины. Если на ее основании построить диаграмму напряжений, то получится такая же диаграмма, как и построенная на базе действительной схемы включения обмоток машины, приведенная на рис. 94.

Из новых постоянных в схему замещения введена проводимость $Y_в$, характеризующая собою эффект намагничивания:

$$\dot{I}_в = \dot{E}_1 Y_в = \dot{E}'_2 Y_в.$$

На основании схемы замещения, эффект действия системы можно определить выражением:

$$\dot{i}_1 = \dot{U} Y_э = \frac{\dot{U}}{Z_э}. \qquad (47)$$

Здесь $Y_э$ и $Z_э$ — полные проводимость и сопротивление системы, эквивалентные по своему эффекту совокупности действия всех отдельных параметров схемы замещения. Значение $Z_э$ легко определяется из выражения:

$$Z_э = Z_1 + \frac{1}{Y_в + Y'_2}, \qquad (48)$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

где

$$Z_1 = r_1 \quad jx_1,$$

и

$$Y'_{2s} = \frac{1}{Z_{2s}} = \frac{1}{\frac{r_2'}{s} + jx'_2}.$$

Выражение (47) дает возможность установить диаграмму тока асинхронной машины. Очевидно, что при $U = \text{const}$ ток изменяется в зависимости от изменения $Y_в$.

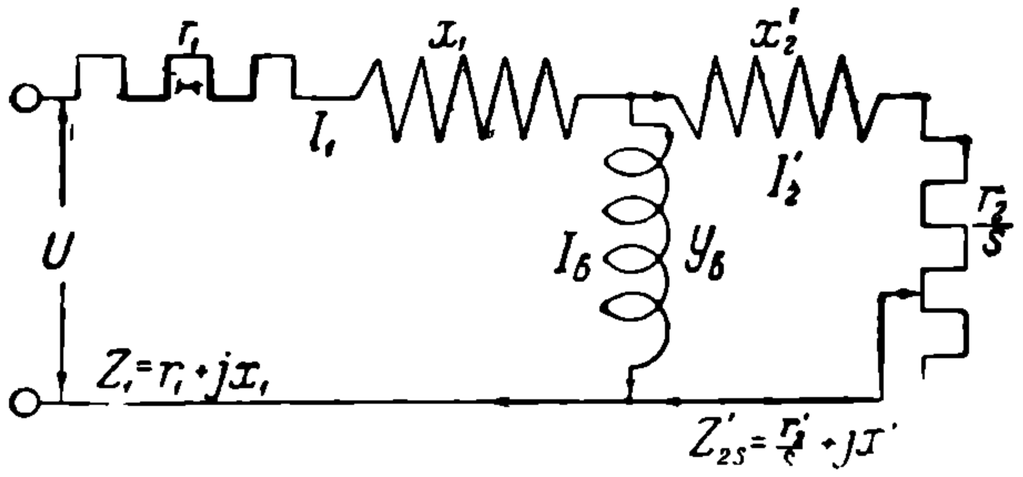


Рис. 95. Схема замещения цепей асинхронной многофазной машины.

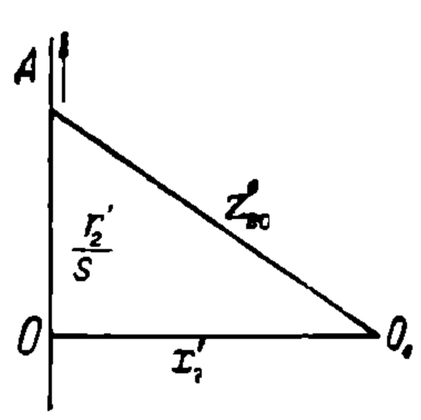


Рис. 96. Диаграмма изменения z'_{2s} в функции от скольжения.

значение которой определяется для каждой текущей точки работы скольжением s. Для получения вакона измеиения $Y_в$ очень удобно применить метод инверсии. Так как проводимости и соответствующие им сопротивления суть величины взаимно обратные, то для перехода на диаграммах от одной из них к другой нужно кривую геометрического места первой из них подвергать инверсии. Тогда кривая, полученная после инверсии, дает геометрическое место концов векторов второй.

Применяя указанный метод к схеме замещения, нужно за начальный этап построения взять Z'_{2s}. Как показывают значения z'_{2s} из рис. 95, геометрическое место концов векторов Z'_{2s} при изменении s должно определиться прямой OA (рис. 96). La Cour доказал, что путем ряда последовательных инверсий и геометрических сложений соответствующих проводимостей и сопротивлений можно получить в результате $Y_в$. Закон изменения последней, а следовательно и пропорциональной ей величины тока I_1, определяется для данной системы в виде окружности.

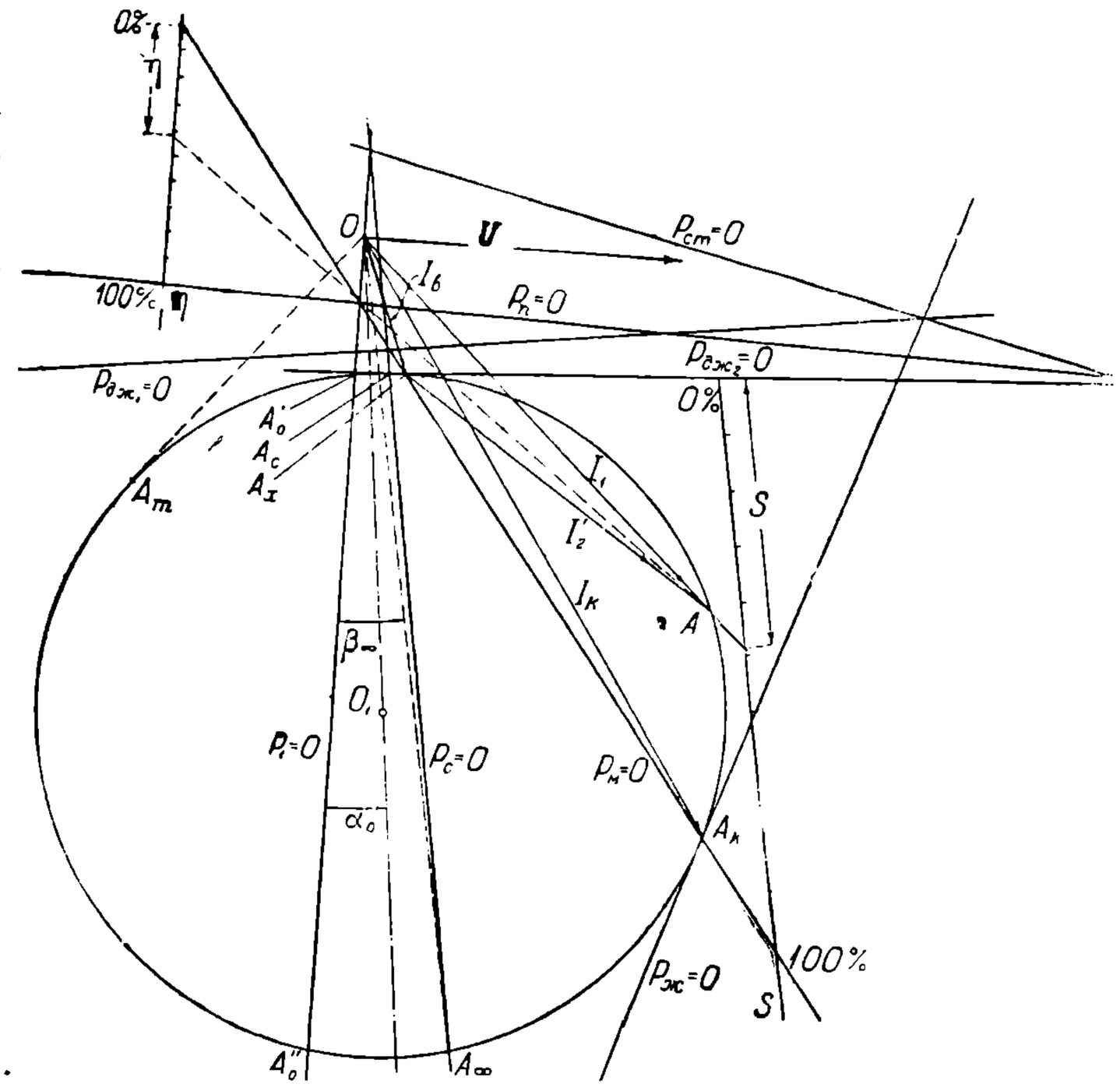


Рис. 97. Круговая рабочая диаграмма асинхронной многофазной машины при постоянном напряжении.

Окружность тока на основании данного метода представлена на рис. 97. Характерными точками на ней являются точка холостого хода машины A_x, близко лежа-

НБ УЛУНТ (ДІІТ)

щая к ней точка синхронной скорости A_c, точка покоя машины или, как говорят, короткого замыкания $A_к$ и точка бесконечно большой скорости A_∞. Мощности и потери машины, согласно теории La Cour'a, как и в выше разобранном случае однофазных коллекторных двигателей, определяются в соответственно установленных масштабах величинами перпендикуляров, опускаемых из концов векторов тока на специально построенные прямые.

Мощность многофазной асинхронной машины, подводимая от сети, при фазном выражении U, и при m_1 фазах на статоре выражается через $P_1 = m_1 U I_1 \cos\varphi$ и определяется прямой $P_1 = 0$

Мощность P_c, передаваемая на ротор и называемая обычно электромагнитной, при m_2 фазах ротора определяется выражением:

$$P_c = m_2 E_2 I_2 \cos(E_2 I_2) \tag{49}$$

или так как согласно рис. 94:

$$E_2 \cos(E_2 I_2) = \frac{I_2 r_2}{s},$$

$$P_c = \frac{m_2 I^2_2 r_2}{s}. \tag{50}$$

Прямая $P_c = 0$ должна быть проведена через точку синхронной скорости A_c и точку бесконечно большой скорости A_∞, так как в обеих этих точках P_c равна нулю. При синхронизме $\frac{r_2}{s} = \infty$ и ток $I_2 = 0$; при бесконечно большой скорости $\frac{r_2}{s} = 0$ и $\cos(E_2 I_2) = 0$. Электромагнитная мощность, передаваемая на ротор, является источником образования основного вращающего момента $M = \frac{P_c}{9{,}81\omega_1}$, где ω_1 — угловая скорость вращения поля При $\omega_1 = \text{const}$ прямая $P_c = 0$ может служить и для измерения величин моментов, а следовательно, и тяговых усилий, если тем или другим способом учесть потери на трение и потери в передаче. Ввиду этого мощность P_c часто называют моментом в синхронных ваттах.

Полезная или механическая мощность машины $P_м$ при пренебрежении потерями на трение равна P_c за вычетом потерь в меди ротора:

$$P_м = P_c - m_2 I^2_2 r_2 = m_2 I^2_2 r_2 \left(\frac{1}{s} - 1\right). \tag{51}$$

Прямая $P_м = 0$, очевидно, должна проходить через точки холостого хода и короткого замыкания, так как в этих случаях полезная мощность равна нулю.

Прямая потерь в меди статора $P_{джс_1} = 0$, как показал La Cour, должна быть полуполярой к окружности тока, т. е. должна быть проведена из середины касательной OA_m перпендикулярно линии OO_1. Прямая потерь в меди ротора $P_{джс_2} = 0$ должна быть касательной к окружности тока в точке синхронизма, так как только здесь эти потери равны нулю. Прямую потерь в железе двигателя $P_ж = 0$ можно считать касательно , проходящей через точку короткого замыкания $A_к$, учитывая, что в этой точке эти потери приблизительно равны нулю.

Для определения общих потерь машины необходимо постепенно складывать отдельные потери. При этом следует исходить из пучков линий мощностей и потерь, связанных определенными равенствами. Для установления суммарных потерь в статоре $P_{ст}$ надо учесть два равенства при условии пренебрежения механическими потерями:

$$P_1 = P_{ст} + P_c$$

и

$$P_{ст} = P_{джс_1} + P_ж.$$

Эти равенства дают два пучка линий P_1, $P_{ст}$, P_c и $P_{ст}$, $P_{джс_1}$, $P_ж$. Следовательно, линия $P_{ст} = 0$ должна пройти через точки пересечения уже построенных линий $P_1 = 0$, $P_c = 0$ и $P_{джс_1} = 0$, $P_ж = 0$.

Для определения общих потерь $P_п$ к потерям $P_{ст}$ необходимо прибавить потери в роторе $P_{джс_2}$. Необходимые для этого пучки определяются из равенств:

$$P_1 = P_м + P_п,$$

и

$$P_п = P_{ст} + P_{джс_2}.$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Линия $P_п = 0$ должна пройти через точки пересечения $P_1 = 0$, $P_м = 0$ и $P_{ст} = 0$, $P_{дж_2} = 0$.

Очень важно при изучении свойств машины уметь быстро найти ее к. п. д. и скольжение На диаграмме (рис. 97) они найдены по методу La Cour'a. Построение к.п.д. определяется прямыми $P_1 = 0$, $P_м = 0$, $P_п = 0$, а построение скольжения—прямыми $P_с = 0$, $P_м = 0$, $P_{дж_2} = 0$, так как к.п.д. зависит от трех связанных между собою величин P_1, $P_м$, $P_п$, а скольжение, как показывает формула (51), от P_e, $P_м$, $P_{дж_2}$ (Л. 55).

Основные этапы работы асинхронной машины таковы. От точки короткого замыкания $A_к$ до точки холостого хода A_x машина работает в качестве электродвигателя. Начиная от точки A_x, машину необходимо вращать посторонним двигателем. При таком режиме машина сначала проходит переходный режим $A_1 A'_0$, характеризующийся тем, что потери в ней частично покрываются сетью и частично механическим двигателем. При дальнейшем увеличении скорости от точки A'_0 до A''_0 машина генерирует энергию в сеть и от A''_0 до A_∞ снова проходит режим с потреблением энергии от сети и от двигателя. Если от точки короткого замыкания машину вращать в направлении, обратном работе ее, как двигателя, то режим пойдет по дуге $A_к A_\infty$ влево. В течение данного периода машина работает тормозом с потреблением энергии от сети.

Построенная диаграмма дает возможность выяснить очень важное для тяги свойство асинхронной машины. Как видно из значения моментов и мощностей, они возрастают с увеличением нагрузочных токов только до определенного режима, называемого пределом устойчивости работы машины. При переходе через этот режим, несмотря на дальнейшее увеличение тока, и моменты и мощности падают. Физически данный процесс становится понятным из соотношения:

$$M = \frac{m_2 E_2 I_2 \cos(E_2 I_2)}{9{,}81\,\omega_1} = k\Phi I_2 \cos(E_2 I_2) \qquad (52)$$

и

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = k_1 \dot{\Phi} = \dot{U} - \dot{I}_1 Z_1. \qquad (53)$$

Из приведенных равенств видно, что с увеличением тока I_1, а следовательно, и I_2, поток уменьшается. Благодаря этому при изменении режима, пока удельное значение возрастания тока I_2 имеет большее значение, чем уменьшение Ф, момент растет. Начиная же с предела устойчивости, возрастание тока настолько уменьшает поток, что в результате произведение их уменьшается, и момент падает. Асинхронные машины естественно должны работать, не переходя критической точки устойчивости.

Круговую диаграмму можно построить по любым трем точкам режима Если даны тяговые характеристики двигателей, то по ним построение диаграммы не представляет никакого труда. Несколько сложнее обстоит вопрос при построении диаграммы по методу холостого хода и короткого замыкания. Осложнения вызываются трудностью установления положения центра искомой окружности. Опыт холостого хода дает $I_в$ и $\varphi_в$. Опыт короткого замыкания определяет $I_к$ и $\varphi_к$. Эти данные дают возможность построить векторы $I_в$ и $I_к$, а следовательно, установить две точки окружности A_x и $A_к$. Для нахождения центра искомой окружности рациональней всего воспользоваться приближенной формулой La Cour'a, определяющей угол наклона линии центров к оси ординат:

$$\operatorname{tg}\alpha_0 \cong \frac{\cos\varphi_в \sin\varphi_к + \sin\varphi_к \cos\varphi_к}{\frac{I_к}{I_в} + \sin\varphi_в \sin\varphi_к - \cos\varphi_в \cos\varphi_к} \qquad (54)$$

По векторам $I_в$, $I_к$ и углу α_0 построить окружность не представляет затруднений Из отдельных точек этой окружности следует только обратить внимание на определение точки A_∞. Согласно предложению La Cour'a приближенно можно определить ее линией OA_∞, угол наклона которой к оси ординат устанавливается формулой:

$$\operatorname{tg}\beta_\infty \cong \frac{0{,}5\cos\varphi_к + 0{,}25\frac{I_в}{I_к}\sin^2\varphi_к \cos\varphi_в}{\sin\varphi_к}. \qquad (55)$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

2. Конструктивные формы тяговых асинхронных двигателей.

Тяговые асинхронные двигатели в настоящее время выполняются почти исключительно по типу опорнорамных. Общий вид такой системы приведен на рис. 98. Разрезы асинхронного двигателя даны на рис. 99 и 100. Как видно из приведенных рисунков, конструктивные части здесь отличаются большой солидностью и прочностью. Статор делается всегда из динамной жести. Кожух в проведении магнитного потока участия не принимает, а служит только для закрепления в нем статорного железа, для помещения подшипников и для креплений двигателя на раме электровоза.

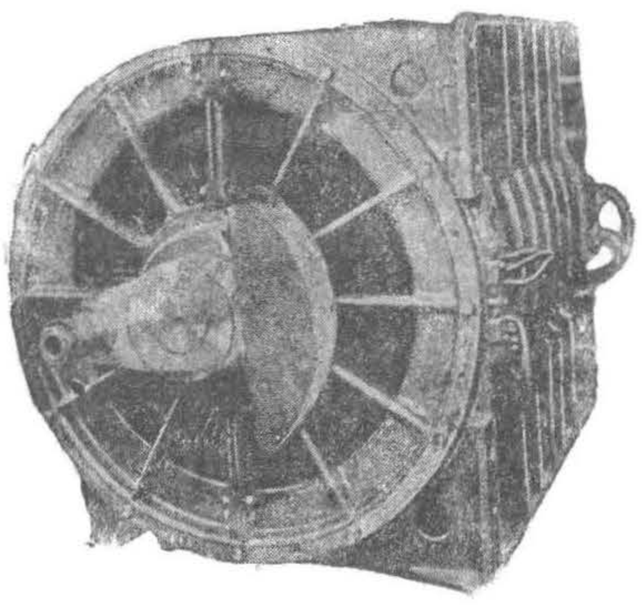


Рис. 98. Общий вид тягового асинхронного трехфазного двигателя BBC часовой мощностью 850 PS при частоте $16^2/_3$ Hz.

Роторы асинхронных двигателей, как общее правило, выполняются с железом, укрепленным на солидных звездообразных втулках. Обмотки асинхронных тяговых двигателей применяются преимущественно катушечного типа. Однако, имеют большое применение и обмотки постоянного тока как непрерывные, так и разрезные. Выполнение статорных обмоток требует особенно большой тщательности. Напряжение на статоре в современных тяговых двигателях чаще всего бывает порядка 3000—3300 V, что требует самой тщательной изоляции. Особенно изоляция осложняется, когда в одну и ту же впадину укладываются провода различных фаз. Отдельные стержни обмотки по большей части изолируются миканито-льняной или миканито-шелковой лентой. Катушки обматываются хлопчатобумажной лентой с соответствующей пропиткой. В некоторых случаях применяется компаундирование. Изоляция ротора может быть менее солидной, так как напряжение в роторных обмотках берется значительно ниже статорного, нормально не больше 600—800 V. Особенно проста конструкция короткозамкнутых роторов. Обмотка их состоит из неизолированных стержней, связываемых по обоим концам массивными медными кольцами при наличии самой тщательной впайки.

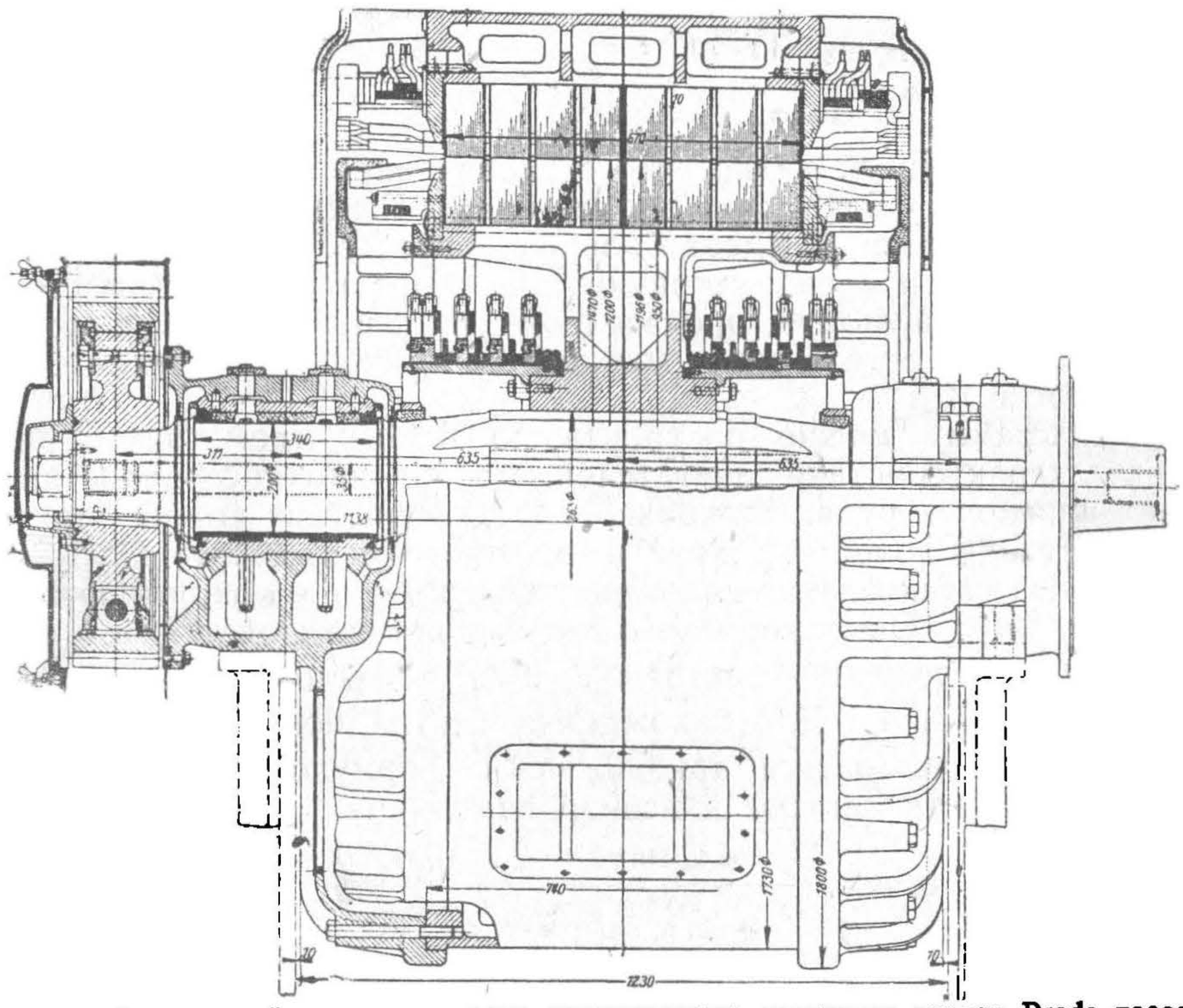


Рис. 99 Продольный разрез тягового асинхронного двигателя завода Breda часовой мощностью 1315 PS при частоте 45 Hz.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Большое внимание при конструировании асинхронных тяговых двигателей приходится уделять подшипникам. Ввиду малых междужелезных пространств, обычных в асинхронных машинах, подшипники должны выполняться с большой тщательностью. В некоторых случаях применяются двухрядные подшипники. При такой конструкции

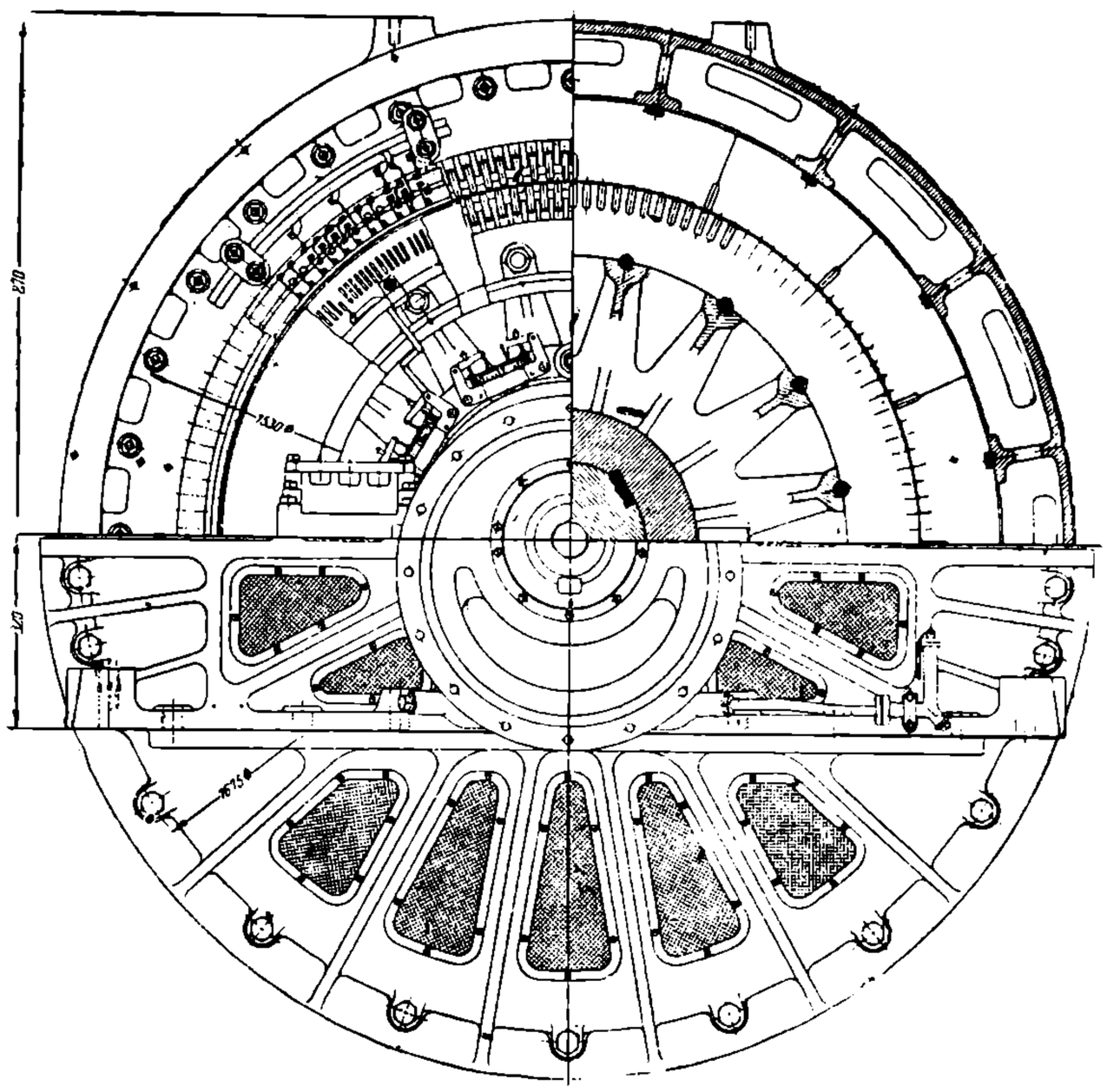


Рис. 100. Поперечный разрез тягового асинхронного двигателя завода Breda часовой мощностью 1315 PS при частоте 45 Hz.

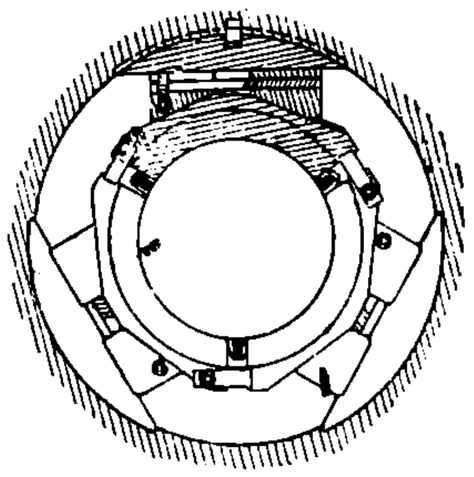


Рис. 101. Схема подшипника системы Kando с регулировкой вкладышей.

внутренние подшипники, связанные с кожухом машины, имеют назначением центрировать ротор. Главная же тяжесть ротора передается на внешние подшипники, опирающиеся непосредственно на раму электровоза. В последнее время начинают входить в практику строительства подшипники Kando, позволяющие, не вынимая ротора, регулировать его положение (рис. 101). Роликовые подшипники для асинхронных двигателей ввиду больших мощностей последних пока еще не получили применения, хотя преимущества их здесь при малых междужелезных пространствах должны быть особенно ощутительны.

При конструировании фазных роторов часто значительным осложнением являются контактные кольца, требующие для себя много места. Кольца чаще всего насаживаются внутри между подшипниками, но имеются также конструкции с креплением их на внешней стороне. При соединении роторных обмоток с кольцами широко практикуется прокладка соединительных проводов внутри валов машин.

3. Каскадное включение асинхронных двигателей.

Общие положения. Для регулирования скорости движения поезда очень часто прибегают в трехфазных электровозах к каскадному включению двигателей. Схемы каскада, применяемые на практике, приведены на рис. 102 и 103. Обе при-

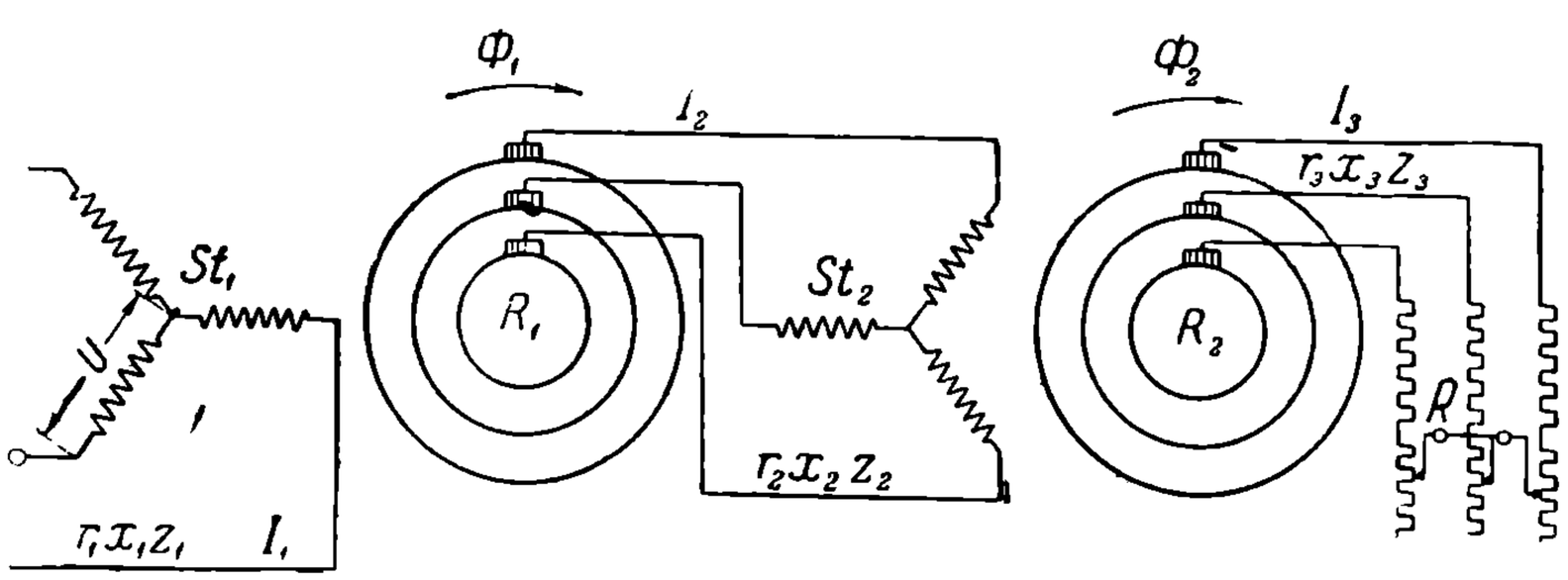


Рис. 102. Схема каскадного соединения трехфазных асинхронных двигателей по системе ротор—статор-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

веденные системы по сущности своего действия аналогичны. Применение той или другой в каждом конкретном случае определяется соотношением обмоток двигателей. При рассмотрении каскадного включения в условиях тяги следует иметь в виду, что число оборотов обоих роторов одинаково. Роторы как бы связаны механически.

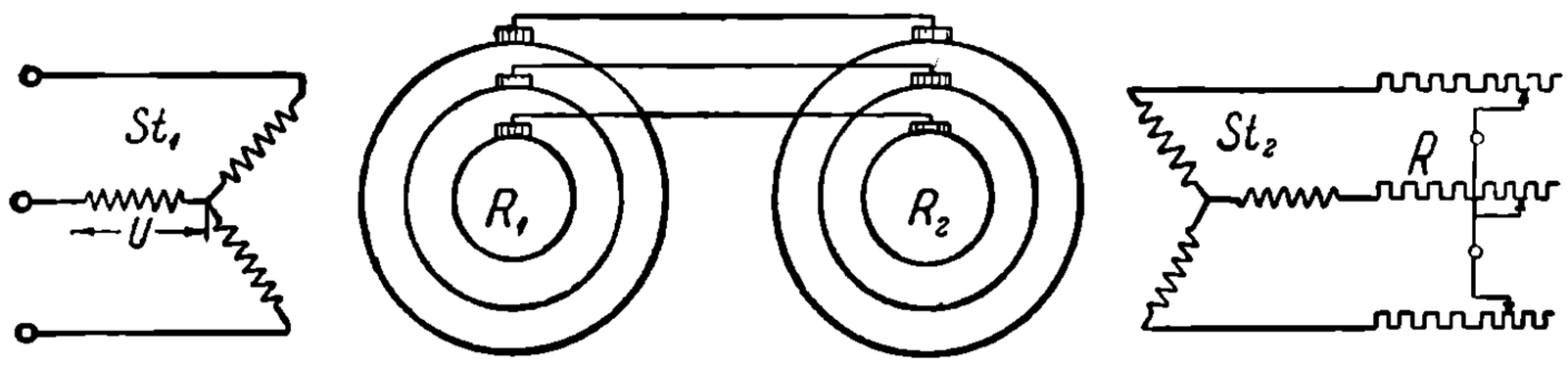


Рис. 103. Схема каскадного соединения трехфазных асинхронных двигателей по системе ротор—ротор.

При вращении каскада частоты вторичной и третичной его цепей меняются с нагрузкой. Частота вторичной цепи зависит от соотношения числа оборотов первичного поля n_1 и числа оборотов роторов n. Частота в третичной цепи определяется скоростями вращения потока второй машины и ее ротора. В первичной цепи соотношение частоты тока и число оборотов при p_1 парах полюсов первого двигателя определяется выражением:

$$\nu_1 = \frac{p_1 n}{60}. \tag{56}$$

Во вторичной цепи частоту ν_2 можно установить, исходя из выражения:

$$\nu_2 = \frac{(n_1 - n) p_1}{60}.$$

Иначе это выражение изображается в виде:

$$\nu_2 = s_1 \nu_1 = \frac{n_1 - n}{n_1} \nu_1, \tag{57}$$

где $s_1 = \frac{n_1 - n}{n_1}$ является скольжением первого ротора по отношению к первичному потоку.

Синхронное число оборотов каскада n_2, относимое к скорости вращения вторичного поля, при p_2 парах полюсов второго двигателя может быть определено на основании равенства:

$$n_2 = \frac{60 \nu_2}{p_2} = \frac{(n_1 - n_2) p_1}{p_2}$$

или отсюда:

$$n_2 = \frac{n_1 p_1}{p_1 + p_2} = \frac{60 \nu_1}{p_1 + p_2}. \tag{58}$$

Полученное выражение является основным. Оно показывает, какие градации скоростей можно получить при каскаде. В случае двигателей с $p_1 \neq p_2$ представляется возможным иметь три скорости, при работе двигателей в каскаде и затем каждого в отдельности. Для $p_1 = p_2$ можно иметь только две скорости, соответствующие каскаду и работе двигателей или независимо, или параллельно. Основное скольжение каскада обычно определяется по отношению к синхронной его скорости:

$$s = \frac{n_2 - n}{n_2}$$

или на основании соотношения (58):

$$s = \frac{n_1 p_1 - n (p_1 + p_2)}{n_1 p_1}. \tag{59}$$

Данное скольжение необходимо отличать от промежуточного скольжения первого ротора к первичному полю, обозначенного выше через s_1. Последнее при определении n из выражения (59) может быть связано с основным скольжением s следующей зависимостью:

$$s_1 = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{n_1 - \frac{(1 - s) n_1 p_1}{p_1 + p_2}}{n_1} = \frac{s p_1 + {}_2}{p_1 + p_2}. \tag{60}$$

НВ УДУНТ (ДІІТ)

ОПЕЧАТКИ

Стр.	*Строка*	*Напечатано*	*Должно быть*
78	формула 56	$\frac{p_1 n}{60}$	$\frac{p_1 n_1}{60}$

Заказ 2070

НБ
УДУНТ
(ДІІТ)

Частота тока в третичной цепи каскада определяется на основании выражений:

$$\nu_3 = \frac{\left(\frac{60\nu_2}{p_2} - n\right)p_2}{60} = \frac{60\nu_2 - np_2}{60} = \frac{(n_1 - n)\,p_1 - np_2}{60}$$

и

$$\nu_3 = \frac{n_1 p_1 - n(p_1 + p_2)}{60} = \frac{n_1 p_1 - n_2(p_1 + p_2)(1 - s)}{60},$$

или подставляя значение для n_2 из формулы (58), можно получить:

$$\nu_3 = \nu_1 - \nu_1(1 - s) = s\nu_1 . \qquad (61)$$

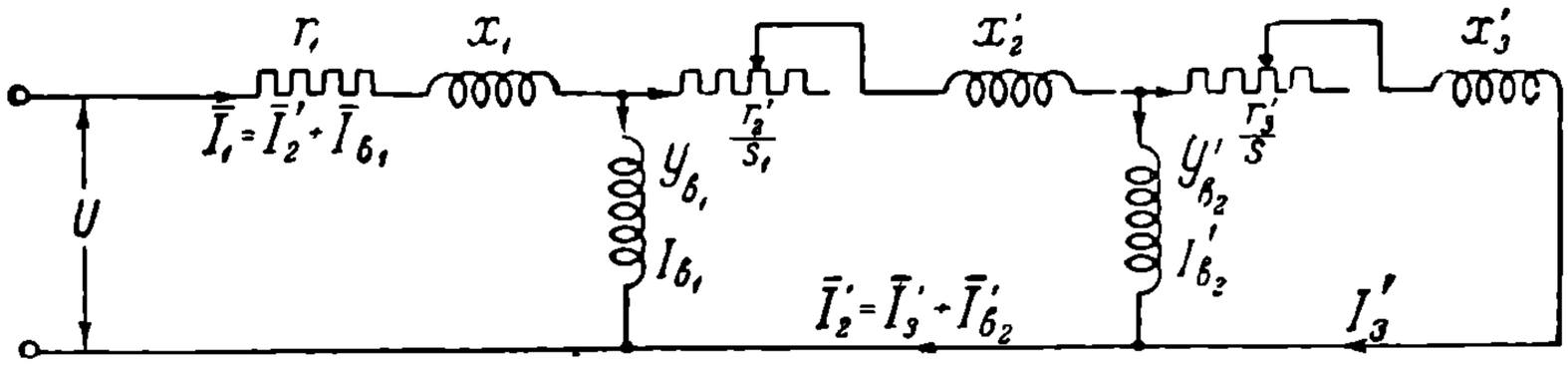


Рис. 104 Схема замещения каскадного включения асинхронных многофазных двигателей.

Диаграмма напряжения и э.д.с. каскадного включения. Установление частот в отдельных цепях каскада дает возможность для него так же, как и для одиночного двигателя, построить схему замещения (рис. 104). Благодаря последней электромагнитная связь заменяется электрической, причем влияние изменения частот отдельных цепей переносится на активные сопротивления.

Физически процесс работы каскада идет следующим путем. Напряжение сети U создает в первичной цепи каскада ток возбуждения $I_{в_1}$, производящий поток Φ_1. Последний образует во вторичной цепи каскада э. д. с. E'_2, под действием которой получается вторичный ток I'_2, вызывающий соответствующую составляющую в первичной цепи. В результате первичный ток $\bar{I}_1 = \bar{I}_{в_1} + \bar{I}'_2$. Вторичный ток I'_2 в свою очередь, состоит из двух составляющих $I_{в_2}$ и I'_3, подчиняясь соотношению $\bar{I}'_2 = \bar{I}'_{в_2} + \bar{I}'_3$. Первая составляющая $I'_{в_2}$ служит намагничивающим током, производящим поток второй машины Φ_2, а вторая I'_3 вызывается током третичной цепи, который создается э. д. с. E'_3, получаемой от потока Φ_2.

Соотношение э.д.с. и напряжений в первичной цепи:

$$\bar{U} = \bar{I}_1 z_1 + \bar{E}_1 . \qquad (62)$$

Во вторичной цепи:

$$\bar{E}_1 = \bar{E}'_2 = \bar{I}'_2 \frac{r'_2}{s_1} + \bar{I}'_2 x'_2 + \bar{E}'_3 . \qquad (63)$$

В третичной цепи:

$$\bar{E}'_3 = \bar{I}'_3 \frac{r'_3}{s} + \bar{I}'_3 x'_3 . \qquad (64)$$

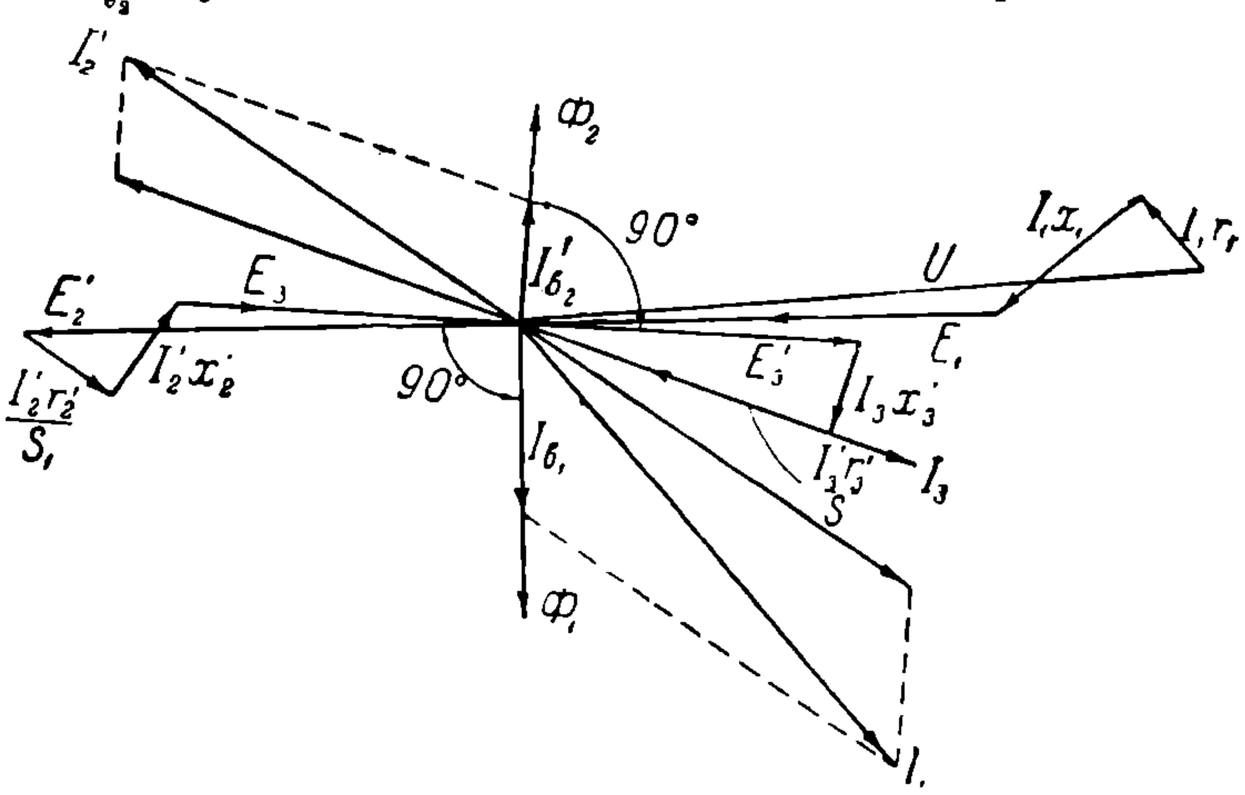


Рис. 105. Векторная диаграмма напряжения при каскадном включении асинхронных двигателей.

На основании трех последних уравнений, выражая их графически с помощью векторов, легко построить и искомую диаграмму э. д. с. (рис 105).

Диаграмма тока каскада. Анализ схемы замещения указывает, что диаграмма тока каскада должна представлять собою систему, состоящую из двух кривых, близких по форме к окружностям и переходящих одна в другую (рис. 106). Работа двигателей при каскаде идет по довольно сложной схеме. От точки короткого замыкания каскада $A_к$ до точки холостого хода A_x обе машины работают двигателями. От точки A_x машины приводятся в движение посторонним двигателем. Проходя через режим синхронной скорости каскадного включения A_c, они до

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

точки A'_0 имеют переходный режим с постепенным переводом потерь от сети на механический двигатель. В пределах дуги $A'_0A''_0$ машины работают генераторами в каскад. После точки A''_0 первая машина начинает работать двигателем, а вторая в это время действует тормозом, частично потребляя энергию от сети и частично от двигателя. Такой режим идет до скорости A'_c, соответствующей синхронизму первой машины. После этого, перейдя точку A'''_0, машины вторично начинают генерировать энергию до точки A^{IV}_0. Дуга окружности $A^{IV}_0 A_\infty$ характеризуется снова одновременным потреблением энергии от сети и от механического двигателя. При вращении машин против момента каскада, как двигателей, режим пойдет по дуге $A_к A_\infty$, и машины будут работать тормозами с потреблением энергии от сети.

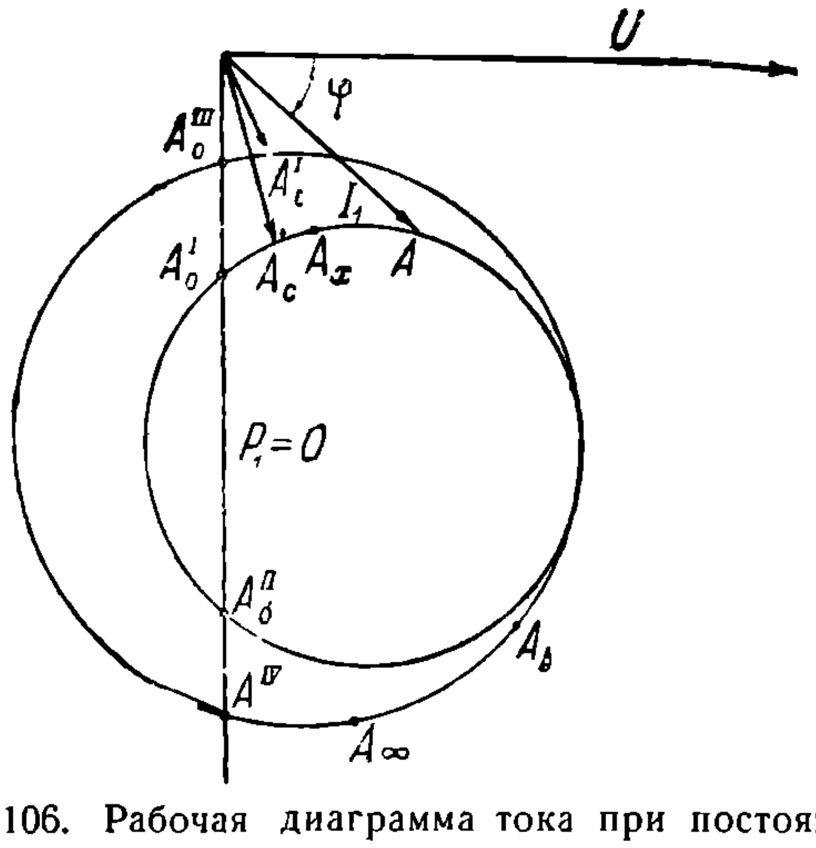


Рис. 106. Рабочая диаграмма тока при постоянном напряжении сети для каскадного включения асинхронных двигателей.

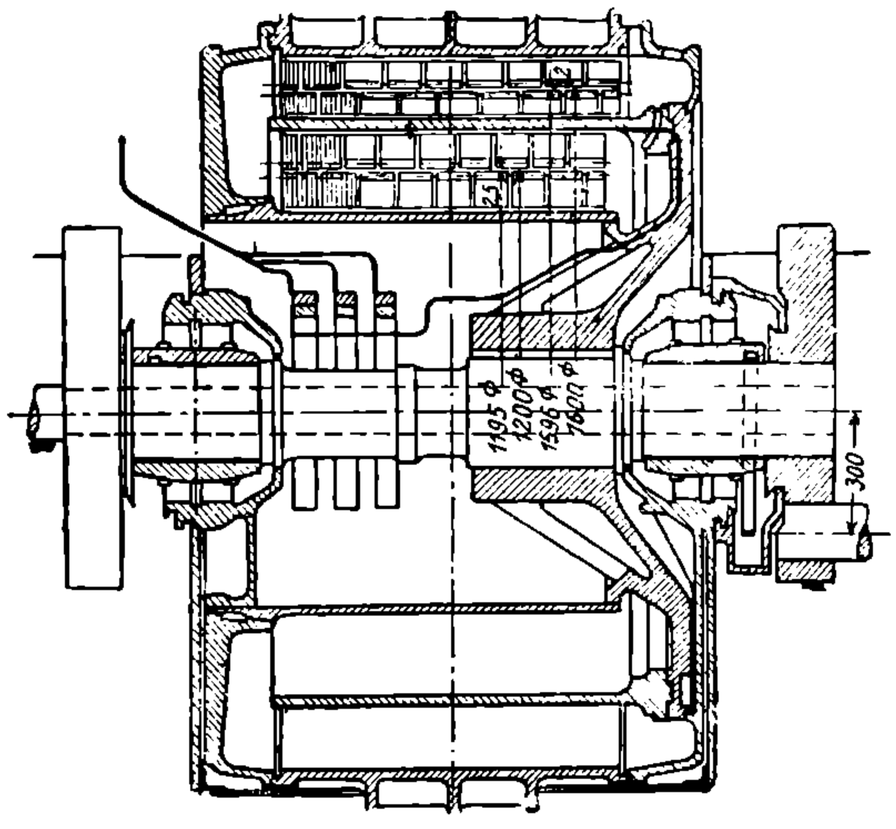


Рис. 107 Каскадный многофазный асинхронный двигатель венгерских ж. д. системы Kando.

Соотношения моментов и мощностей каскадного включения. Вращающий момент второго двигателя при приведении всех членов к первичной цепи может быть выражен по формуле:

$$M_2 = m_2 I'_3 f_1 W_1 p_2 \frac{\Phi_{2max}}{\sqrt{2}} \cos(E'_3 I'_3)\ 9{,}81^{\ 1} \times 10^{-8} \qquad (65)$$

Мощность:

$$P_{м_2} = 9{,}81\,\omega M_2 = \frac{2\pi n}{60} 9{,}81\, M_2 .$$

Учитывая дальше выражение (65) и равенство:

$$E'_3 = \sqrt{2}\,\pi \nu_1 f_1 W_1 \Phi_{2max} 10^{-8},$$

можно получить:

$$P_{м_2} = \frac{p_2 (1-s)\, m_2}{p_1 + p_2} E'_3 I'_3 \cos(E'_3 I'_3). \qquad (66)$$

Таким же самым образом для первого двигателя:

$$M_1 = m_1 I'_2 f_1 W_1 p_1 \frac{\Phi_{1max}}{\sqrt{2}} \cos(E'_2 I'_2)\ 9{,}81^{-1} \times 10^{-8}, \qquad (67)$$

$$E_2' = \sqrt{2}\,\pi \nu_1 f_1 W_1 \Phi_{1max}\ 10^{-8}.$$

$$P_{м_1} = \frac{p_1 (1-s)}{p_1 + p_2} m_1 E'_2 I'_2 \cos(E'_2 I'_2). \qquad (68)$$

Отсюда общая механическая мощность каскада:

$$P_м = \frac{1-s}{p_1 + p_2} [m_1 p_1 E'_2 I_2' \cos(E'_2 I'_2) + m_2 p_2 E'_3 I'_3 \cos(E'_3 I'_3)]. \qquad (69)$$

Полученные соотношения показывают, что мощности и моменты каскада распределяются между отдельными двигателями прямо пропорционально числу их полюсов.

В отношении условий работы каскадного включения произведенный анализ показывает, что они менее совершенны, чем при одиночных или параллельно включен-

ПБ УГУНТ (ДІІТ)

ных двигателях. Благодаря тому, что через первичную обмотку проходят намагничивающие токи не для одного только первого, но и для второго двигателя, $\cos\varphi$ системы получается значительно пониженным. Кроме того, первый двигатель, ротор которого получает большое скольжение по отношению к первичному потоку, имеет повышенные железные потери, что значительно снижает к. п. д. По той же причине первый двигатель находится в более тяжелых условиях и в отношении нагрева. Иллюстрацией сказанного могут служить двигатели электровоза тоннеля Джови казенных итальянских ж. д. При параллельной работе двигатели дают $\eta = 0{,}95$ и $\cos\varphi = 0{,}95$, при каскаде же всего только $\eta = 0{,}85$ и $\cos\varphi = 0{,}83$.

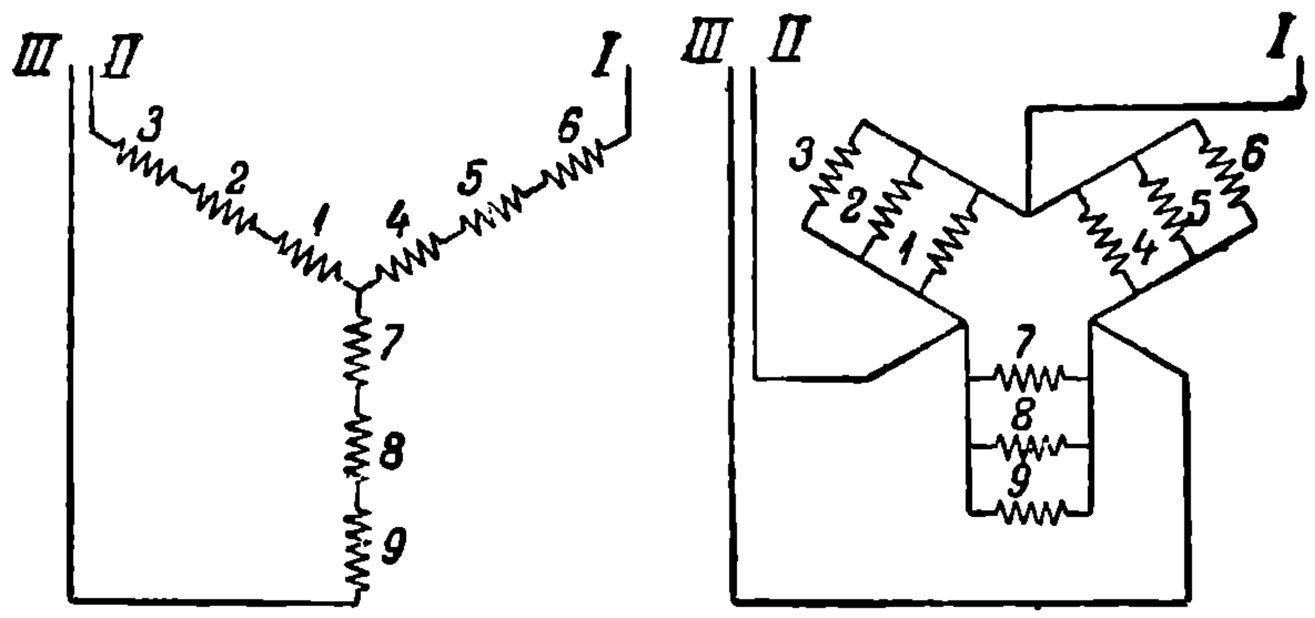


Рис. 108. Схема секционирования статорных обмоток многофазных асинхронных двигателей.

Каскадное включение нормально осуществляется при двух, одинаковых двигателях, работающих в каскад и параллельно. Однако применяются и специальные каскадные двигатели с различным числом полюсов, работающие при каскадном включении и отдельно каждый самостоятельно, давая три градации скоростей. В этом случае двигатели изготовляются по большей части сдвоенного типа с насадкой обоих роторов на один и тот же вал. Таковы, например, старые двигатели Вальтелинской ж. д. Очень оригинально сделаны двигатели венгерских ж. д. (рис. 107). Здесь ротор имеет вид полого цилиндра, на внешней и внутренней поверхностях которого сидят два ротора. Внешний ротор с внешним статором составляют основной двигатель. Статор внутреннего каскадного двигателя крепится к лобовому щиту статора основного двигателя. Для точной центровки роторов применяются регулирующиеся подшипники. Основной двигатель имеет $2p = 18$, $\delta = 2$ mm, а вспомогательный — $2p = 6$ и $\delta = 2{,}5$ mm.

Из особенностей устройств обмоток двигателей, работающих каскадно, следует отметить применяемые иногда секционированные обмотки для статора последнего двигателя каскада. Если имеются два одинаковых двигателя, у которых при каскаде ротор включается на ротор, то при высоком напряжении в первичной цепи таковое же может получиться и на статоре второго двигателя. Для избежания этого секционируют по схеме рис. 108, что дает возможность снизить напряжение в $3\sqrt{3}$ раза и включать в случае нужды регулирующие реостаты непосредственно к зажимам конечной обмотки.

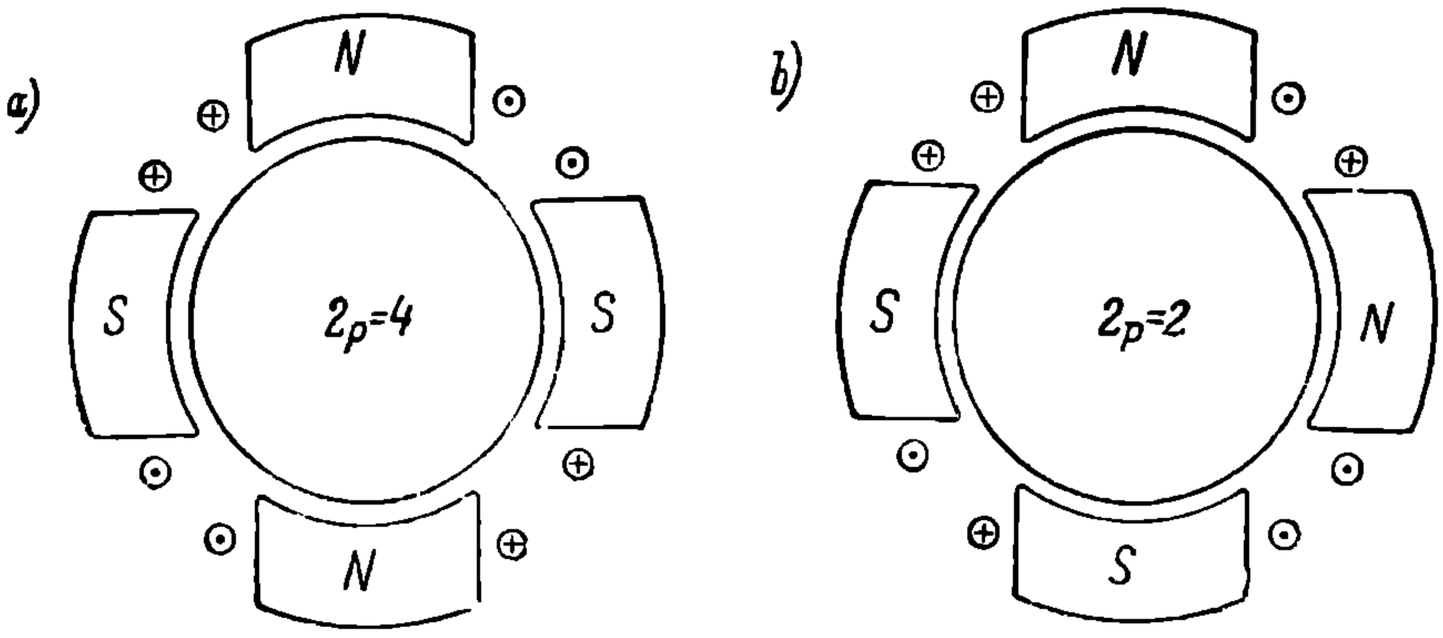


Рис. 109. Схема переключения числа полюсов.

4. Переключение полюсов асинхронных двигателей.

К тяговым двигателям для регулирования скорости движения поезда, кроме каскадного включения, широко применяется принцип изменения числа полюсов. Идея эта видна из рис. 109. Для осуществления ее отдельные полюса или группы полюсов имеют выводные зажимы, соединяя которые в том или другом порядке можно иметь то или другое число полюсов.

Затруднения, с которыми сопряжено изменение числа полюсов, вызываются тем, что трудно хорошо использовать машину при различных числах полюсов. Как

НВ УДУНТ (ДІІТ)

общее правило, получить при одной и той же обмотке и различных числах полюсов одинаково благоприятные соотношения основных факторов работы машин не представляется возможным. Здесь приходится считаться с тем, что переход от одного числа полюсов к другому может сопровождаться выпадением из активной работы части витков обмоток, ухудшением коэфициента обмотки, понижением мощности, момента, к. п. д. и $\cos\varphi$. Задача проектирующего дать такую обмотку, чтобы она была возможно меньше чувствительна в указанных отношениях.

В настоящее время переключение полюсов достигается различными методами. Наиболее просто решается вопрос при изменении их числа в отношении 2:1. Такую схему можно осуществить как при катушечных, так и при обмотках постоянного тока. На рис. 110 приведена схема, основанная на принципе K. Dalander'a и

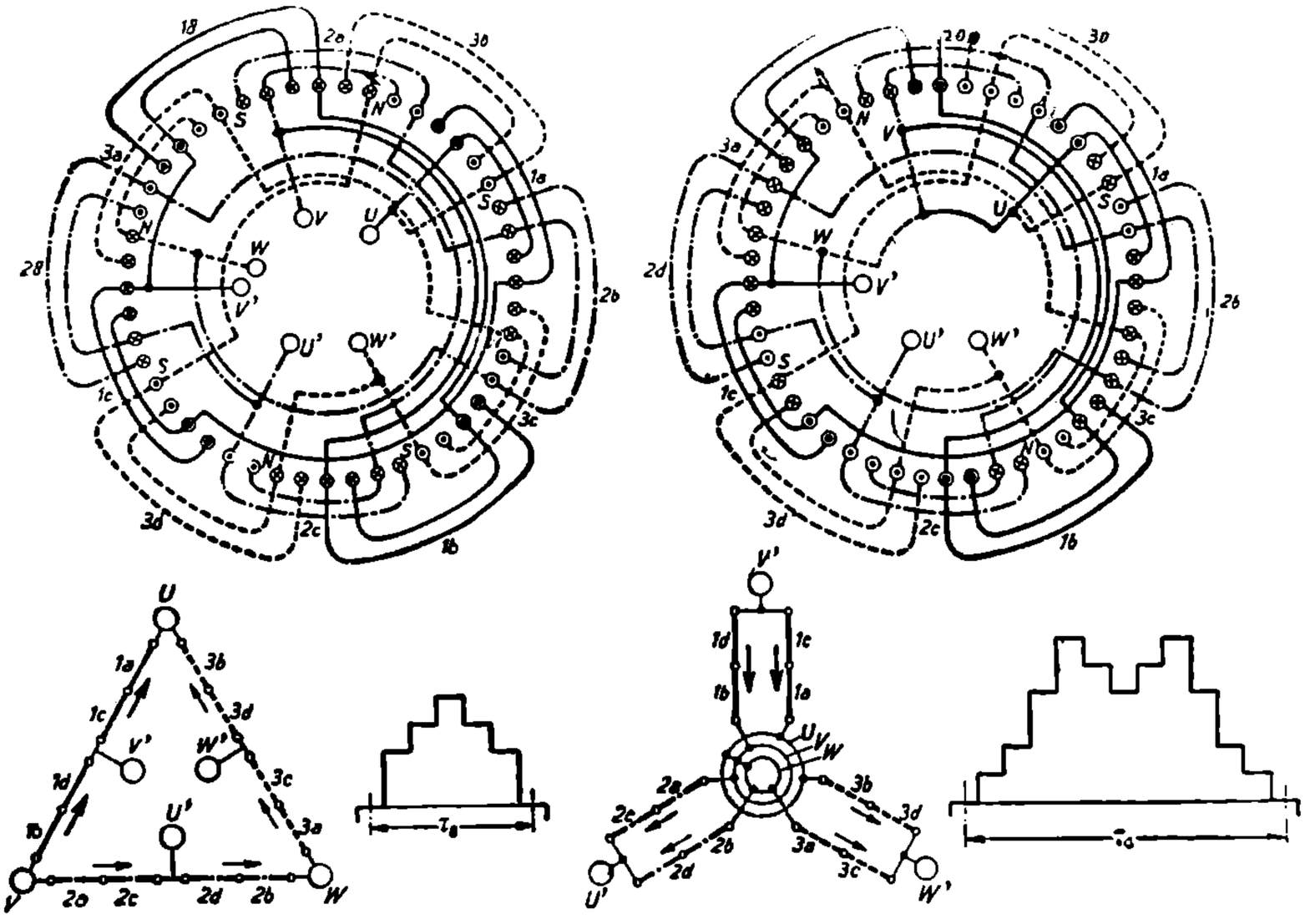


Рис. 110. Трехфазная катушечная обмотка с переключением числа полюсов в отношении 2:1.

K. Lindström'a. Слева на нем изображен случай $2p = 8$, а справа $2p = 4$. Применена катушечная обмотка с 24 катушками, по две на полюс и фазу, имеющая шесть выводов U, V, W, U', V', W Первые три служат для приключения зажимов сети при восьми полюсах, вторые три — при четырех. Кривые магнитного поля приведены на том же рисунке. При восьми полюсах обмотка имеет нормальное соотношение для коэфициента обмотки:

$$f_8 = \frac{m}{\pi} = \frac{3}{\pi} = 0{,}956. \tag{70}$$

Для четырехполюсной системы соотношение менее благоприятно:

$$f_4 = \frac{12 \sin 15^\circ}{\sqrt{2}\,\pi} \cong 0{,}7. \tag{71}$$

Отношение мощностей при том и другом числе полюсов можно определить, правда, с большим приближением, полагая эти мощности пропорциональными напряжениям и токам короткого замыкания по формуле:

$$\frac{P_8}{P_4} \cong \frac{U_8\, I_{k_8}}{U_4\, I_{k_4}} \tag{72}$$

Соотношение токов короткого замыкания для рассматриваемых схем подчинено условию:

$$\frac{I_{k_8}}{I_k} = \frac{U_8}{2z_k} : \frac{U_4}{0{,}5z_k} = \frac{U_8}{4U_1}, \tag{73}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

где $_к$ — сопротивление при коротком замыкании каждой выведенной группы. Так как в данной схеме $U_8 = \sqrt{3}\, U_4$, то выражение (72) может быть представлено в виде:

$$P_8 = \frac{U^2{}_8}{4U^2_4} P_4 = 0{,}75 P_4 \tag{74}$$

Отношение же моментов, учитывая, что скорость при восьми полюсах будет в два раза меньше, чем при четырех, получается в виде:

$$M_8 = 1{,}5\, M_4. \tag{75}$$

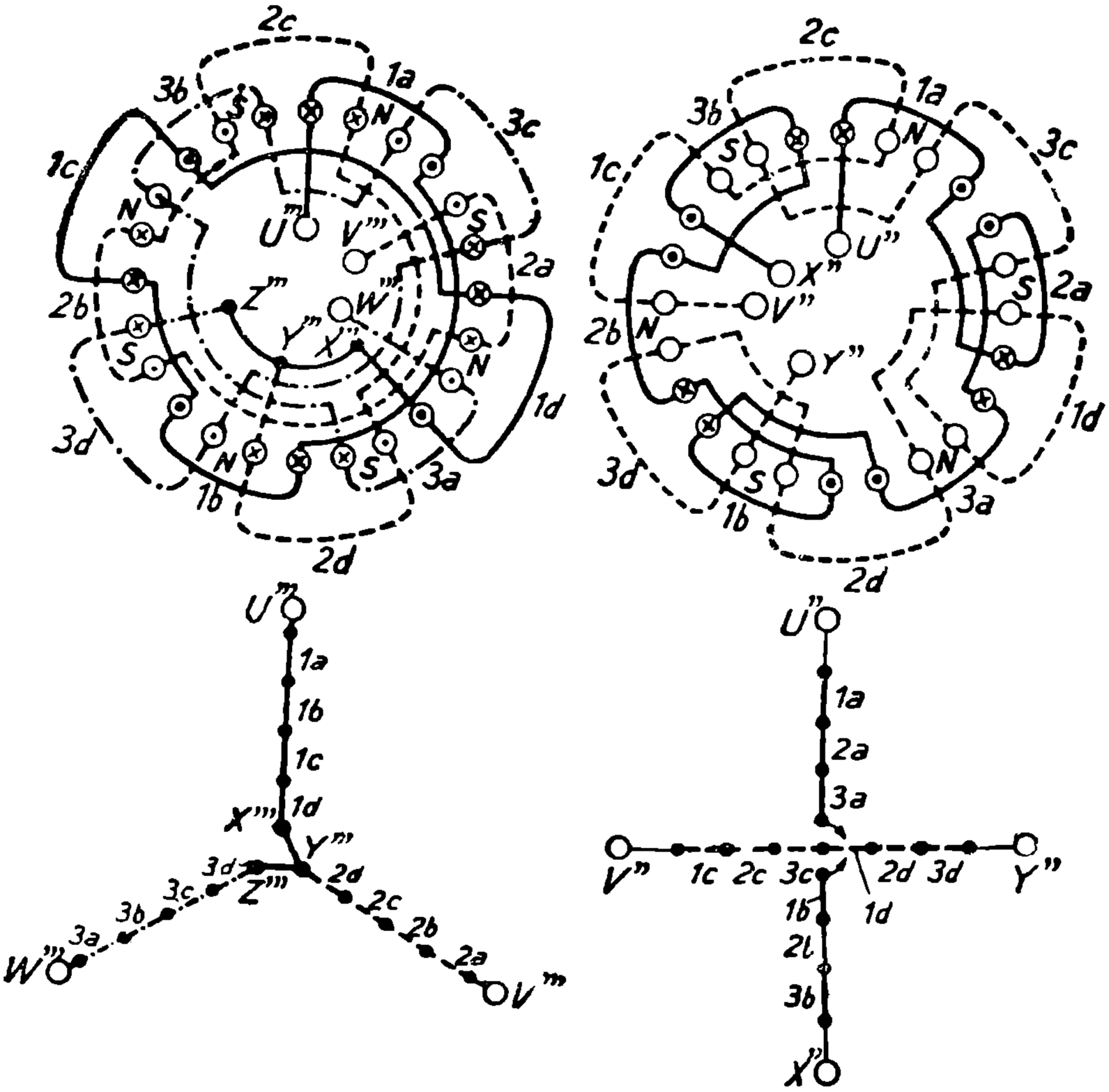


Рис. 111 Катушечная обмотка с переключением полюсов в отношении 4 3 при изменении числа фаз

Значения мощностей и моментов для условий тяги получаются благоприятными. В некоторых случаях для улучшений их соотношений можно прибегать к изменению напряжения, подводимого к зажимам двигателей. Так, например, для увеличения индукций, если они падают слишком низко, напряжение можно соответственно увеличивать.

Разобранный метод дает градацию изменения скоростей 2:1. Интервалы таки: изменений сопровождаются слишком значительными скачками в скоростях, и в некоторых случаях их желательно понизить. На рис. 111 приведена схема M Stern'a с отношением скоростей 4:3, примененная на электровозах итальянских ж. д. серии 330 и 331. Схема эта построена на принципе изменения числа фаз. На приведенном рисунке слева изображено включение для $2p = 8$ по обычной трехфазной схеме и справа для $2p = 6$ при двухфазной несвязанной системе. Число выводов в данной схеме 24. Коэфициенты обмоток в том и другом случае получаются вполне удовлетворительными:

$$f_б = 0{,}96 \text{ и } f_в = 0{,}92. \tag{76}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

По другому способу отношение числа полюсов, отличное от 2:1, можно получить, не меняя числа фаз, но применяя метод группового разреза обмотки. Примером может служить схема, приведенная на рис. 112. В данном случае взята обмотка постоянного тока, имеющая 18 разрезов и 36 выводов. Схема дает комбинации 8 и 6 полюсов при $f_8 = 0{,}96$ и $f_6 = 0{,}9$. Разобранные системы дают отношение скоростей 4:3. На тех же принципах можно построить и другие отношения, например, 3:2 (Л. 220).

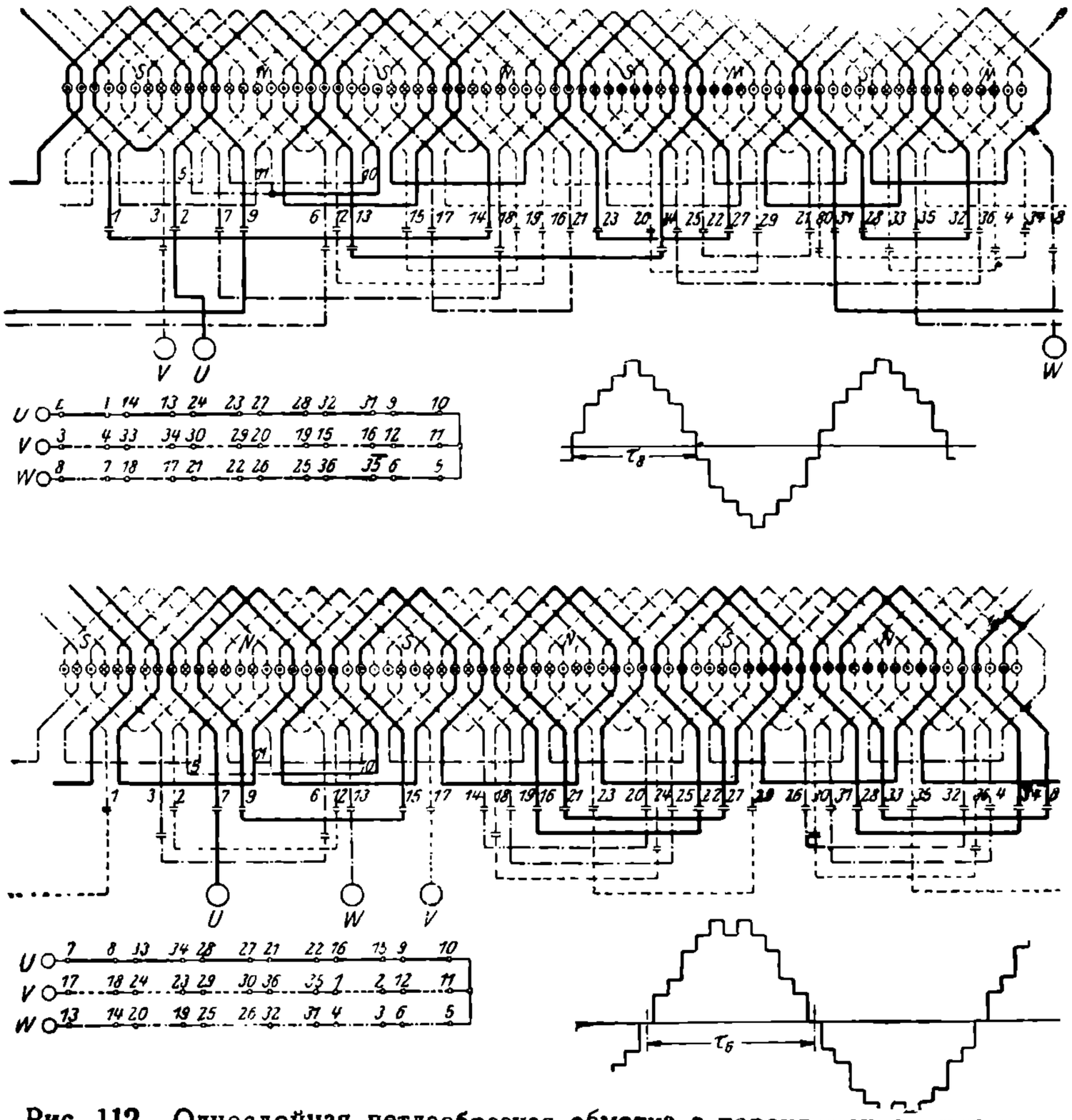


Рис. 112. Однослойная петлеобразная обмотка с переключением числа полюсов в отношении 4:3 без изменения числа фаз.

Вопрос со схемой соединений двигателей осложняется. Для перехода от трехфазной сети к двухфазным или четырехфазным схемам включения двигателей приходится применять метод Scott'a.

Очень осложняют задачу переключения полюсов роторные обмотки, если они выполняются по типу фазных. Для того, чтобы можно было включать в ротор пусковые регуляторы или осуществлять каскадные включения, роторная обмотка должна иметь соответствующее количество контактных колец. В случае применения схемы регулирования 2:1 роторная обмотка должна иметь нормально шесть колец. Уменьшить это число до трех, как предложил Lindström, можно только в том случае, если допустимо ограничиться включением сопротивлений для одного только числа полюсов, а при другом работать с короткозамкнутой обмоткой.

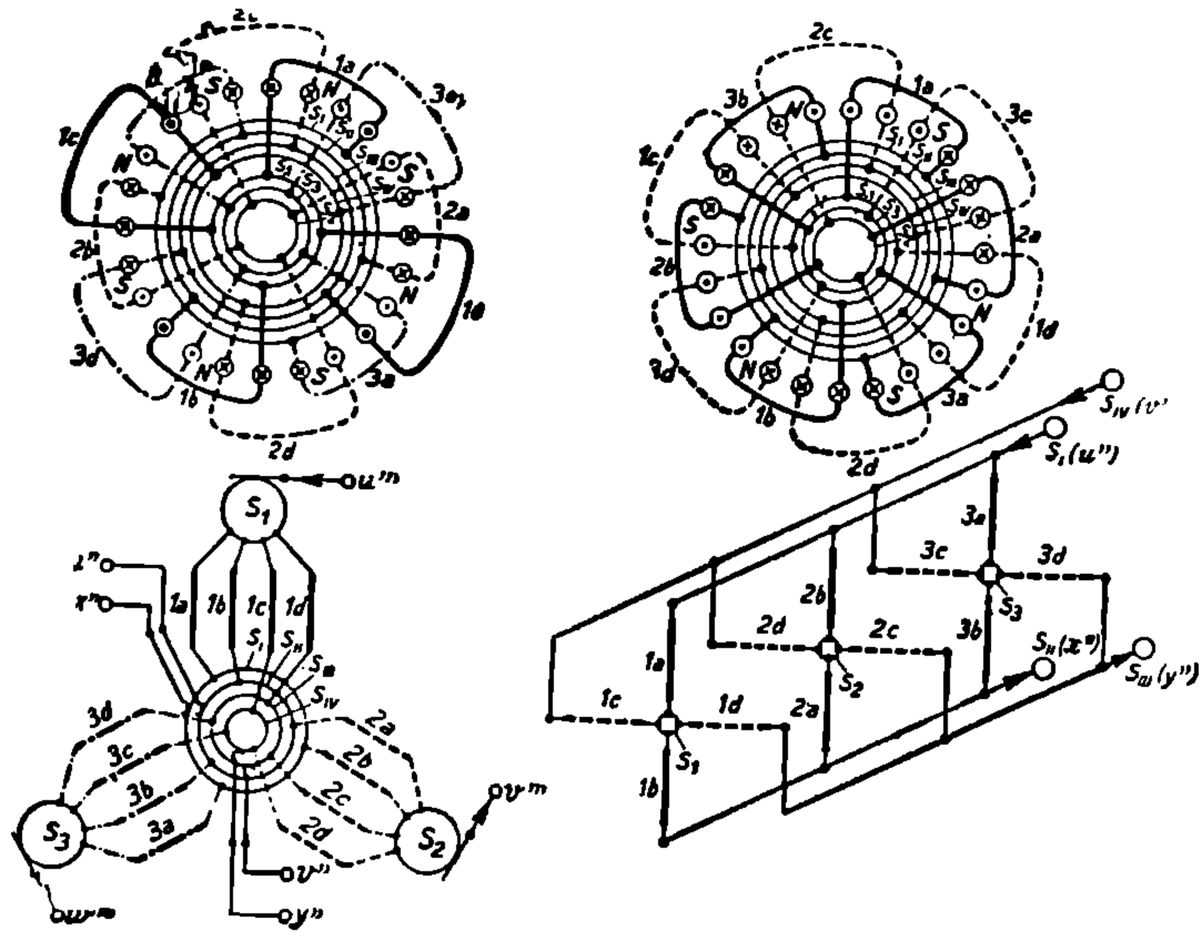


Рис. 113. Роторная обмотка с переключением полюсов в отношении 4:3 при изменении числа фаз.

При регулировании скорости в отношении 4:3 или 3:2 колец требуется еще больше. В этом случае обойтись числом колец меньше семи не удается. На рис. 113 приведена подобная схема для 4:3. Слева здесь изображено включение обмотки для восьми полюсов, выполненное по типу трехфазной системы с выводными коль-

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

цами S_1, S_2 и S_3. Остальные кольца в этом случае работают замкнутыми накоротко с приподнятыми щетками. Справа приведена шестиполюсная система, осуществляемая по принципу четырехфазной связанной системы с рабочими кольцами S_I, S_{II}, S_{III} и S_{IV}.

Очень просто можно переключать полюса при короткозамкнутых роторах. Здесь не приходится делать никаких переключений в роторе. Последний автоматически приспособляется к любой схеме включения статора, независимо от того, остается ли неизменным или меняется число фаз статора.

Для увеличения возможного числа комбинаций скоростей асинхронные двигатели иногда снабжаются двумя самостоятельными обмотками, из которых каждая комбинируется на две скорости, что в результате дает четыре скоростные ступени. Наиболее просто это осуществляется при короткозамкнутых роторах, так как в этом случае двумя обмотками должны быть снабжены только статоры.

Особый интерес, как образец чрезвычайно усложненной конструкции, представляет асинхронный двигатель венгерских ж. д., примененный на электровозах типа Kando (рис. 114). Двигатель имеет первичную обмотку на роторе и вторичную на статоре. Статорная обмотка, уложенная в 576 впадинах, состоит из 48 отдельных элементов, выведенных к такому же числу зажимов пускового реостата. При таком числе элементов обмотка приобретает до известной степени свойства беличьего колеса, приспособляясь, как и короткозамкнутая обмотка, к любому числу полюсов, задаваемых первичною цепью.

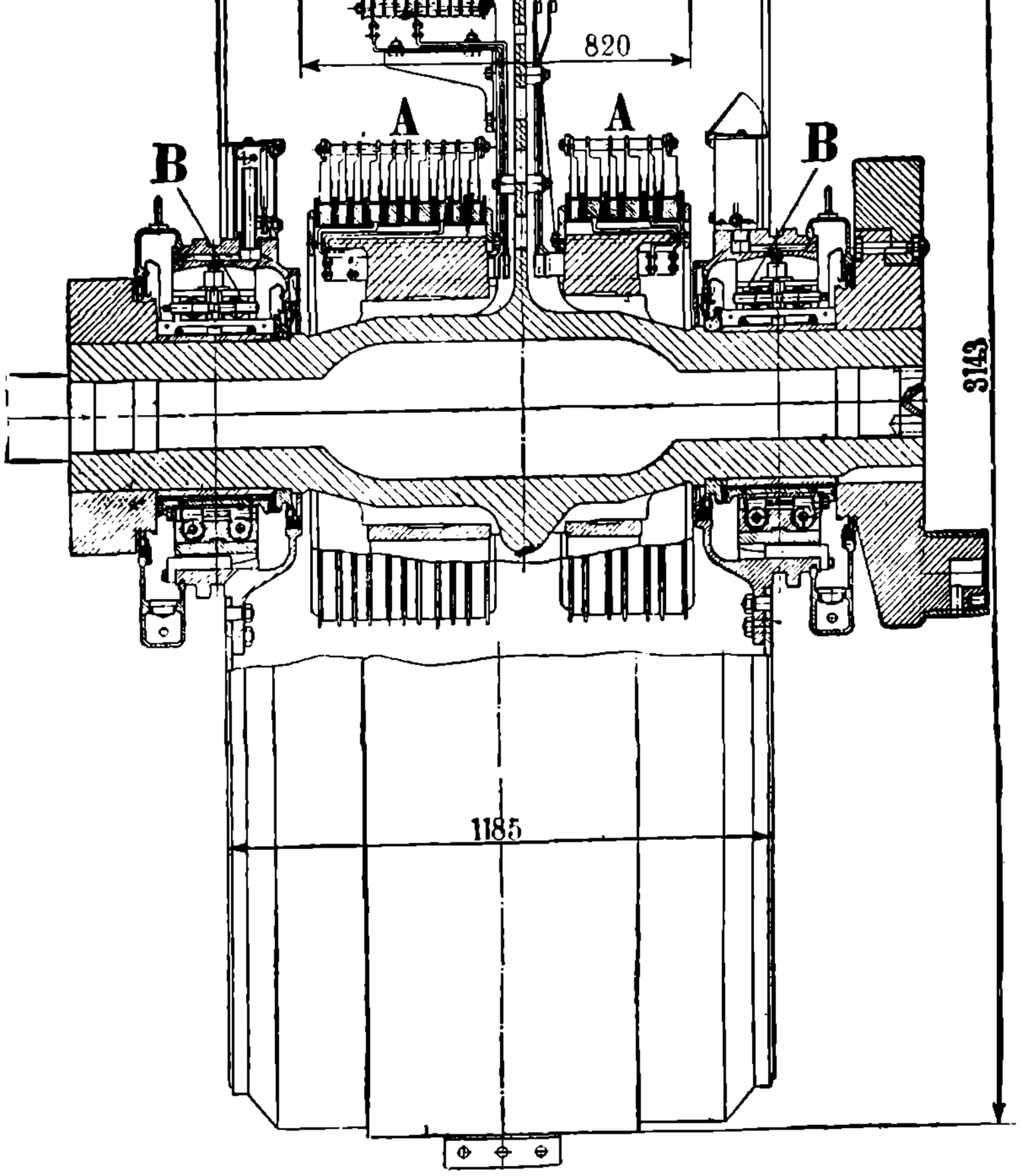


Рис. 114. Асинхронный многофазный двигатель венгерских ж. д. длительною мощностью 1600 kW.

Обозначения
S—статор, *R*—ротор, *A*—кольца ротора, *B*—регулирующиеся подшипники, *F*—вентилятор.

Первичная цепь — ротора — состоит из двух независимых обмоток, уложенных в 540 впадинах. Одну из обмоток можно переключать на 72 и 36 полюсов. Другая же дает 24 полюса и 18 полюсов, причем первая комбинация получается при шести фазах, а вторая при трех фазах. Такая комбинация обмоток потребовала 16 контактных колец *A* на роторе. Вес двигателя с кривошипом определился в 18,5 t при длительной мощности в 1600 kW. Наивысший к. п. д. установлен в 92,2%.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

5. Характеристики и потери асинхронных двигателей.

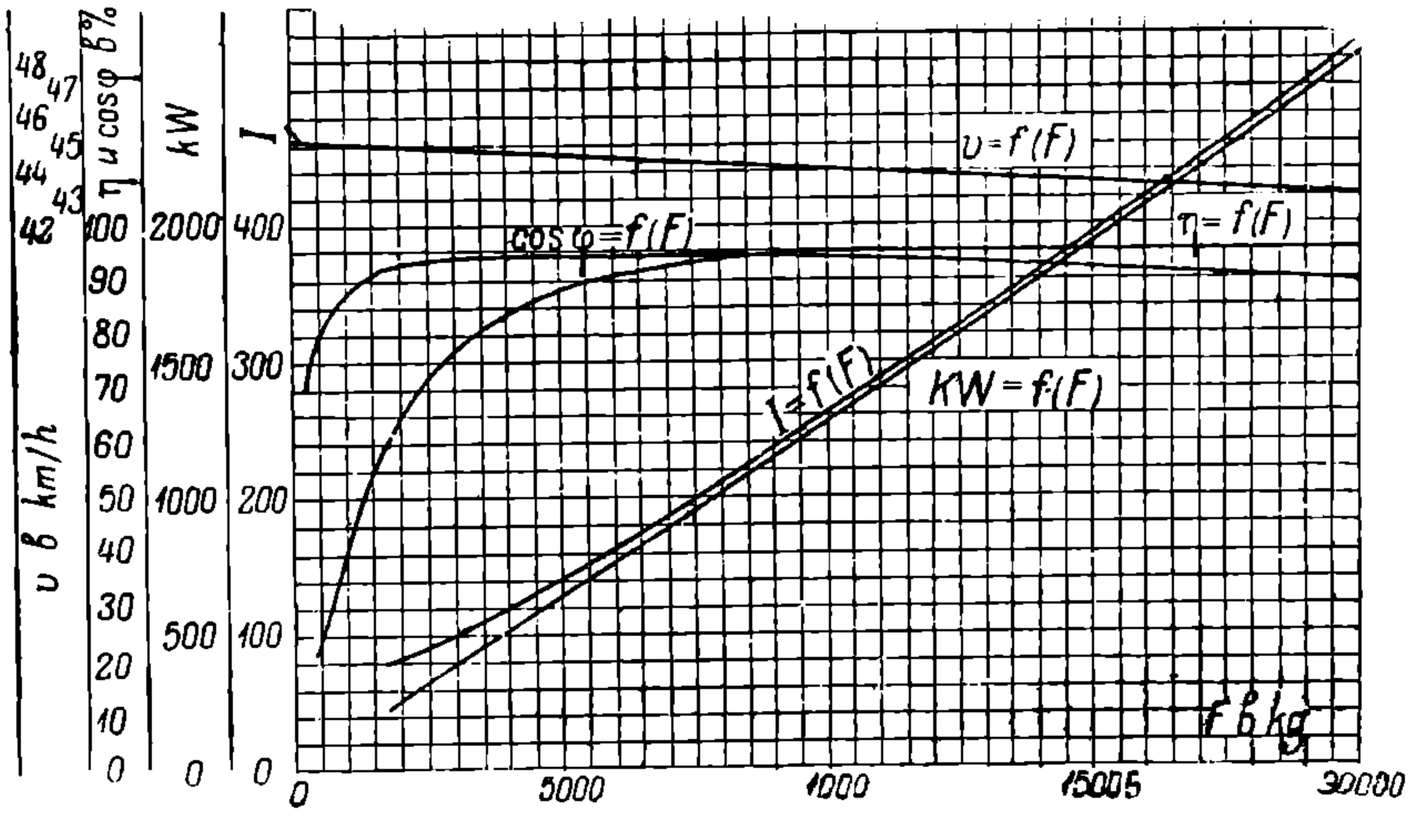


Рис. 115. Тяговые характеристики асинхронных многофазных двигателей при параллельном включении.

По своим тяговым свойствам асинхронная машина принадлежит к типу машин шунтовых. На рис. 115 и 116 представлены характеристики асинхронных двигателей при работе их в каскад и при работе в параллельном включении. Из этих кривых видно, что условия работы при каскадном включении значительно менее благоприятны, чем при параллельном.

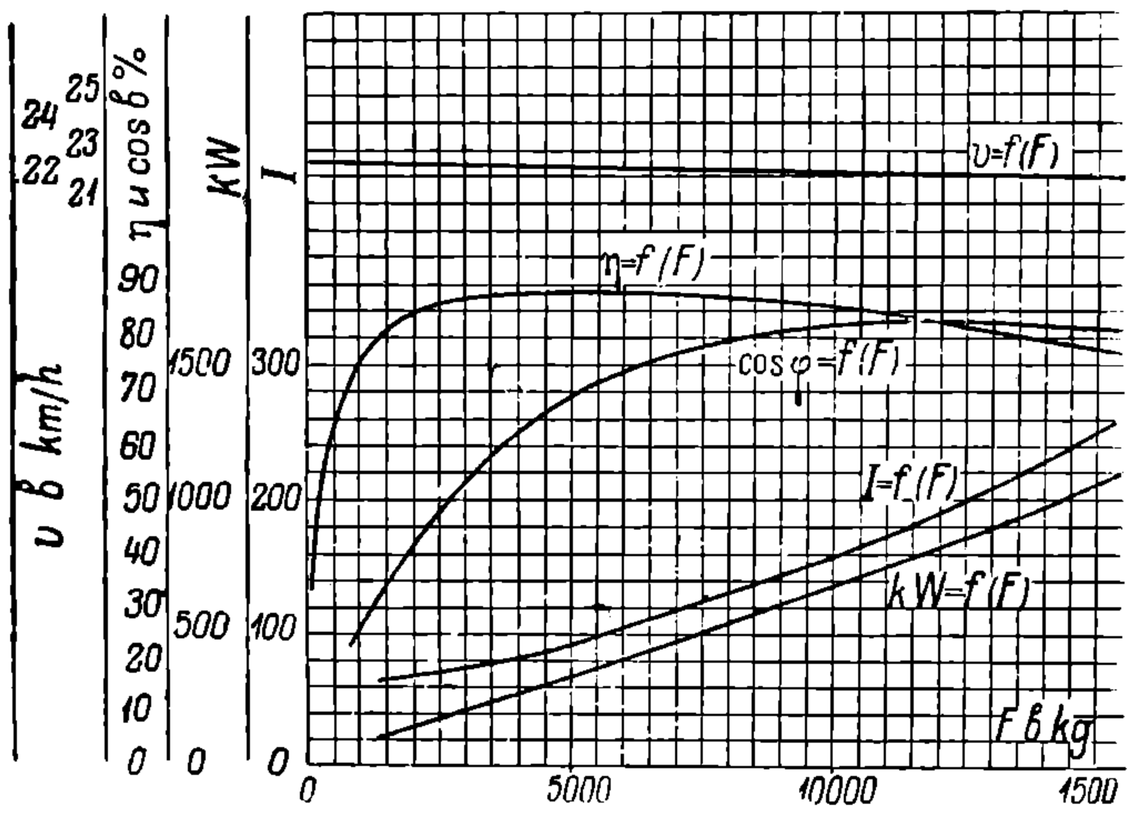


Рис. 116. Тяговые характеристики при каскадном включении асинхронных двигателей.

На рис. 117 даны кривые при различных числах полюсов. В данном случае каждый двигатель имеет на статоре по две обмотки, из которых одна дает 16 и 8 полюсов а другая 12 и 6. Приведенные кривые показывают, что для четырех комбинаций числа полюсов условия работы неодинаково благоприятны. Наиболее удовлетворителен процесс работы для шестиполюсной системы.

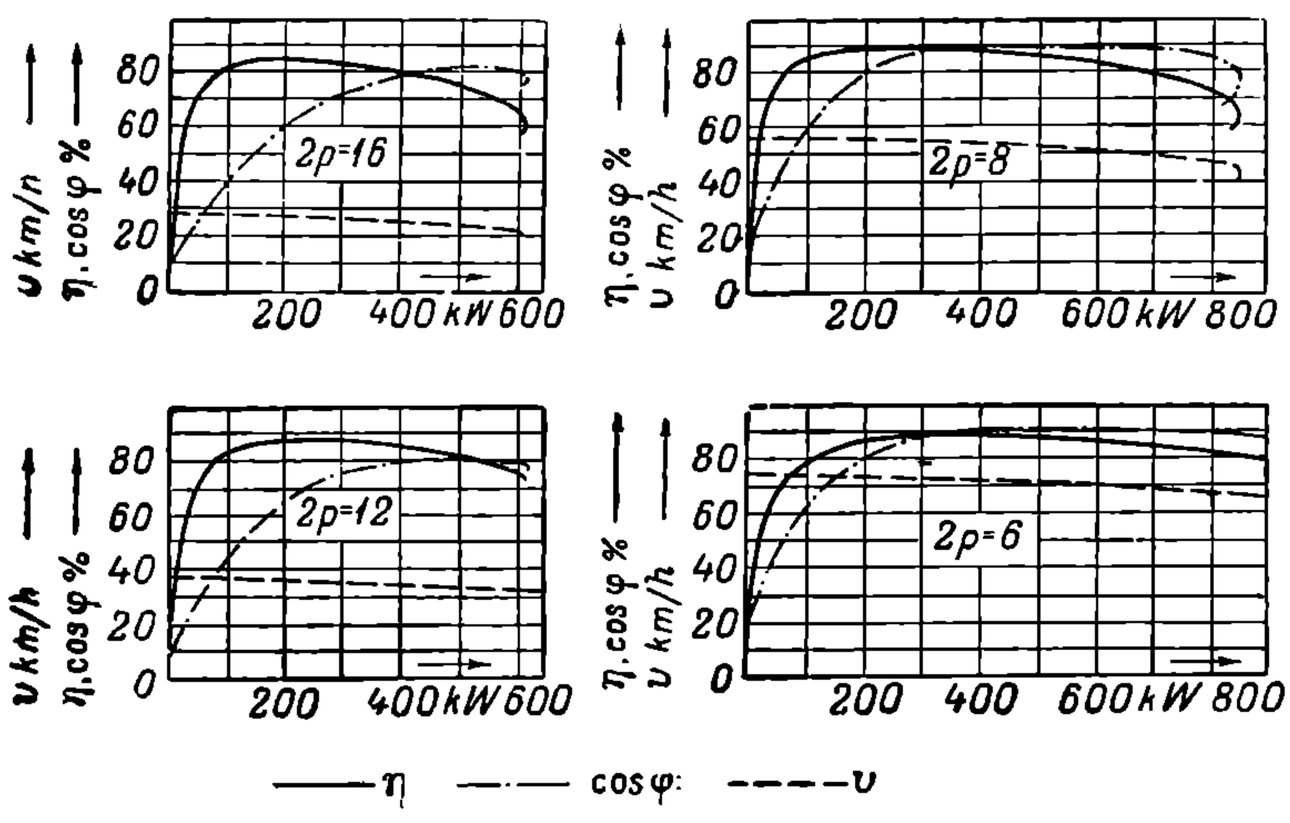


Рис. 117. Характеристики асинхронного тягового двигателя при различных числах полюсов.

Потери у асинхронных машин складываются из джоулевых, магнитных, механических, воздушных и добавочных. Джоулевы потери подчинены общему закону То же самое можно сказать и о потерях механических и воздушных. Более сложную картину представляют собою потери магнитные. Последние следует разделить на потери в статоре и в роторе. Первые с нагрузкой меняются относительно мало. Существенного изменения их следует ждать только в период пуска двигателя, если последний разгоняется с сильным ослаблением поля, что может быть или при пуске с понижением напряжения, или при короткозамкнутых двигателях с очень большими пусковыми токами.

Потери в роторе, как известно, подчинены, кроме того, еще и другим воздействиям. Они меняются с изменением скольжения ро-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

тора, так как тогда число перерезываний ротора потоком не остается величиной постоянной. Чем меньше скольжение, тем меньше магнитные потери в роторе. Если обозначить потери в роторе на токи Фуко при состоянии покоя машины через P_{ϕ_2}, на гистерезис через P_{r_2} и учесть, что первые меняются пропорционально второй степени частоты, а вторые пропорционально первой, то при каком угодно другом режиме со скольжением s эти потери будут соответственно равны $s^2P_{\phi_2}$ и sP_{r_2}.

Следует указать, что эффект токов Фуко и гистерезиса сопровождается образованием добавочных мощностей. Действие токов Фуко, собственно говоря, аналогично действию основных токов ротора. Как видно из уравнения (50), при потерях в роторе $m_2I^2_2r_2$ электромагнитная мощность равняется $\frac{m_2I^2_2r_2}{s}$. Таким же образом, при потерях на токи Фуко $s^2P_{\phi_2}$, должна получиться электромагнитная мощность, равная sP_{ϕ_2}. Полезная мощность от токов Фуко равна $sP_{\phi_2} - s^2P_{\phi_2}$. Очень интересен эффект действия на машину гистерезиса. Гистерезисная мощность, потребляемая от сети машиной и обусловливаемая наличием угла сдвига между намагничивающим током и потоком, при условии их постоянства, будет оставаться величиной неизменной, причем в части sP_{r_2} эта мощность будет итти на покрытие гистерезисных потерь, а в части $P_{r_2} - sP_{r_2}$ она будет создавать полезную мощность (Л. 55).

Добавочные потери в асинхронных машинах складываются из магнитных и медных. Первые получаются в зубцах статора и ротора вследствие пульсации поля, происходящей от зубчатого строения системы. Вторые получаются в виде потерь на токи Фуко в проводах статорных и роторных обмоток, вызываемых неравномерным распределением индукции по проводу. С достаточной степенью точности первые можно считать пропорциональными квадрату индукции и скорости ротора в степени 1,5. Вторые определяются, главным образом, конструкцией впадин и частотами статорных и роторных полей.

6. Основные тенденции в строительстве тяговых асинхронных двигателей.

Тяговые асинхронные двигатели строятся на частоты первичного тока в пределах от 15 до 50 Hz. Увеличение частот в указанных пределах действует благоприятно на понижение веса и стоимости двигателей. Переход от частоты 25 Hz к 50 Hz в среднем для тяговых двигателей должен вызывать понижение их веса на 20—25%. Переход же от 15 Hz к 50 Hz еще более снижает этот вес, доводя указанный процент до 30—35%. Отрицательной стороной повышения частот является понижение $\cos\varphi$. При переходе от частоты 25 Hz к частоте 50 Hz следует в среднем ожидать понижения его на 1—1,5%, а при переходе от частоты 15 Hz к частоте 50 Hz на 1,5—2%. Коэфициент полезного действия по мере увеличения частот также должен нормально снижаться. Для машин однотипных в отношении быстроходности при переходе от частоты 25 Hz к 50 Hz следует ожидать понижения его в среднем на 0,5—1,5%, а в интервале 15 Hz—50 Hz на 1,5—2%.

Для выяснения влияния частоты и числа оборотов на к. п. д. и $\cos\varphi$ нормальных трехфазных двигателей приведена табл. 14, данная Hobart'ом. Из нее подтверждается,

ТАБЛИЦА 14.

Зависимость к. п. д. и $\cos\varphi$ от частоты первичного тока в асинхронных двигателях.

Число периодов	Синхрон. n	50 PS		100 PS		500 PS		1 000 PS	
		η %	$\cos\varphi$	η %	$\cos\varphi$	η %	$\cos\varphi$	η %	$\cos\varphi$
25	188	81	0,8	87	0,83	90	0,85	91	0,87
25	375	85	0,85	89	0,87	92	0,89	93	0,9
25	750	88	0,91	91	0,93	93	0,94	94	0,95
60	450	84	0,79	89	0,82	91	0,84	93	0,86
60	900	87	0,86	91	0,87	94	0,88	95	0,89
60	1 800	90	0,92	93	0,93	95	0,93	96	0,93

НБ УДУНТ (ДІІТ)

что при одной и той же примерной быстроходности двигатели с меньшей частотой имеют более благоприятные к. п. д. и cos φ, причем на к. п. д. частота влияет меньше, чем на cos φ.

Большое влияние на экономику оказывает при расчете число оборотов ротора и число полюсов. Увеличение быстроходности действует благоприятно на понижение веса машины. Несмотря на то, что при данной частоте увеличение числа оборотов иногда требует значительного снижения числа полюсов, все-таки по большей части бывает выгодно повысить быстроходность машины. Влияние быстроходности можно видеть из табл. 15, приведенной тем же Hobart'ом и данной для двигателя в 1 000 PS при $\nu = 25$ Hz.

ТАБЛИЦА 15.

Влияние быстроходности на стоимость двигателей

n	2*p*	cos φ	Цена в долл.
125	24	0,93	5 000
375	8	0,95	3 200
750	4	0,96	2 500

В отношении напряжения асинхронные двигатели допускают варьирование в широких пределах. Наиболее распространенным напряжением для двигателей, работающих без трансформаторов является 3000—3300 V. При трансформаторах напряжение берется в пределах 450—1 800 V, с тенденцией для крупных двигателей держаться около 1 000 V. Эта цифра показывает, что стремиться к повышению напряжения,—а его можно повысить при наличии трансформатора,—не следует. По всем данным увеличивать напряжение выше 3 000—3 600 V не представляется целесообразным.

Существенное влияние на работу двигателя оказывает величина междужелезного пространства. Чем больше междужелезное пространство, тем больше должны быть намагничивающие *AW* и, как следствие этого, тем ниже получается cos φ. Однако, особенно сильно снижать δ в тяговых двигателях, подшипники которых работают в тяжелых условиях, не представляется возможным. Нормально не рекомендуется итти ниже 2—2,5 mm, и только в очень редких случаях встречается $\delta = 1{,}5$ mm.

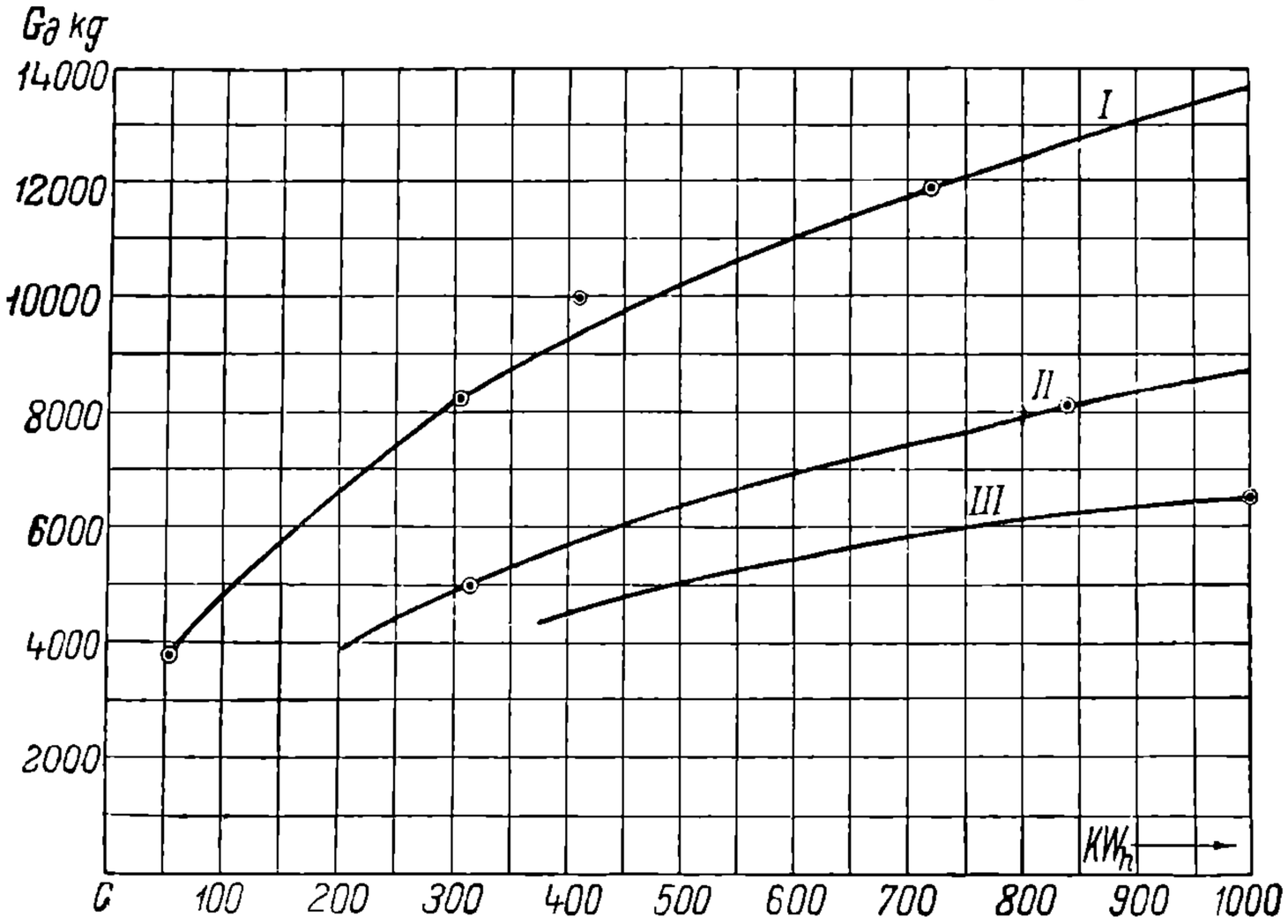


Рис. 118. Веса тяговых трехфазных асинхронных двигателей в зависимости от часовых мощностей.

В отношении меди асинхронные тяговые двигатели работают со значительными плотностями тока и с *AS*, доходящей при часовом режиме до 500 и даже несколько выше. Индукции применяются для междужелезного пространства—порядка 8 000, наибольшая в зубцах около 20 000—21 000. роторная и статорная — порядка 12 500—13 500.

Представление о весовых соотношениях асинхронных тяговых двигателей могут дать кривые рис. 118. Кривая I относится к низкочастотным двигателям с $\nu = 15—16^2/_3$ Hz. Кривые II и III даны для $\nu = 25$ и $\nu = 45—50$ Hz. Следует отметить, что последние две кривые построены по очень ограниченному числу отдельных точек, и потому возможны значительные отступления от них. Кривая I показывает, что низкочастотные двигатели получаются более тяжелыми по сравнению с двигателями повышенных частот. Необходимо указать, что неблагоприятные весовые соотношения их объясняются не только низкими частотами, но и тем, что все они выполнены без промежуточных зубчатых передач и потому тихоходны. Кроме того, большинство этих двигателей старой конструкции. Кривые же II и III отно-

НБ УПУНТ (ДІТ)

сятся к двигателям, работающим с зубчатыми передачами и поэтому значительно более быстроходным. В табл. 16 приведены некоторые данные касающиеся параметров асинхронных тяговых двигателей итальянских ж. д. Размеры в ней даны в mm.

ТАБЛИЦА 16.

Основные данные тяговых трехфазных асинхронных двигателей.

KW_h	KW_∞		U	$2p$	Внешние диаметры в mm		Длина железа их в mm	n	Скорость ротора в m/sec	Тип передачи
					ротора	статора				
960	815	$16^2/_3$	3 600	8	1 220	1 498	850	250	16	Рыч.
1 100	935	$16^2/_3$	3 600	8/6	1 180	1 500	850	330	20	
735	625	$16^2/_3$	3 600	12/8	1 297	1 567	816	250	17	
1 300	1 220	$16^2/_3$	1 800	12/8/6	1 396	1 760	710	330	23,8	
1 040	890	$16^2/_3$	3 600	8	1 290	1 585	780	250	17	„
980	830	45	1 600	12/8	1 196	1 470	670	660	41,5	Зуб. рыч.

Если обратиться к количественному соотношению отдельных типов современных тяговых асинхронных двигателей, то наибольшее количество их приходится на низкочастотные системы. Объясняется это, главным образом, тем, что наибольшее распространение трехфазный ток имеет в Северной Италии, где применена система тока низкой частоты. Как показали приведенные соображения, низкая частота с точки зрения экономики двигателей не может считаться наивыгоднейшей. Двигатели с повышенными частотами, проигрывая в отношении к. п. д. и $\cos\varphi$, имеют преимущества в весовом отношении. Ввиду указанного применение промышленных частот с точки зрения экономики двигателей не должно являться препятствием, а наоборот, следует ожидать, что в большинстве случаев оно должно сопровождаться положительным эффектом.

IV. МЕТОДЫ ИСКУССТВЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.

1. Основные законы вентилирования.

Современное строительство тяговых двигателей характеризуется широким применением различных способов искусственного охлаждения. Для тяги получить легкий двигатель важно не только с точки зрения его удешевления, но часто и с точки зрения уменьшения мертвого веса поезда. Особенно важна вентиляция для машин закрытого типа, к числу которых принадлежит и большинство типов тяговых двигателей.

Насколько велико значение интенсивности охлаждения, видно из того, что наличие такого, казалось бы, маловажного факта, как открытие коллекторной крышки кожуха, увеличивает длительную мощность на 20—25%. Другой интересный факт При работе на линии двигатели закрытого типа, охлаждаясь встречным воздухом получают температуры нагрева на 15—20° C ниже по сравнению с теми, которые они имеют при стационарном режиме в условиях одного и того же средне-нагревательного тока.

Первые попытки усилить интенсивность охлаждения тяговых двигателей проявились в виде применения на валу двигателей особых крыльчатых вентиляторов, назначение которых было перемешивать воздух внутри кожуха. Подобные вентиляторы, однако, особой пользы принести не могли и потому вскоре были оставлены. В настоящее время вентиляция осуществляется исключительно путем прогонки внешнего воздуха через двигатели.

Процесс вентиляции тяговых двигателей, как и вообще всех электрических машин, в основном подчинен общим законам аэродинамики. Главными факторами, с которыми приходится иметь здесь дело, являются давления воздушных масс и скорости их движения. Как известно, эти два фактора находятся во взаимной связи друг с другом. В общем случае давление p складывается из двух соста-

НБ УГУНТ (ДІІТ)

вляющих из давления статического p_c и давления динамического $p_д$. Первое представляет собою давление между внутренними элементами воздушных масс или давление их на соприкасающиеся с ними поверхности других тел. Второе вызывается движением воздуха и действует только в таких пунктах, где воздух движется. Для каждого момента времени и для каждого пункта основной закон аэродинамики покоится на равенстве:

$$p = p_c + p_д. \tag{77}$$

В качестве единиц для измерения давлений чаще всего применяют миллиметр водяного столба (mm ВС), равный по величине 1 kg/m². При таких условиях динамическое давление может быть выражено соотношением:

$$p_д = \frac{\gamma v^2}{2g}, \tag{78}$$

где γ—вес в kg одного m³ воздуха и v—скорость его движения в m/sec.

Формула (78) показывает, что по мере изменения скорости движения воздушного потока соотношение статического и динамического давления непрерывно меняется. При постоянном общем давлении по мере возрастания скорости статическое давление падает, и, наоборот, при уменьшении скорости оно растет, достигая максимумов в пространствах воздушного покоя. При движении воздушные потоки встречают на своем пути сопротивления ($R_в$). Последние вызываются трением частиц воздуха о боковые стенки направляющих движение поверхностей, а также всякого рода вихревыми движениями, появляющимися преимущественно на угловых гранях этих поверхностей. Особенно велики получаются вихревые потери в местах входа и выхода воздуха и вообще во всех тех пунктах, где скорость воздушных потоков резко меняется.

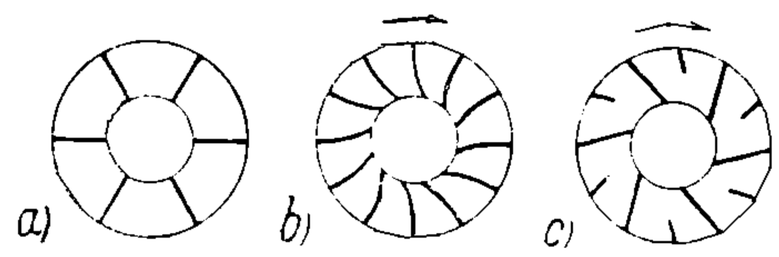


Рис. 119. Схемы вентиляторов с различными профилями лопаток.

Основная часть сопротивления, трение воздушных частиц о боковые поверхности, подчинено формуле:

$$R_в' = \rho \frac{U}{Q} l \frac{\gamma v^2}{2g} \tag{79}$$

где ρ—воздушный коэфициент трения, U—периметр сечения, через которое следует воздушный поток, Q—площадь его поперечного сечения и l—длина пути.

Для вихревых сопротивлений дать формулу практически не представляется возможным. Однако, в отношении скоростей их принято считать так же, как и основные сопротивления, пропорциональные квадратам скоростей.

Общий закон движения воздушного потока от сечения с p_c' и v_1 до сечения с p_c'' и v_2, принимая на этом пути суммарное сопротивление равным $R_в$, можно выразить соотношением:

$$p_c' - p_c'' = \frac{\gamma}{2g}(v^2_2 - v^2_1) + R_в. \tag{80}$$

Как показывает формула (80), для передвижения масс воздуха необходимо иметь разность давлений. Она создается с помощью вентиляторов, путем напора или путем разрежения, давая в первом случае тип нагнетательного, а во втором—тип всасывающего процесса.

Вентиляторы, применяемые для охлаждения тяговых двигателей, берутся с различной формой лопастей (рис. 119). Большим распространением пользуются вентиляторы с радиальными лопатками (рис. 119-а). Преимущество их в том, что они могут работать в обоих направлениях вращения. Недостаток их—в мало выгодном профиле лопастей. В этом отношении фигурный тип последних имеет большое преимущество. Вентиляторы с радиальными лопатками применяются, главным образом, при насадке вентилятора непосредственно на вал. Вентиляторы же с фигурными лопастями берутся с приводом от особых двигателей, работающих при неизменном направлении вращений и определенных скоростях.

Величина теоретической разности давлений или разрежений, создаваемых вентилятором (рис. 120), может быть определена выражением:

$$h_u = \frac{\gamma(u^2_2 - u^2_1)}{2g} + \frac{\gamma(w^2_1 - w^2_2)}{2g} + \frac{\gamma(c^2_2 - c^2_1)}{2g}. \tag{81}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Здесь u_1 и u_2 — окружные скорости движения точек внутренней и внешней периферий вентиляторного колеса, w_1 и w_2 — скорости воздуха по отношению к лопаткам в тех же точках, c_1 и c_2 — там же скорости результирующие.

Первый член правой части уравнения представляет собою напор статического происхождения. Он вызывается эффектом центробежных усилий, действующих на частицы воздуха, находящиеся в пространстве лопастных камер. Как всякий центробежный эффект, он определяется величинами, пропорциональными квадрату окружных скоростей. Второй член дает напор, вызываемый другим явлением Известно, что при движении воздушных масс в воздухопроводе, в данном случае— в камерах вентилятора, скорость воздушных потоков зависит от поперечного сечения. Если взять в воздухопроводе любые два сечения, то давление между ними согласно основному закону аэродинамики зависит от величины, пропорциональной разности квадратов скоростей движения воздуха по этим сечениям. В вентиляторах нормально сечение входа меньше сечения выхода, чему соответствует $w_1 > w_2$. Третий член формулы (81) вызывается динамикой входящего и выходящего воздуха. Этот эффект зависит от абсолютных величин скоростей входа и выхода c_1 и c_2. Как видно из рис. 120, величины c определяются геометрической суммой окружной скорости воздуха и скорости вдоль лопатки. На рис. 120 через β_1 и β_2 обозначены углы наклона поверхностей лопаток к тангенциальным скоростям u_1 и u_2. Очевидно, те же углы β_1 и β_2 дают и наклон скоростей w_1 и w_2 при входе и выходе.

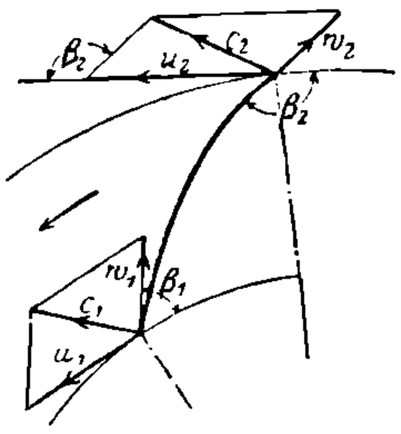


Рис. 120. Диаграмма скоростей воздушных масс при действии вентилятора.

Из рис. 120 следует:

$$c_2^2 = u^2_2 + w^2_2 + 2\,u_2 w_2 \cos\beta_2$$

и

$$c_1^2 = u^2_1 + w^2_1 - 2\,u_1 w_1 \cos\beta_1.$$

Подстановка этих выражений в формулу (81) дает:

$$h_u = \frac{\gamma\,(u^2_2 - u^2_1)}{g} + \frac{\gamma\,(u_2 w_2 \cos\beta_2 + u_1 w_1 \cos\beta_1)}{g} \qquad (82)$$

Для радиального вентилятора $\beta_1 = \beta_2 = 90°$, в результате чего теоретический напор для него определяется выражением:

$$h_u = \frac{\gamma\,(u_2^2 - u^2_1)}{g}\ \text{mm ВС.} \qquad (83)$$

Реальная величина получаемых напоров всегда ниже теоретической. Причина этого заключается во вредных сопротивлениях, которые приходится преодолевать при прогонке воздуха через вентилятор. Потери эти принято учитывать особым к. п. д., называемым манометрическим ($\eta_м$) При таких условиях полезный напор или разрежение определится равенством:

$$h = \eta_м h_u. \qquad (84)$$

Величина манометрического коэфициента полезного действия в зависимости от величины и конструкции вентиляторов колеблется в пределах 0,40—0,85. Особенно она низка для простейших радиальных вентиляторов применяемых на валу двигателей.

Мощность, потребная для приведения в движение вентилятора, определяется выражением:

$$KW = \frac{V_0 h}{102\,\eta} \qquad (85)$$

где V_0 — объем воздуха в m^3/sec. прогоняемый через вентилятор, и η — полный его к. п. д., учитывающий все механические и воздушные потери как самого вентилятора, так и двигателя, приводящего его в движение.

К. п. д. среднего типа вентиляторов с независимым двигателем, применяемых в тяге, следует ожидать около 0,7—0,75. Для улучшения эффекта вентиляторы с независимым двигателем обычно снабжаются диффузорами, представляющими собою большие резервуары, куда направляется воздух, выходящий из камер вентилятора. Назначение диффузоров — обратить кинетическую энергию выходящего из камер

НБ УГАЖНТ (ДІІТ)

воздуха в энергию напора, что дает возможность более удобно и рационально использовать перерабатываемые вентилятором воздушные массы.

К. п. д. вентиляторов радиальных типов с насадкой на вал двигателей должен получаться значительно ниже, чем у вентиляторов независимых. Есть основание полагать, что к. п. д. у них в среднем должен быть порядка 0,35—0,45.

2. Типы вентиляции тяговых двигателей.

По типу вентиляции тяговые двигатели могут быть разбиты на двигатели с самовентиляцией и с вентиляцией независимой. При первой системе вентилятор сидит непосредственно на валу двигателя, а при второй—воздух подается в двигатель от специального мотор-вентилятора, или совершенно независимого от двигателя, или иногда прикрепляемого к его кожуху или станине.

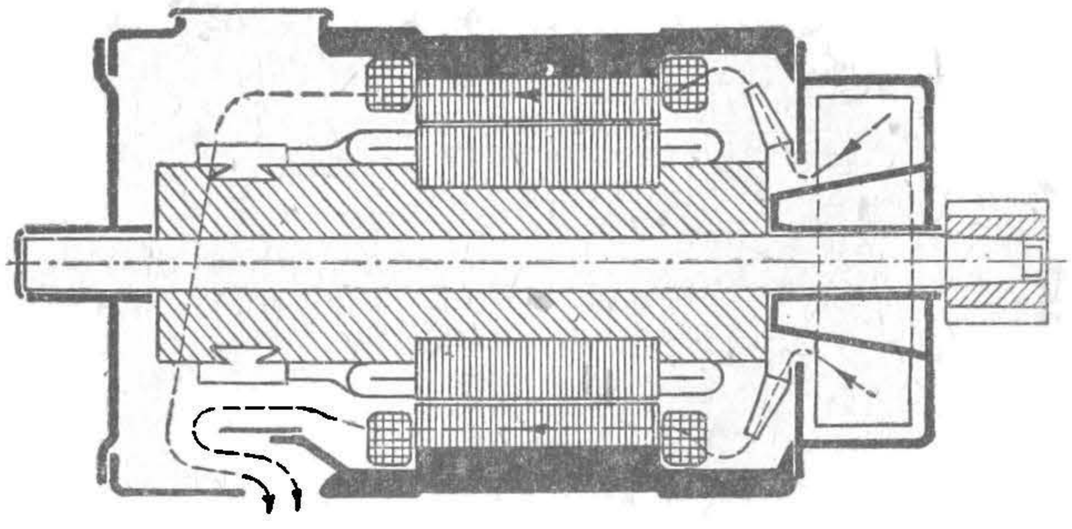


Рис. 121. Система ординарной вентиляции.

Двигатели с самовентиляцией в зависимости от характера движения охлаждающего воздуха разделяются на системы с ординарной и с двойной вентиляцией. В первом случае охлаждаются только внешние поверхности внутренних частей двигателя (рис. 121). Во втором случае, помимо внешних поверхностей, воздух прогоняется и через каналы, сделанные в толще железа якоря или ротора.

Двойная вентиляция осуществляется в виде последовательной, параллельной или компаундной. При последовательном охлаждении охлаждающий поток воздуха сначала проходит через внешние поверхности и затем через внутренние каналы якоря

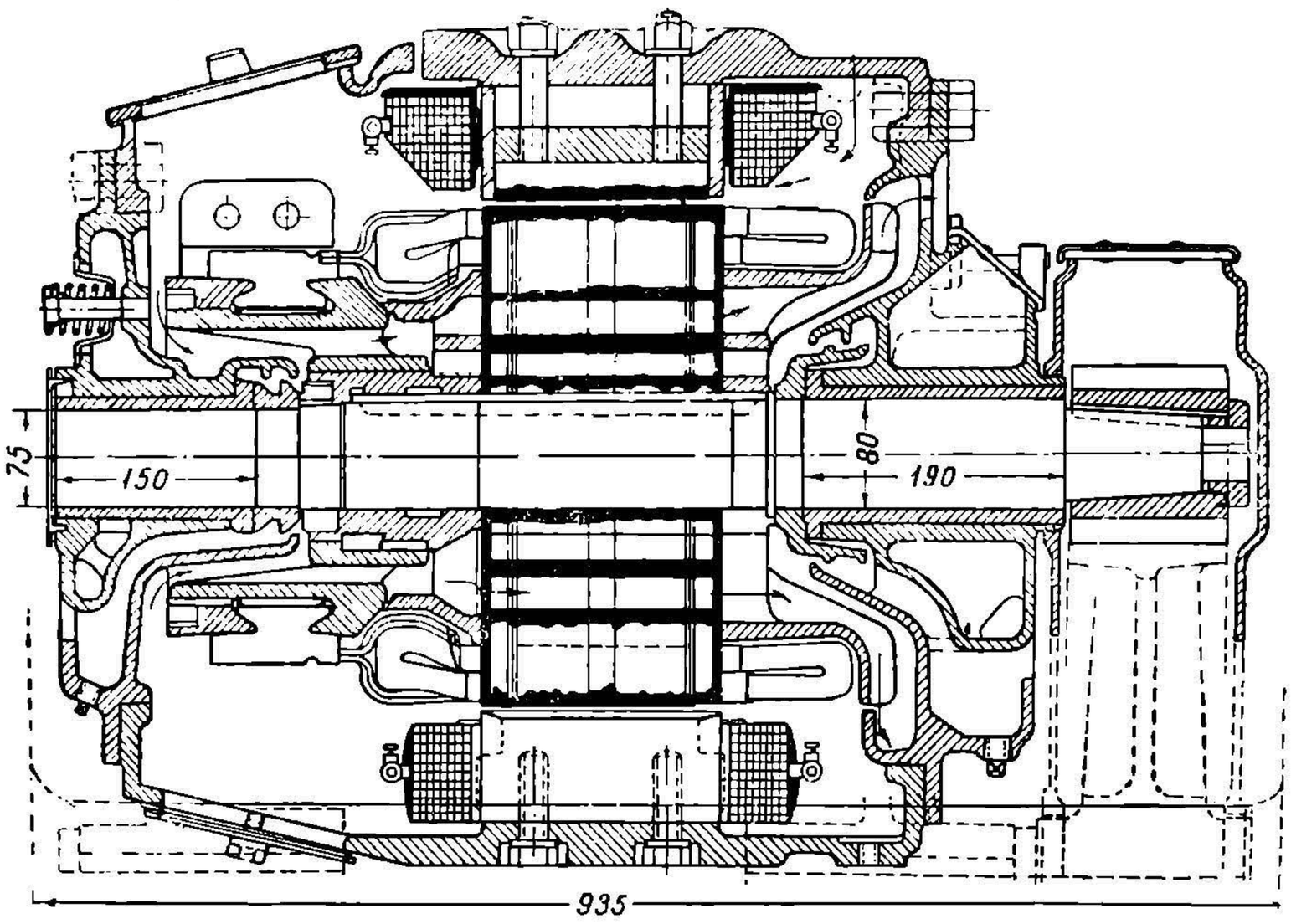


Рис. 122. Система последовательной вентиляции.

(рис. 122). Может быть и обратная картина. Сначала воздух проходит через каналы якоря, а затем по внешним поверхностям. Вентилятор здесь применяется однокамерный.

Параллельная вентиляция характеризуется двумя воздушными потоками, идущими одновременно по внешним поверхностям и каналам якоря (рис. 123). Вентиляторы при параллельном охлаждении берутся чаще всего двухкамерные, с подразделением камер для отдельных потоков. Однокамерные вентиляторы применяются зна-

НБ УГУНТ (ДІІТ)

чительно реже. При них труднее правильно распределить отдельные воздушные потоки. Преимущество же их — в возможности на случай засорения якорных каналов использовать вентилятор полностью для внешнего охлаждения.

Компаундная вентиляция характеризуется поступлением охлаждающего воздуха внутрь кожуха двигателя в два приема (рис 124). Сначала воздух засасывается в якорные каналы на стороне коллектора, а затем при выходе его из каналов к нему присоединяется новый холодный воздушный поток. В результате внешние поверхности якоря, катушек и внутренние части кожуха омываются объединенным воздушным потоком, достаточно охлажденным вновь поступающим воздухом.. Вентиляторы при компаундной вентиляции применяются двухкамерные.

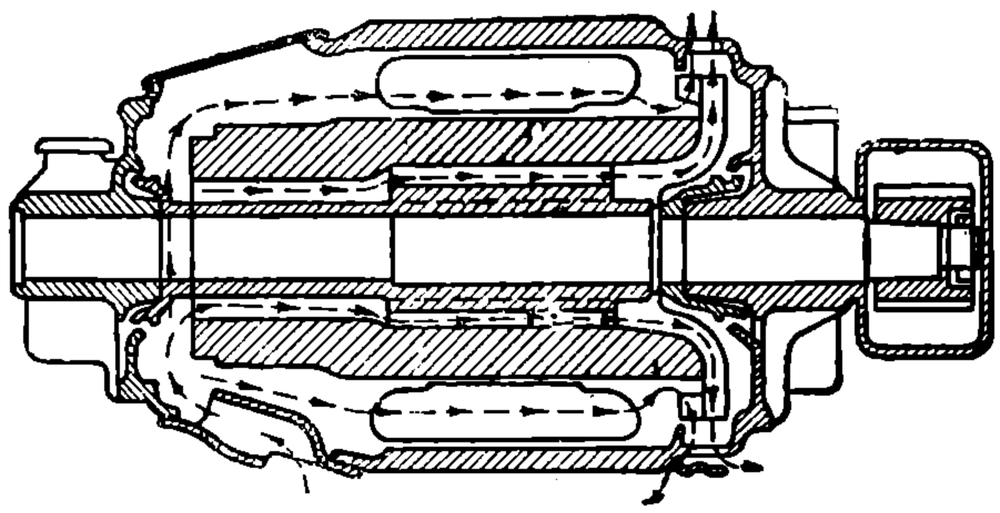


Рис. 123. Система параллельной вентиляции.

В отношении эффекта двойное охлаждение должно быть признано более радикальным, чем ординарное. Помимо большей интенсивности действия, оно дает более правильное и равномерное охлаждение отдельных частей двигателя. Однако, по мере понижения мощности двигателей двойное вентилирование начинает терять свои преимущества. Объясняется это тем, что при малых мощностях современные тяговые двигатели в большинстве случаев, обладая большой быстроходностью, имеют относительно небольшие массы якорного железа, достаточно интенсивно охлаждающиеся и без внутренних каналов. Помимо этого, при малых диаметрах якорей трудно сделать достаточно широкие каналы. Затруднения эти вызываются как условиями проведения магнитного потока, так и механической прочностью якорного железа. Этим обстоятельством объясняется тенденция целого ряда заграничных фирм (SSW, Bergmann'a, Sachsenwerke) применять ординарную вентиляцию для двигателей с мощностями до 40—50 kW.

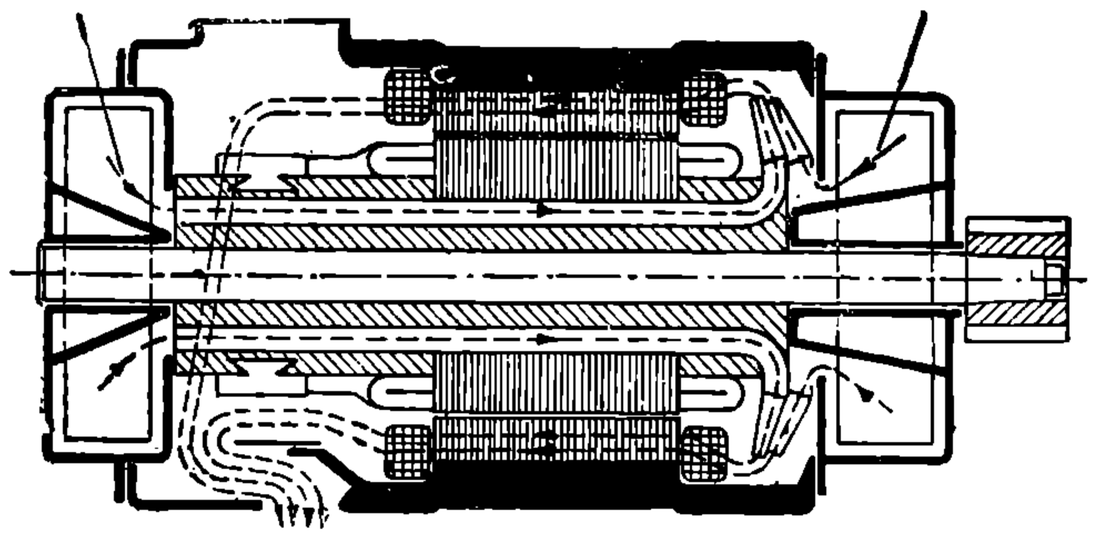


Рис. 124. Система компаудной вентиляции.

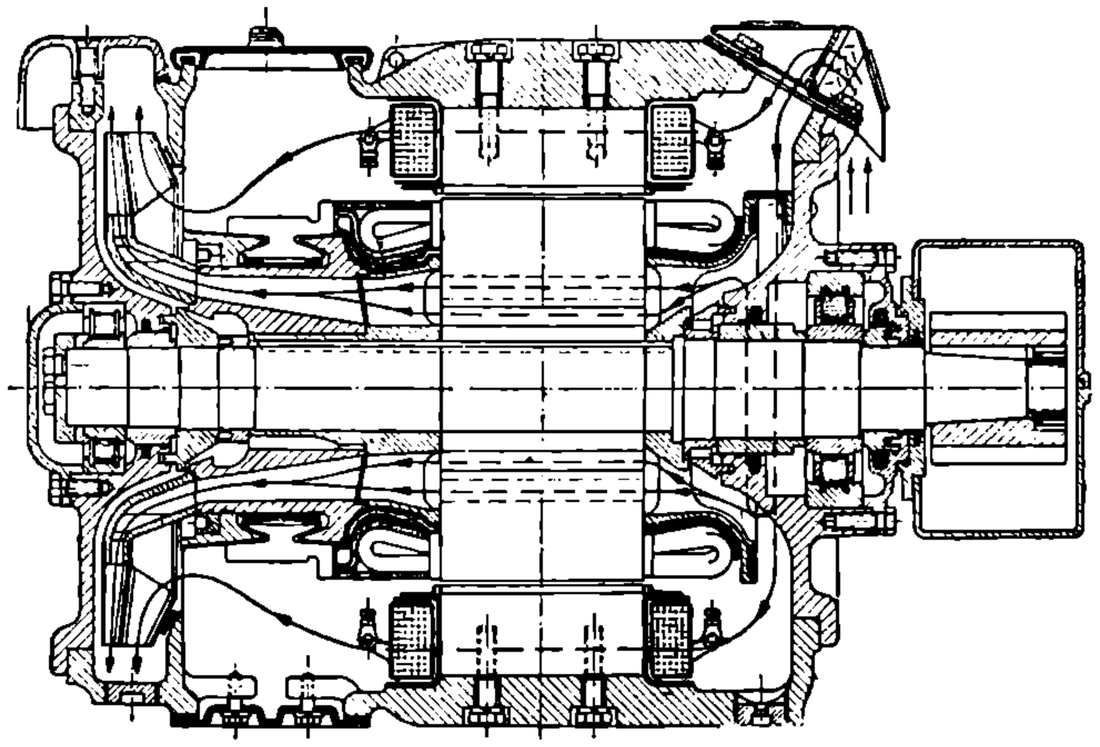


Рис. 125. Система вентиляции AEG.

Из систем двойной вентиляции наибольшего эффекта следует ждать от вентиляции параллельной. Близка к ней компаундная. Хуже действует последовательная, так как здесь воздух в период второго этапа своего движения является уже сильно подогретым. Поэтому последовательная вентиляция теперь применяется редко. Наибольшим распространением пользуется вентиляция параллельная. Компаундная применяется, главным образом, фирмой BBC, ее создавшей и разработавшей. Применена она также и в двигателях для пригородных ж. д. СССР зав. им. Кирова.

При прогонке воздуха через двигатели приходится считаться с возможностью проникновения внутрь воздуха пыли, грязи, влаги и снега. При независимой вентиляции воздух можно брать в местах, достаточно удаленных от поверхности почвы. Входные отверстия в этих случаях помещаются чаще всего в боковых стенках кузовов подвижного состава и защищаются особыми жалюзи. Трубопроводы, подводящие воздух к двигателям, соединяются с их кожухами эластичными гармониями.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

При независимой вентиляции опасных загрязнений двигателей в большинстве случаев не наблюдается.

Значительно хуже обстоит дело с самовентиляцией, где воздух берется обычно из-под кузова. Опыт показывает, что в данном случае с воздухом засасывается много грязи и пыли. В результате двигатель часто сильно загрязняется. Особенно засоряются и забиваются пылью внутренние якорные каналы В целях борьбы с таким загрязнением AEG предложило особую конструкцию (рис. 125). Здесь сверху якорные каналы прикрыты крышкой, благодаря чему воздух, поступая сверху, должен сделать некоторый круговорот, прежде чем войти в якорь. За время этого круговорота воздух успевает несколько освободиться от пыли. Для очистки входящего воздуха, помимо металлических сеток, входные отверстия иногда снабжают фильтрами, состоящими чаще всего из конского волоса. Фильтры значительно способствуют очищению воздуха, но зато сильно увеличивают входные сопротивления. Самые отверстия для ввода воздуха в двигатель рационально расположить сверху или в лобовых частях кожуха. Отверстий снизу следует по возможности избегать. Зимой и вообще в холодное время, когда условия охлаждения двигателей улучшаются, иногда представляется возможным отверстия закрыть наглухо. Затруднения, получающиеся при подаче воздуха снизу из-под кузова, заставляют иногда и при самовентиляции переходить на подачу воздуха через боковые стенки или через крышу вагонов.

Особенно опасаться загрязнения двигателей приходится в случаях, когда тормозной эффект выделяет много металлической пыли с колодок и бандажей. Металлическая пыль опасна не только в отношении загрязнения, но и в отношении возможности порчи изоляции и получения пробоя. Такие явления наиболее вероятны в электровозах, особенно товарных при ручных тормозах на вагонах и при тяжелых горных профилях, так как в этих случаях колодки электровоза особенно интенсивно работают. Следует указать, что при интенсивном торможении металлическая пыль иногда проникает внутрь двигателей даже при независимой вентиляции. Например, исследования государственных швейцарских железных дорог показали, что в составе пыли внутри их электровозных двигателей наряду с почвенными элементами и влагой содержалось 52% железа и чугуна, 10% угля и 4,5% меди. Последние две составляющие обязаны своим появлением коллектору и щеткам. а первая — колодкам и бандажам.

При работе двигателей с вентиляцией замечается еще одно осложнение. Американская практика указывает, что у двигателей с вентиляцией вследствие выветривания быстрее срабатываются щетки и коллектор.

В отношении двигателей с самовентиляцией возникает вопрос, с каким процессом, нагнетательным или всасывающим, рационально работать. Преимущество всасывающего процесса в том, что при нем получаются несколько меньшие скорости входа воздуха, что уменьшает количество вредных примесей. проникающих внутрь двигателя. Помимо этого, и весь процесс движения воздуха в двигателе получается более плавным и с меньшими вихревыми потерями. Нагнетательный процесс протекает более бурно, сопровождаясь различного рода ударными эффектами воздушных масс и вихревыми их движениями. Это явление должно способствовать усилению интенсивности охлаждения, но вместе с тем оно влечет за собою и возрастание сопротивлений движению воздуха, что при данном вентиляторе должно ослаблять действие вентиляции. Некоторое ее ослабление происходит также еще и потому, что при проходе через нагнетательный вентилятор воздух уже несколько подогревается. Подогрев этот определяется приблизительно в 5°С. В современных конструкциях преимущественно применяются вентиляторы всасывающие, хотя встречаются иногда при одиночной вентиляции (рис. 121) и нагнетательные. Некоторые системы, как компаундные и отдельные типы последовательных комбинируют всасывание и нагнетание.

Спорным вопросом в двигателях с самовентиляцией является наиболее рациональное местоположение вентилятора. Его можно поместить или на стороне коллектора, или на стороне противоположной. Преимущество первой конструкции — в том, что при всасывающем процессе коллектор, наименее защищенная часть машины, удален от места входа воздуха, который поэтому, вступая с ним в соприкосновение, уже достаточно очищен. Кроме того, тогда вся угольная и металлическая пыль, получаемая с коллектора и щеток, выбрасывается в атмосферу, не проходя через внутренние активные части машины.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Насадка вентилятора на стороне, противоположной коллектору, дает преимущество, главным образом, в конструктивном отношении. При такой конструкции удобнее закрепить вентилятор на валу, и при прочих равных условиях длина двигателя получается несколько меньше. Вопрос о том, какая из двух точек зрения наиболее правильна, считать разрешенным пока нельзя. В Америке предпочитают насадку вентилятора на стороне, противоположной коллектору, в Европе же встречаются обе системы. В случае нагнетательных процессов, а также при последовательном и компаундном охлаждении, представляется возможным насаживать вентиляторы на стороне, противоположной коллектору, чем достигается одновременно и преимущество первой системы.

В коллекторных однофазных двигателях, обладающих, как правило сильно развитыми коллекторами и большим количеством щеток, вентилятор насаживается обычно на стороне коллектора, благодаря чему двигатель предохраняется от особенно опасной здесь угольной и металлической пыли.

Независимая вентиляция, по общему правилу, устраивается по принципу двойной. Воздух прогоняется не только через внешние поверхности якоря, коллектора и катушек, но и через внутренние каналы в железе якоря и в теле коллектора. В большинстве случаев применяется вентиляция с параллельным движением воздушных потоков, причем впуск воздуха производится как со стороны коллектора, так и со стороны противоположной. Первая система преимущественно практикуется в Америке вторая— в Европе. Независимая вентиляция действует по принципу нагнетания воздуха в двигатель. Одним из преимуществ такой системы является отсутствие вакуума в кожухе двигателя, что предохраняет от проникновения в него пыли и влаги из атмосферы. Кроме того, при нагнетании удобнее забирать воздух из внутреннего помещения кузова, откуда он получается более чистым и свободным от пыли. При всасывании для того, чтобы забирать воздух изнутри, нужно было бы иметь в двигателе два воздухопровода. Один должен был бы итти в кузов для забора воздуха, а другой туда же к всасывающему вентилятору.

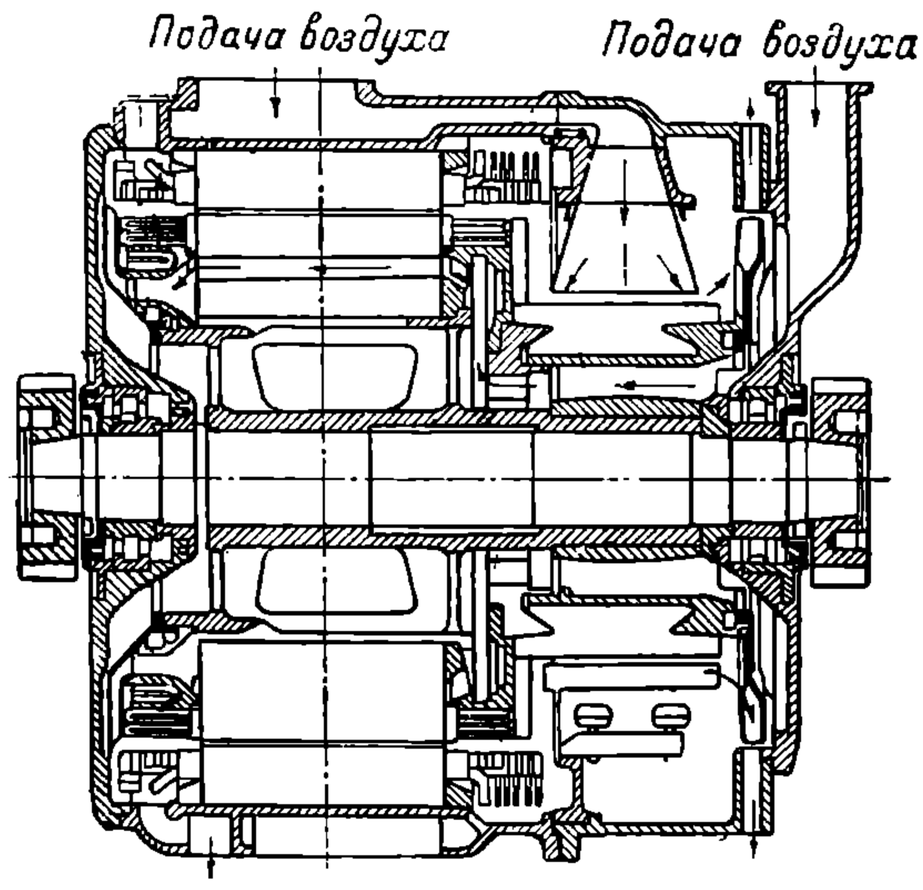


Рис. 126. Система независимой вентиляции с добавочными вентиляторами на валу двигателя

В зубчатых статорах приходится делать специальные каналы для охлаждения. Очень интенсивна вентиляция современных однофазных коллекторных двигателей. В них требуется особенно сильно охлаждать коллектор, причем струи охлаждающего воздуха здесь рационально направлять от коллектора прямо в выходные отверстия. Для усиления вентиляции, кроме вдувания воздуха с помощью независимого вентилятора, в коллекторных однофазных двигателях иногда ставят еще на валу самого двигателя добавочные вентиляторы, с помощью которых воздух направляется по требуемым путям. Примером такой ультраинтенсивной вентиляции может служить двигатель SSW (рис. 126), имеющий два добавочных вентилятора на своем валу и получающий воздух через два независимых прохода.

Применение искусственного охлаждения дает возможность значительно понизить вес и стоимость двигателей. Табл. 17 указывает, на какие результаты в этом отношении можно рассчитывать. Таблица дана для различных типов вентиляции.

Большой интерес представляет также табл. 18, из которой видно, как на увеличение мощности влияют отдельные элементы вентиляции. Табл. 18 показывает, что искусственное охлаждение, главным образом, оказывает влияние на увеличение продолжительных мощностей двигателей, что, конечно, для эксплоатации имеет наибольшее значение.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ТАБЛИЦА 17.

Данные о системах вентиляции тяговых электродвигателей.

Тип вентиляции	Увеличение I_∞ по сравнению с закрытым двигателем в %	Отношение I_∞/I_h при полном напряжении на коллекторе	Примечание
Закрытый двигатель .	0	0,36—0,45	Двигатели различных мощностей
Ординарная самовентиляция	50— 70	0,55—0,62	Применяется для мощностей до 40—80 kW
Последовательная самовентиляция	60— 75	0,57—0,66	Двигатели различных мощностей
Параллельная самовентиляция	70--100	0,65—0,78	То же
То же, для ультрабыстроходных двигателей	100 —175	0,82—0,95	Небольшие двигатели с числом оборотов в min 1 100—1 250
Компаундная самовентиляция	70— 95	0,64—0,77	Различных мощностей
Независимая вентиляция	120 —150	0,8—0,9	Двигат. выше 150 kW

ТАБЛИЦА 18.

Влияние типа вентиляции на мощность тягового двигателя.

Тип вентиляции	PS_h	PS_∞	Время установления температуры
Параллельная самовентиляция	112	75	Около 5 часов
Тот же двигатель с закрытыми якорными каналами (ординарная самовентиляция)	107	65	7
Тот же двигатель с закрытыми входными и выходными отверст.	101	47	8
Такой же двигатель без вентилятора с закрытыми входными и выходными отверст.	100	45	10

Часовые мощности возрастают от применения вентиляции относительно незначительно, получая прирост порядка 8—12%. Вообще, чем выше перегрузки, тем меньшее значение имеет вентиляция. В эксплоатации наибольшего эффекта от вентиляции следует ждать на линиях с профилями, не имеющими резко выраженных индивидуальных подъемов и с относительно большими длинами отдельных перегонов, так как при таких условиях двигатели не будут иметь значительных или часто повторяющихся перегрузок.

Вопрос о том, какая вентиляция — независимая или самовентиляция — является более рациональной, решается в зависимости от типа движения. С технической точки зрения преимущество на стороне независимой. При ней подача воздуха в двигатель не зависит от скорости движения поезда. Вентиляторы можно взять такие, которые требуются по условиям необходимого количества воздуха.

При самовентиляции количество воздуха, прогоняемого через двигатель, определяется скоростью поезда. Большим осложнением здесь является то обстоятельство, что при уменьшении скорости поезда, происходящем чаще всего в периоды увеличения нагрузочных токов, когда нужно было бы иметь усиление эффекта вентиляции, количество охлаждающего воздуха, наоборот, понижается. Кроме того, вентиляторы при самовентиляции ограничиваются габаритами кожуха двигателя, связаны с числом его оборотов и, как уже было отмечено, имеют недостаточно удовлетворительную конструкцию. Преимущество самовентиляции—отсутствие специального вентиляторного агрегата, требующего особого места и значительного

НВ УДУНТ (ДІІТ)

ухода, особенно если двигатель вентилятора работает от высокого напряжения. В настоящее время главную область применения двигателей с самовентиляцией составляют моторные вагоны, где в силу ограничения места часто бывает затруднительно поместить вентиляторные агрегаты. Электровозы же почти исключительно работают с независимой вентиляцией двигателей.

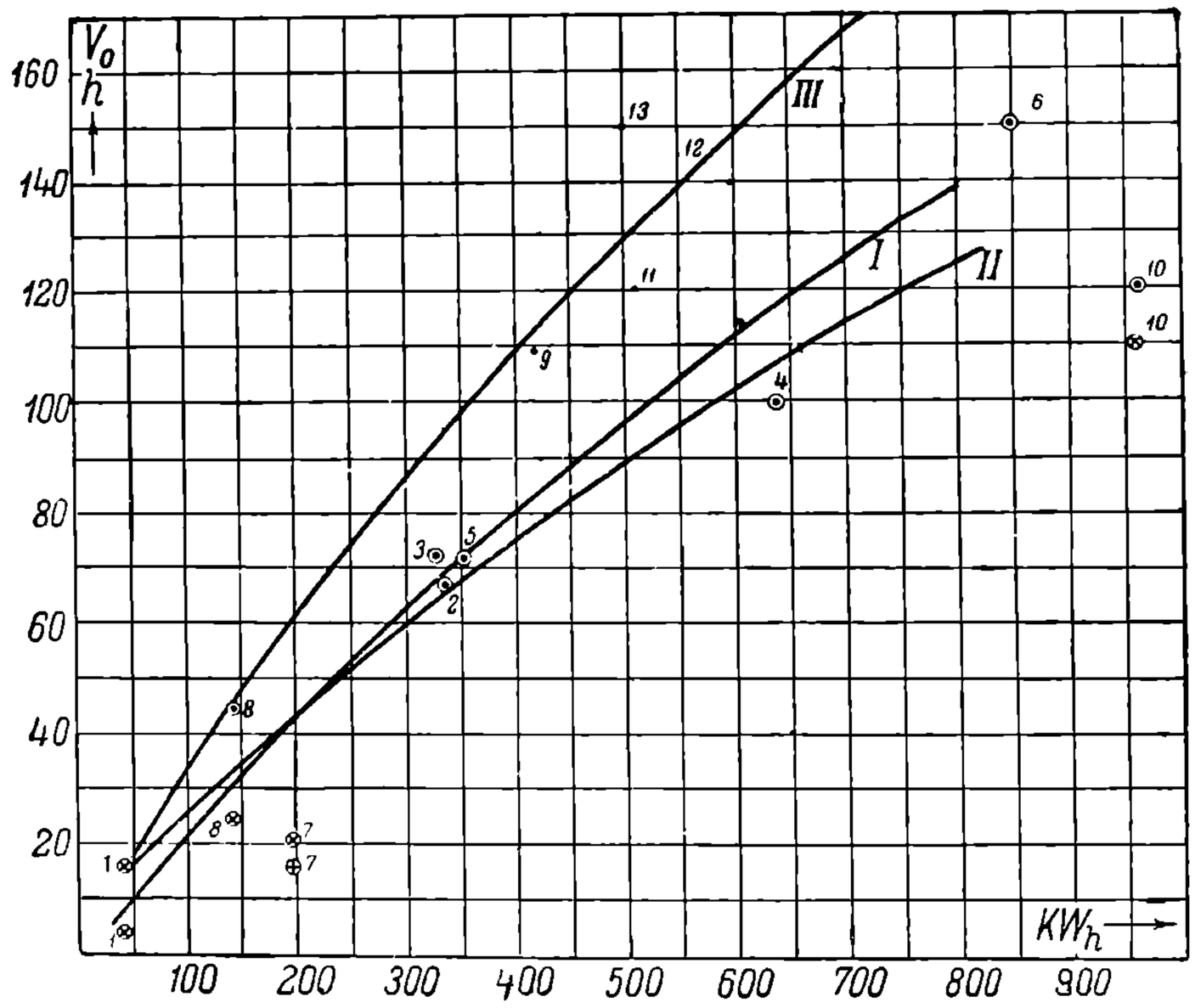


Рис. 127. Кривые, характеризующие вентиляцию тяговых электродвигателей. Объемы воздуха V_0 даны в m^3/sec и давления h в mm ВС.

На рис. 127 приведены кривые, характеризующие общее состояние вентиляции современных тяговых двигателей. Кривая I показывает зависимость средних значений количеств воздуха, прогоняемого через двигатели постоянного тока в зависимости от их мощности. Кривая II дает давления, на которые приходится рассчитывать вентиляторы при тех же условиях. Кривая III аналогична I, но относится к двигателям однофазного тока, которые, судя по имеющимся данным, расходуют больше воздуха, чем двигатели постоянного тока. На кривые рис. 127 следует смотреть, как на весьма ориентировочные, так как они построены по относительно небольшому количеству точек, при том же весьма разбросанных, из чего следует, что пока вопрос о вентиляции нельзя считать окончательно разработанным.

ТАБЛИЦА 19.

Данные о часовых и длительных мощностях тяговых двигателей.

KW		I_h		n об/мин. при I_h		I_∞			Примечание
600 V	500 V	600 V	500 V	600 V	500 V	300 V	450 V	600 V	Напряжение
18,7	15,7	37	38	1 236	1 010	32,4	34,9	35,2	Самовент.
29,8	24,6	59	60	745	605	32,5	33,8	34	То же
37,2	29,8	73	72	635	525	39,4	40,7	40,3	„
29,8	24,6	59	60	785	640	28	25,2	21,5	Закрытый
37,2	—	76	—	500	—	36,8	33	28,1	То же
82	—	157	—	812		93	99	102	Самовент.
108	—	205	—	760	—	128	131	128	То же
130	—	246	—	670	—	120	105	86	Закрытый
270		500		650	—	—	—	420	Независ.

Для того, чтобы дать представление о соотношениях мощностей в существующих типах тяговых электродвигателей при различных типах вентиляции, приведена табл. 19.

V. НАГРЕВАНИЕ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.

1. Основные законы нагрева двигателей, как однородных тел.

Процесс нагревания тяговых электродвигателей представляет собою один из важнейших вопросов, связанных как с их расчетом и конструированием, так и с последующей их эксплоатацией. Инженер-конструктор должен уметь правильно определить температуру нагрева проектируемого им двигателя. Инженер, проекти-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

рующий дорогу, должен знать методы, с помощью которых он мог бы установить температуру двигателя в процессе его предполагаемой эксплоатации. Двигатель будет только тогда пригоден для работы, если температура его не будет превосходить заранее установленных для нее норм.

При изучении нагрева тяговых электродвигателей, как и вообще электрических машин, приходится исходить из общих законов нагревания. Для того, чтобы изучить процесс нагрева тягового электродвигателя, представляющего собою в тепловом отношении сложную систему, необходимо предварительно выяснить законы нагрева однородных тел, на базе которых можно разрешить вопрос и о нагреве машин в целом.

Нагревание электрической машины и отдельных ее частей происходит вследствие выделяемых ею потерь. Если обозначить эти потери через $P_п$, то количество тепла, образуемого ими за любой промежуток времени dt, можно определить выражением:

$$Q = P_п dt.$$

Потери электрических машин принято выражать в ваттах. В связи с этим теплоту в теории нагрева машин удобнее всего выражать или в джоулях, или в ваттминутах, или в ваттчасах.

В общем случае часть тепла, определяемого приведенной формулой, идет частично на нагрев самой машины, частично же оно тем или другим способом выделяется в окружающую среду. Количество тепла, идущее на нагрев самого тела, определяется его теплоемкостью. Если в течение элемента времени dt температура его изменилась на $d\tau$, то количество теплоты, определяемое теплоемкостью, равно:

$$q_1 = A d\tau,$$

где через A обозначена теплоемкость в джоулях.

Количество теплоты, выделяемое за тот же элемент времени в окружающую среду, зависит от интенсивности теплоотдачи тела и от степени превышения температуры его над температурой окружающей среды:

$$q_2 = B \tau dt.$$

Здесь B — коэфициент теплоотдачи, т. е. тепловой поток в ваттах, выделяемый данным телом при превышении его температуры над окружающей средой в 1° Цельсия, а τ — превышение температуры тела над окружающей средой в градусах Цельсия. Под тепловым потоком здесь и в дальнейшем мы подразумевали количество тепла, выделяемого в единицу времени.

Тепловой баланс при сделанных предположениях определится диференциальным уравнением:

$$P_п dt = A d\tau + B \tau dt. \tag{86}$$

Предположив общий случай, при котором в момент времени $t = 0$ машина была уже подогрета на τ_0, уравнение (86) после его интегрирования можно привести к виду:

$$t = \frac{A}{B} \ln \frac{P_п - B\tau_0}{P_п - B\tau}. \tag{87}$$

При выводе основной формулы нагрева принято вводить особое понятие, получившее название постоянной времени и определяемое выражением:

$$T = \frac{A}{B}. \tag{88}$$

При сделанной замене формулу (86) можно написать в виде показательного выражения:

$$\tau = \frac{P_п}{B}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}} \tag{89}$$

В таком виде уравнение нагревания обычно и кладется в основу тепловых расчетов электрических машин. При известных величинах $P_п$, B, T и τ_0 оно дает возможность для любого периода времени t установить соответствующее повышение температуры над окружающей средой τ.

Особо следует отметить нагревание тел, подвергающихся действию джоулевых потерь. В электрических машинах это относится к проводникам обмоток. При дан-

НБ УИУНТ (ДІІТ)

ном токе потери Джоуля растут с возрастанием температуры нагрева. Уравнение нагрева (86) для подобных случаев должно определяться выражением:

$$I^2 r_0 (1 + \alpha\tau)\, dt = A\, d\tau + B\tau\, dt, \tag{90}$$

где r_0—сопротивление обмоток при $\tau = 0$ и α—температурный коэфициент сопротивления.

При решении этого уравнения согласно предыдущему методу получается формула:

$$\tau = \frac{I^2 r_0}{B - \alpha I^2 r_0}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}} \tag{91}$$

Данное выражение показывает, что, несмотря на непрерывное увеличение с температурой сопротивления, процесс нагревания попрежнему подчиняется уже полученной раньше однозначной зависимости (89).. Особенности только заключаются в том, что в качестве потерь здесь фигурируют потери $I^2 r_0$, т. е. относимые к $\tau = 0$, и вместо нормального коэфициента теплоотдачи здесь приходится вводить некоторый эквивалентный B_t, равный значению

$$B_t = B - \alpha I^2 r_0 .$$

В случае, если кроме потерь Джоуля, тело подвергается действию и других потерь P_x, не зависящих от температуры нагреваемого тела, уравнение (90) должно принять вид:

$$\tau = \frac{I^2 r_0 + P_x}{B_t}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}} \tag{92}$$

В практику определения нагревания электрических машин уравнение нагрева (92) пока не вошло. Обычно пользуются уравнением типа (89), причем в потери $P_п$ вводятся потери Джоуля $I^2 r$, относимые к сопротивлению r, рассчитываемого для наивысшей допустимой температуры нагрева машины или для температуры, достаточно близкой к ней. В дальнейшем при изложении процесса нагревания будет положена формула (89), но принципиально все последующие положения могут быть отнесены и к уравнениям (91) и (92).

Основным затруднением при пользовании формулой (89) является установление тепловых коэфициентов B и T. Для составления представления об их сущности необходимо исследовать основное уравнение нагрева при наиболее характерных моментах работы машины. Одним из таких периодов работы является период длительной нагрузки, характеризующейся $t = \infty$. При таком условии основное уравнение нагрева примет форму:

$$\tau_\infty = \frac{P_п}{B}. \tag{93}$$

Это выражение, имеющее очень важное практическое значение, показывает, что при длительном режиме превышение температуры τ_∞ определяется частным от деления потерь, выделяемых при полной нагрузке, на коэфициент теплоотдачи. Последний согласно формуле может быть изображен в виде:

$$B = \frac{P_п}{\tau_\infty}. \tag{94}$$

Исходя из данного выражения, коэфициент B можно определить, как численно равный потерям, способным при длительном режиме поддерживать превышение температуры над окружающей средой в 1° С. Здесь могут возникнуть некоторые недоразумения. если сопоставить это определение с первоначальным, в котором B определяется, как теплоотдача. Объяснение данного обстоятельства следует искать в том, что при длительном режиме имеет место равновесие между потерями, выделяемыми машиной и теми потерями, которые за счет теплоотдачи выделяются во внешнюю среду. Таким образом, при длительном режиме потери машины численно равны полной ее теплоотдаче.

Обращаясь к другому тепловому коэфициенту — постоянной времени T, согласно уравнениям (88) и (94) можно представить его в виде:

$$T = \frac{A}{P_п}\tau_\infty . \tag{95}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Отсюда T можно характеризовать как время, в течение которого под действием потерь $P_п$ превышение температуры достигло бы той же величины τ_∞, что и при длительном режиме, если бы все тепло шло исключительно на нагревание самой машины, т. е. поглощалось бы ее теплоемкостью без всякой отдачи его во внешнюю среду. Такой режим как бы противоположен длительному, при котором все тепло, вырабатываемое в машине, выделяется в окружающую среду. Нетрудно видеть, что размерность T определяется единицами времени. Если A выражено в джоулях, а $P_п$ в ваттах, то T должно выражаться в секундах. Если A выразить в ваттминутах или в ваттчасах, то T соответственно выразится в минутах или часах.

Выражение (88) показывает, что T можно определить, если известна теплоемкость A и коэфициент теплоотдачи B. Если теплоемкость неизвестна, а дана только теплоотдача, то для определения T нужно, кроме длительного режима, знать еще какой-либо другой режим. Для тяговых электродвигателей в качестве основного режима чаще всего берется часовой. При потерях часового режима $P_п$, вызывающих по истечении часа повышение температуры τ_h, формула нагрева, при измерении времени в минутах, получит вид:

$$= \frac{P_п}{B_h}\left(1 - e^{-\frac{60}{T_h}}\right).$$

Отсюда постоянная времени применительно к часовому режиму может быть установлена на основании формулы:

$$T_h = -\frac{60}{2{,}3 \lg\left(1 - \frac{B_h \tau_h}{P_п}\right)} \text{ min.} \qquad (96)$$

Следует иметь в виду, что для однородных тел произведение B на T должно быть всегда равно теплоемкости A:

$$A = BT. \qquad (97)$$

Это выражение показывает, что при данной теплоемкости постоянная времени всецело зависит от коэфициента теплоотдачи B. Чем больше будет последний, например, в случае повышения интенсивности искусственного охлаждения тела, тем меньше будет T.

У тяговых двигателей величина T характеризует до известной степени интенсивность их охлаждения. У двигателей закрытых без искусственной вентиляции T получается значительно выше, чем у сильно вентилируемых. Если при различных режимах, например, у самовентилируемых двигателей в зависимости от скорости, будет меняться B, то это будет вызывать и соответствующее изменение T.

Формула (92) является универсальной, справедливой не только для процесса нагрева, но и для процесса охлаждения. При работе машины в случае

$$P_п = 0$$

она принимает вид:

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{t}{T}} \qquad (98)$$

Полученное выражение характеризует охлаждение, давая возможность за каждый данный промежуток времени t определить понижение превышения температуры от начального τ_0.

Уравнение (89) дает возможность представить кривую нагрева графически. На рис. 128 она построена для случая $\tau_0 = 0$ и обозначена цифрой I. Важно иметь в виду, что та же самая кривая может определить нагрев машины и для случая, когда τ_0 не равно нулю. Если начальное превышение температуры будет τ_0, то за любой последующий промежуток времени Δt_k оно определится, как показано на рис. 128, величиною τ_k.

Рассмотрение кривой нагревания показывает, что теоретически установившаяся температура достигается по истечении бесконечно длинного промежутка времени t. Кривая нагрева имеет асимптоту, находящуюся от оси абсцисс на расстоянии, равном τ_∞. Однако, практически температура устанавливается уже по истечении нескольких часов работы.

Полезно обратить внимание на то, что если взять машины одной и той же длительной мощности, то при одной и той же нагрузке у машин без искусственной

НТБ УрГУНТ (ДІІТ)

вентиляции период практического установления температуры наступает значительно медленнее, чем у машин, имеющих искусственное охлаждение. Объясняется это тем что закрытые машины при одних и тех же длительных мощностях обладают относительно бóльшей теплоемкостью, зависящей от бóльшего их веса на единицу выделяемых ими потерь. Можно считать, что для закрытых тяговых двигателей установление температуры наступает после 10—12 часов работы, тогда как для двигателей с особенно интенсивной вентиляцией этот период сокращается до 3—5 часов. Данные, приведенные в табл. 17, могут подтвердить указанное.

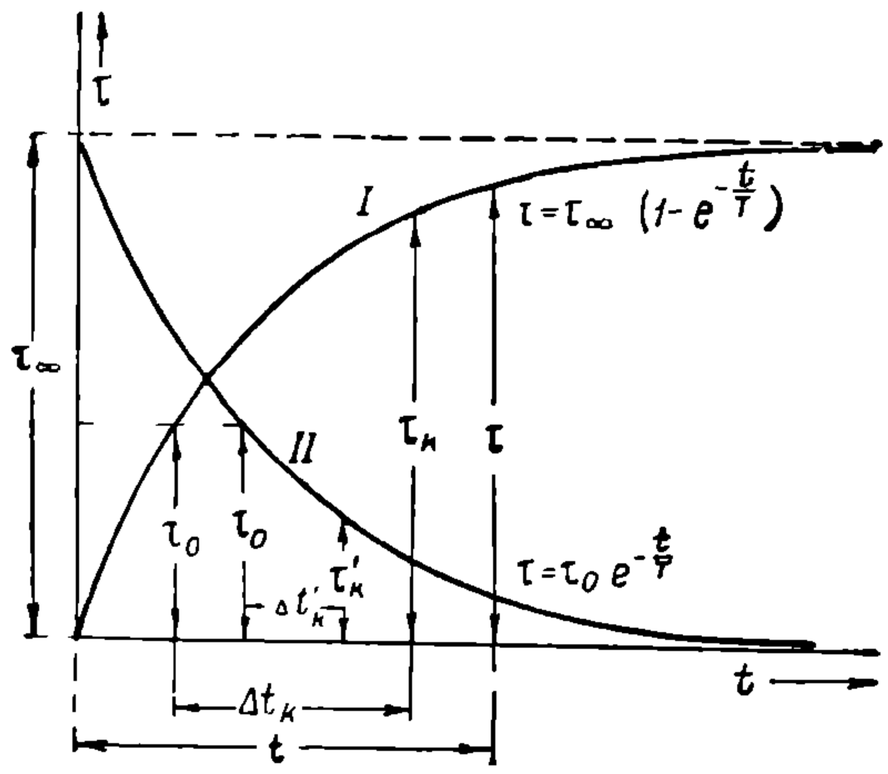


Рис. 128. Кривые нагрева и охлаждения двигателя, как однородного тела.

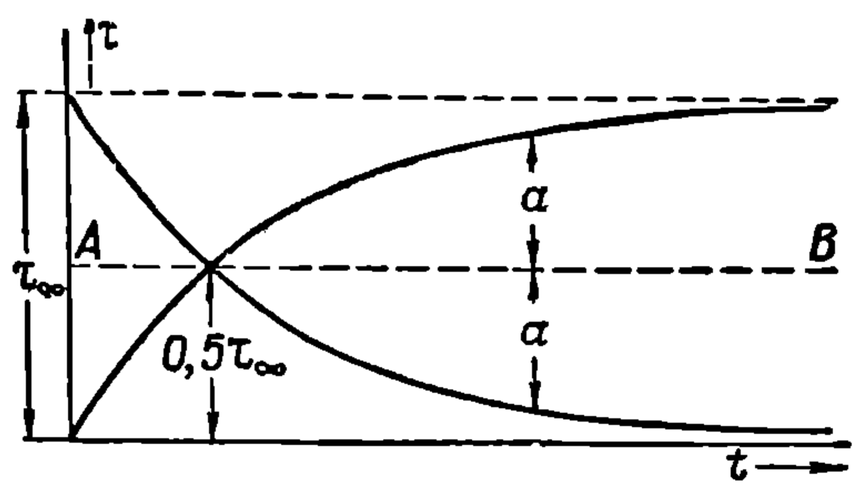


Рис. 129. Кривые симметрии нагрева и охлаждения однородных тел.

Подобно кривой нагревания графически можно изобразить и кривую охлаждения. На рис. 128 она построена согласно формуле (98). Аналогично кривой нагревания она дает возможность определить температуру, исходя как из начального превышения температуры, так и из какого угодно промежуточного. Если начальное превышение температуры будет некоторое τ_0, то за любой период времени $\Delta t_k'$ ее превышение определится, как показано на рис. 128, величиной τ_k'. Из уравнения (98) видно, что для снижения превышения температуры до нуля требуется так же, как и для достижения установившейся температуры при нагревании, бесконечно длинный промежуток времени. Асимптотой для кривой охлаждения является ось абсцисс.

Если установившееся превышение температуры при нагревании предположить равным τ_∞ и с этой температуры начать охлаждение машины; то уравнения нагрева и охлаждения при учете выражения (94) примут форму:

$$\tau=\frac{P_n}{B}\left(1-e^{-\frac{t}{T}}\right)=\tau_\infty\left(1-e^{-\frac{t}{T}}\right) \qquad (99)$$

и

$$\tau=\tau_\infty e^{-\frac{t}{T}} \qquad (100)$$

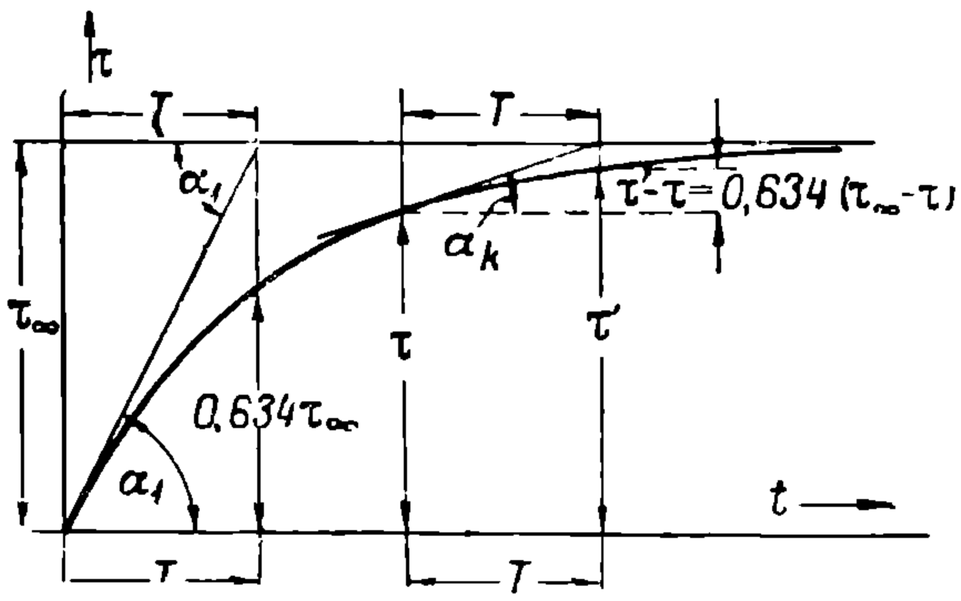


Рис. 130. Определение постоянной времени по кривой нагрева.

Обращаясь к рис. 129, построенному применительно к данному случаю, легко притти к заключению, что кривые нагревания и охлаждения являются кривыми, симметричными относительно оси *AB*, параллельной оси абсцисс и находящейся от нее на расстоянии $\frac{\tau_\infty}{2}$. Из рисунка ясно видно, что расстояния от этой оси до ветвей той и другой кривой для каждой точки должны быть равны друг другу. Те же формулы (99) и (100) показывают, что при известном τ_∞ обе кривые, по существу говоря, могут быть построены каждая на основании другой.

При наличии построенных кривых нагревания и охлаждения возможно установить весьма простой метод определения постоянной *T*. Оказывается, что значение *T* определяется любой из подкасательных на их асимптоты. На рис. 130 приведено такое построение *T* по кривой нагрева, а на рис. 131 по кривой охлаждения. Спра-

УНТ НБ (ДІТ)

ведливость высказанных положений вытекает из следующих простых соображений. Угол наклона касательной α_k к оси абсцисс для любой точки кривой нагрева может быть определен на основании уравнения (89) путем диференцирования последнего по времени:

$$\operatorname{tg}\alpha_k = \frac{d\tau}{dt} = \left(\frac{P_n}{B} - \tau_0\right)\frac{e}{T}^{-\frac{t}{T}} = (\tau_\infty - \tau_0)\frac{e}{T}^{-\frac{t}{T}} \qquad (101)$$

Для дальнейшего доказательства основное уравнение нагрева нужно представить в виде:

$$\tau = \tau_\infty - (\tau_\infty - \tau_0)\, e^{-\frac{t}{T}}$$

или

$$\tau_\infty - \tau = (\tau_\infty - \tau_0)\, e^{-\frac{t}{T}}.$$

Деля почленно уравнение (101) на данное легко получить выражение:

$$\operatorname{tg}\alpha_k = \frac{\tau_\infty - \tau}{T}.$$

Отсюда:

$$T = (\tau_\infty - \tau)\operatorname{ctg}\alpha_k. \qquad (102)$$

Это выражение подтверждает, что постоянная времени для любой точки кривой нагрева определяется подкасательной, так как последняя представляет собою не что иное, как величину, численно равную

$$(\tau_\infty - \tau)\ \operatorname{ctg}\alpha_k.$$

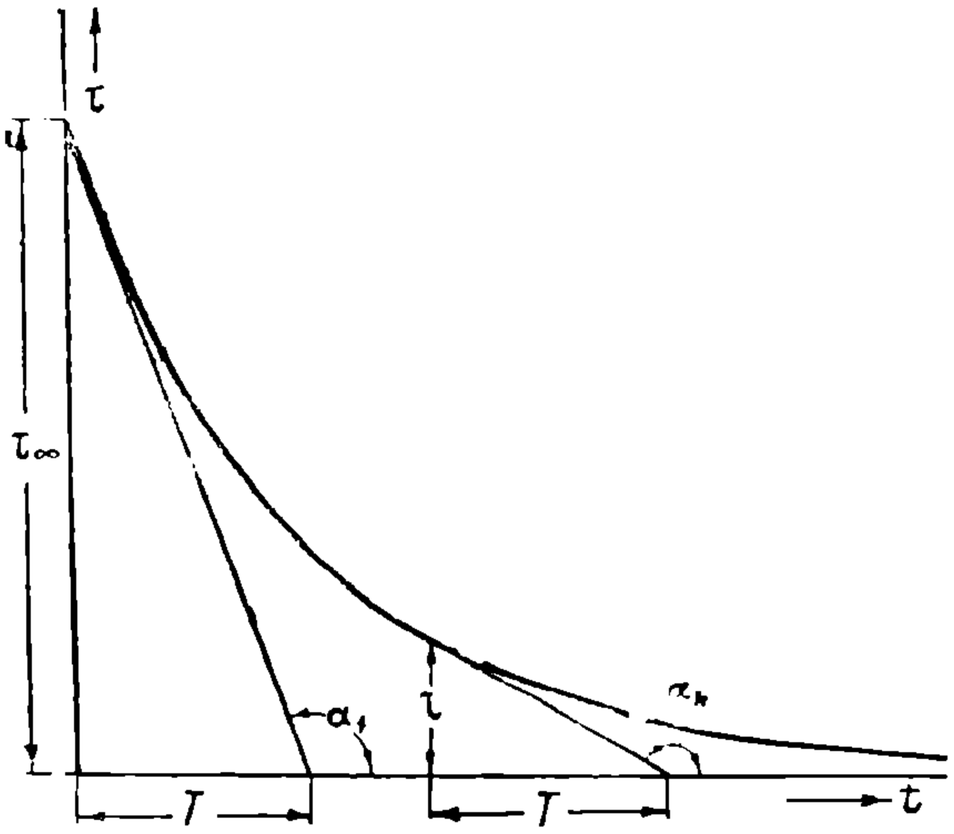


Рис. 131. Опреледение постоянной времени по кривой охлаждения.

Таким же самым образом можно доказать это положение и для кривой охлаждения. На основании уравнения охлаждения (98), откладывая α_k в том же направлении от оси абсцисс, что и для нагрева, можно написать соотношение:

$$\operatorname{tg}\alpha_k = \frac{d\tau}{dt} = -\frac{\tau_0}{T}e^{-\frac{t}{T}}$$

Деля почленно данное уравнение на основное (98), можно получить:

$$\operatorname{tg}\alpha_k = -\frac{\tau}{T}.$$

Отсюда ясно видно, что постоянная времени выражается как подкасательная:

$$T = -\tau\operatorname{ctg}\alpha_k. \qquad (103)$$

Анализ выражений (102) и (103) обнаруживает, что постоянную времени можно определить по любой текущей точке кривой нагревания и охлаждения. В частности, ее очень удобно определять для начального момента нагревания и охлаждения, характеризующегося равенствами $\tau = 0$ и $\tau = \tau_\infty$. Тогда абсолютная величина T по обоим уравнениям будет равна:

$$T = \tau_\infty \operatorname{ctg}\alpha_1. \qquad (104)$$

Вместо разобранного способа, при известных кривых нагрева и охлаждения T можно найти аналитически. Особенно просто оно определяется по кривой охлаждения (рис. 131) согласно выражению:

$$T = -\frac{t}{2{,}3\lg\frac{\tau}{\tau_0}}. \qquad (105)$$

При аналитическом определении T по кривой нагрева удобней всего исходить из двух режимов, из коих один принимается по продолжительности равным t, а второй $2t$ (рис. 132). Тогда получается два уравнения:

$$\left.\begin{aligned}\tau_1 &= \frac{P_n}{B}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)\\ \tau_2 &= \frac{P_n}{B}\left(1 - e^{-\frac{2t}{T}}\right)\end{aligned}\right\}. \qquad (106)$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

После почленного деления:

$$\frac{\tau_2}{\tau_1} = 1 + e^{-\frac{t}{T}}.$$

Отсюда:

$$T = -\frac{t}{2{,}3 \lg\left(\frac{\tau_2}{\tau_1} - 1\right)}. \qquad (107)$$

Последние два способа определения T особенно удобны в том случае, если из кривой нагревания нельзя установить τ_∞, что делает невозможным установление T по методу подкасательной.

Если кривая нагрева дана только в пределах от некоторого τ'_0 до τ'_2, то этого тоже достаточно для определения T (рис. 132). Для вывода значения T нужно разбить участок кривой от τ'_0 до τ'_2 пополам в отношении времени, написав уравнения нагрева в виде:

$$\tau_1' = \tau_\infty\left(1 - e^{-\frac{t'}{T}}\right) + \tau_0' e^{-\frac{t'}{T}}, \qquad (108)$$

$$\tau_2' = \tau_\infty\left(1 - e^{-\frac{t'}{T}}\right) + \tau'_1 e^{-\frac{t'}{T}}. \qquad (109)$$

Путем несложных преобразований из данных уравнений можно вывести формулу:

$$\tau_\infty = \frac{\tau'^2_1 - \tau'_0\tau'_2}{2\tau'_1 - \tau'_0 - \tau'_2}. \qquad (110)$$

Что касается T, то при установленной величине τ_∞ оно определяется из одного из уравнений (108) или (109) по общему правилу. Например, по уравнению (109) оно может быть установлено в виде:

$$T = -\frac{t'}{2{,}3 \lg \frac{\tau_\infty - \tau'_2}{\tau_\infty - \tau'_1}}. \qquad (111)$$

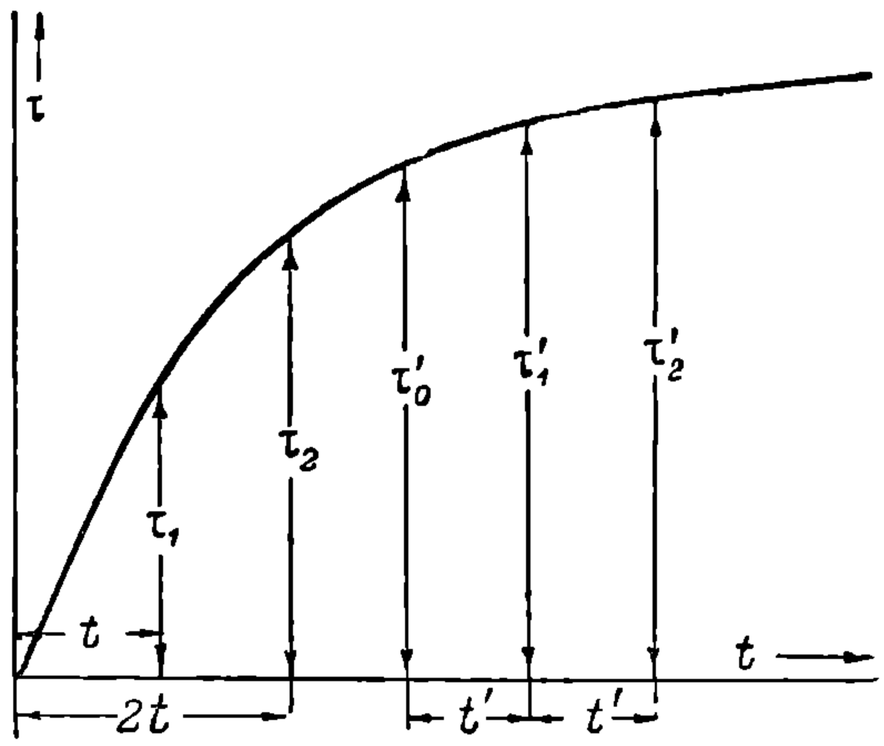


Рис. 132. Диаграмма для определения постоянной времени.

Очень удобно и быстро можно найти T из кривой нагрева на основании следующего простого соотношения. Уравнение нагрева (99) для времени $t = T$ принимает вид

$$\tau = \tau_\infty\left(1 - e^{-\frac{T}{T}}\right) = 0{,}634\tau_\infty. \qquad (112)$$

Отсюда при данном τ_∞ величина T равна такому промежутку времени, по истечении которого машина получает превышение температуры τ, равное 0,634 от установившейся (рис. 130).

Если исходить не из начала кривой нагрева, а из какого-либо промежуточного превышения температуры τ, то то же самое соотношение может быть определено по формуле;

$$\tau' = \tau_\infty\left(1 - e^{-\frac{T}{T}}\right) + \tau e^{-\frac{T}{T}}$$

или

$$\tau' - \tau = 0\,634\,(\tau_\infty - \tau). \qquad (113)$$

На рис. 130 промежуток времени от τ до τ, отвечающий условию (113), и будет искомой величиной T.

Базируясь на том же принципе, очень легко определить T из кривой охлаждения по формуле:

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{T}{T}} = 0{,}366\tau_0. \qquad (114)$$

Согласно этому выражению T определяется для любого начального превышения температуры как промежуток времени от этого τ_0 до некоторого текущего τ, определяемого условием (114).

Следует обратить внимание, что для периода нагревания порядка $t \cong 3T$ температура нагрева нормально получается близкой к установившейся. По общей формуле:

$$\tau = \tau_\infty\left(1 - e^{-\frac{3T}{T}}\right) = 0{,}95\tau_\infty. \qquad (115)$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Равенство (115) подтверждает высказанное положение, что температура устанавливается тем скорее, чем меньше постоянная времени.

Если желательно по кривой нагрева определить коэфициент теплоотдачи B, то нужно пользоваться уравнением (94). При известной величине A и соответствующей T теплоотдача определяется весьма просто. Если кривая нагрева до τ_∞ не доходит, то B определяют по основному уравнению нагрева (89), предварительно определив T согласно формуле (107) или (111).

Особо следует отметить метод определения теплоемкости машины. Если предварительно определены B и T, то она определяется согласно формуле (97). Однако, можно ее определить и непосредственно. Для этого нужно воспользоваться периодом начального кратковременного нагрева машины, так как в таком случае потери, вырабатываемые машиной, будут итти почти исключительно на повышение ее температуры, т. е. поглощаться ее теплоемкостью. Для обоснования этого метода удобнее всего обратиться к методу разложения показательных членов уравнения нагревания и охлаждения:

$$\left.\begin{aligned} e^{-\frac{t}{T}} &= 1 - \frac{t}{T} + \frac{1}{2}\left(\frac{t}{T}\right)^2 - \frac{1}{6}\left(\frac{t}{T}\right)^3 + \dots \\ 1 - e^{\frac{t}{T}} &= \frac{t}{T} - \frac{1}{2}\left(\frac{t}{T}\right)^2 + \frac{1}{6}\left(\frac{t}{T}\right)^3 - \dots \end{aligned}\right\} \quad (116)$$

При условии небольших дробных значений $\frac{t}{T}$ членами высшего порядка можно пренебречь, и тогда уравнение нагревания (89) при $\tau_0 = 0$ примет форму:

$$\tau = \frac{P_n t}{BT} = \frac{P_n t}{A}$$

Отсюда теплоемкость:

$$A = \frac{P_n t}{\tau}. \quad (117)$$

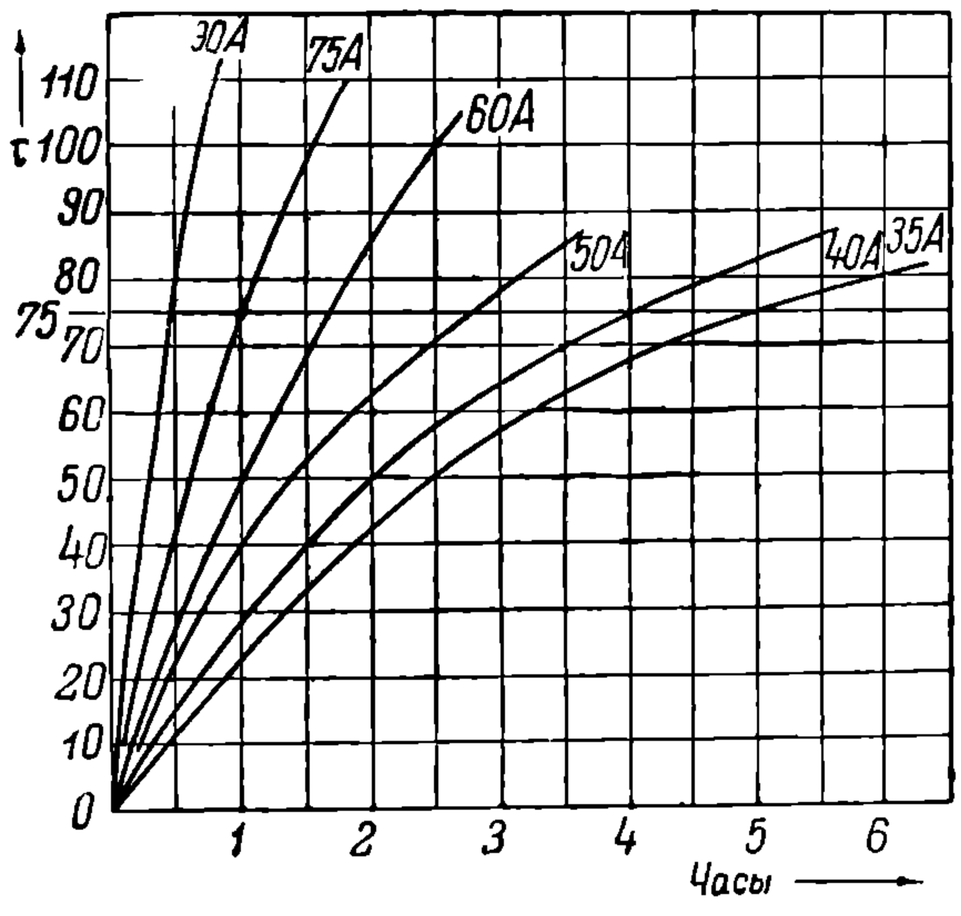


Рис. 133. Кривые нагревания тягового двигателя мощностью и 50 PS при различных нагрузочных токах.

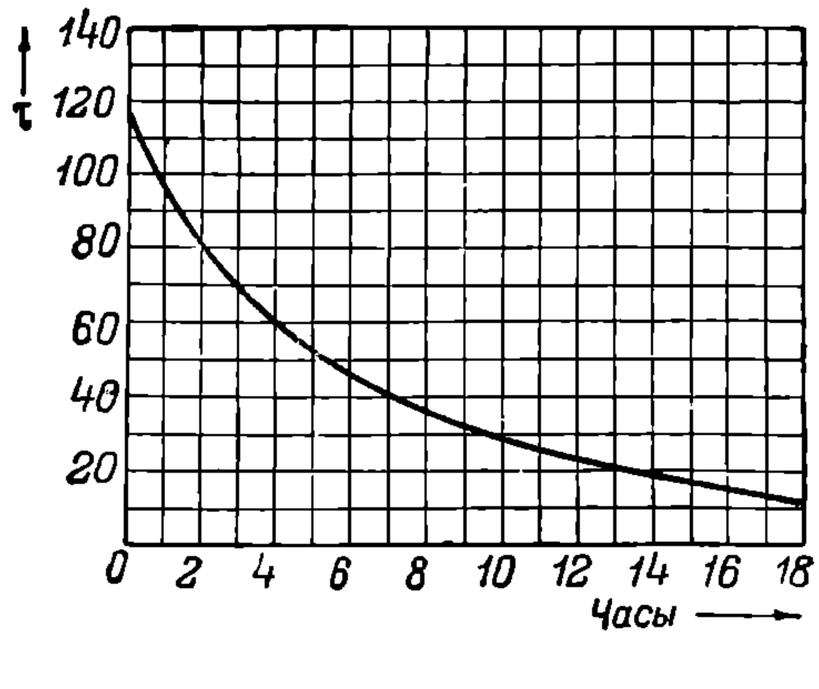


Рис 134 Кривая охлаждения обмотки возбуждения тягового двигателя мощностью 50 PS.

Следует отметить, что все приведенные соображения относятся к теории нагрева однородного тела, подвергающегося нагреванию без воздействия на него других тел. Только при таких условиях тепловые коэфициенты подчиняются указанным зависимостям.

2. Тепловые характеристики тяговых двигателей.

Тепловые характеристики имеют назначением выявлять тепловые свойства машины. Наиболее часто такие характеристики представляют собою кривые нагрева, т. е. дают зависимость превышений температур в функции от времени:

$$\tau = f(t).$$

В большинстве случаев кривые нагрева даются для часового и для длительного режимов. Однако, нередко они приводятся и для большего количества режимов.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

На рис. 133 даны тепловые характеристики для закрытого двигателя завода TH с часовою мощностью в 50 PS. Кривые сняты для шести различных режимов. Рис. 134 дает кривую охлаждения для того же двигателя. Все приведенные кривые относятся к нагреванию меди главных возбудительных полюсов.

Очень полно выясняют тепловые свойства двигателей кривые, построенные по типу приведенных на рис. 135. Данные кривые взяты из работы Luke (Л. 72) и относятся к двигателю с независимой вентиляцией длительной мощностью около 50 kW. За последнее время кривые подобного рода начинают все чаще встречаться как в американской, так и европейской практике. К сожалению, в большинстве случаев не указывается, строятся ли эти кривые на основании опытных данных или рассчитываются каким-либо аналитическим методом. Такие кривые очень удобны потому, что с их помощью можно определить нагревание и охлаждение двигателей при различных нагрузках.

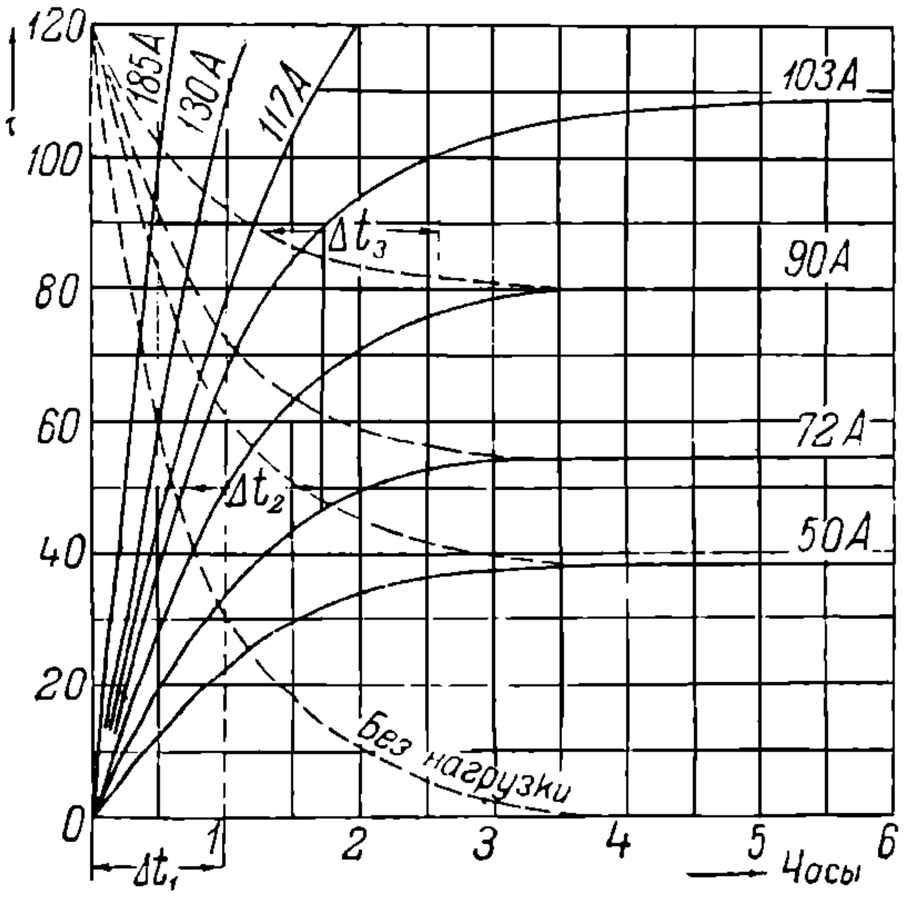


Рис. 135. Тепловые характеристики тягового электродвигателя мощностью 56 kW.

Значительную помощь при различного рода тепловых расчетах могут принести кривые зависимости токов от времени, в течение которого эти токи могут выдерживаться двигателями при предельно допустимом для них перегреве. В качестве примера может служить кривая рис. 136, относящаяся к двигателю BBC типа GDTM 82.

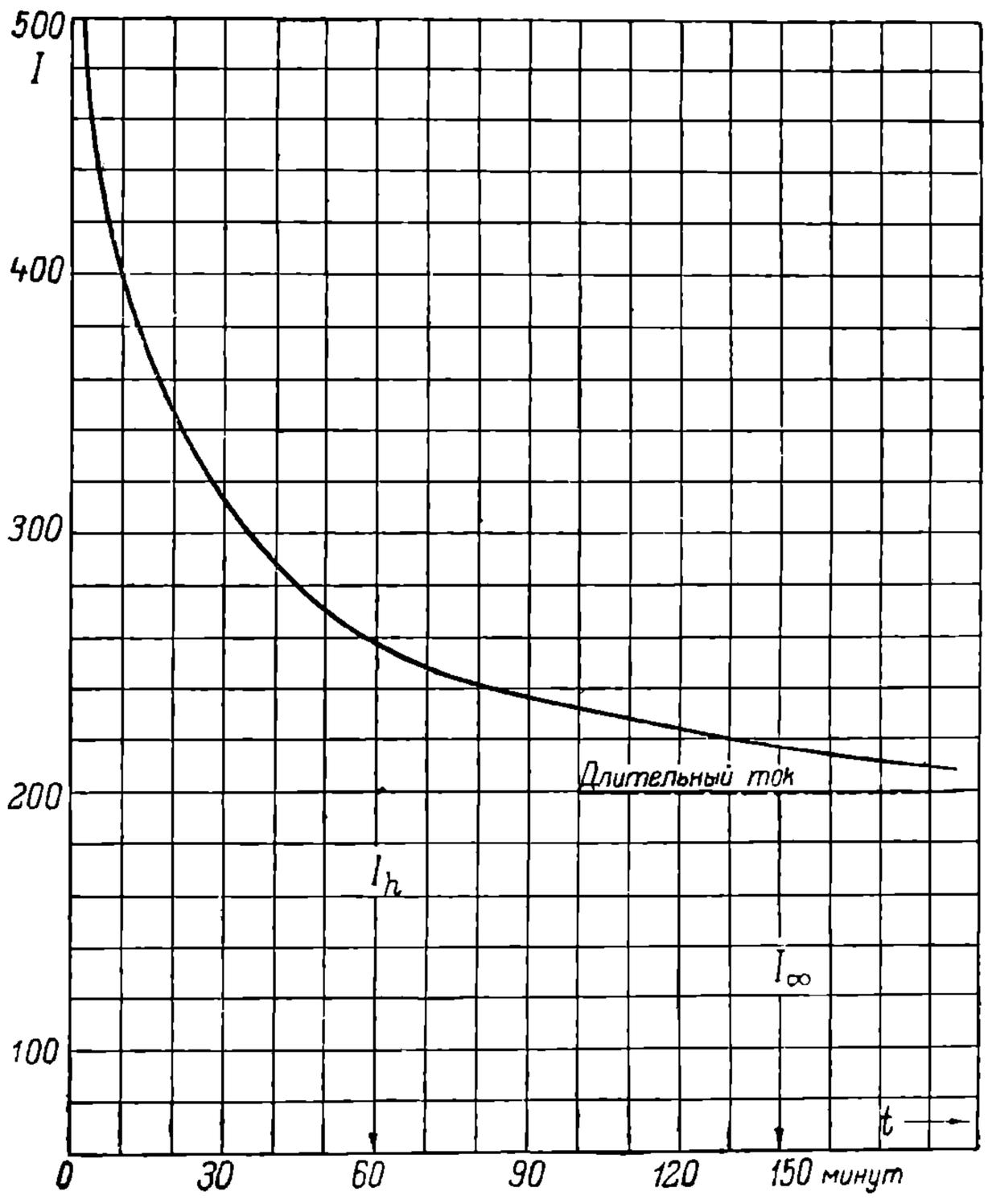


Рис. 136. Время установления предельно допустимого нагрева при различных нагрузочных токах для двигателя BBC типа GDTM-82.

3. Теория двухступенчатого нагрева тяговых двигателей.

Если обратиться к реальным электрическим машинам, то в отношении нагрева они представляют собою не однородное тело, а весьма сложную систему. Особенно сложен процесс нагрева машин при закрытых конструкциях как без вентиляции, так и с таковой, к числу которых относятся все главнейшие типы тяговых электродвигателей.

Осложнения, имеющие место при определении нагрева тяговых электродвигателей, заключаются прежде всего в том, что тяговый двигатель состоит из большого количества отдельных частей, которые в отношении нагрева и охлаждения находятся в различных условиях. Далее осложнения вызываются тем, что в тепловом отношении эти отдельные части двигателей не представляют собой однородных тел. Трудности усугубляются еще и наличием между ними теплового взаимодействия. Более нагретые части

НБ УПУНТ (ДІІТ)

отдают свою теплоту не только в окружающую атмосферу, но и менее нагретым частям.

При теоретически точном решении вопроса о нагреве сложного тела, состоящего из отдельных частей, приходится составлять на основе общих законов теплоты ряд уравнений, связывающих эти части в отношении теплового взаимодействия. Проф. В. А. Шевалин в своей книге (Л. 197), разбив машину на четыре отличные в тепловом отношении части, пришел к четырем совокупным диференциальным уравнениям, дающим решение в виде четырех отдельных показательных функций. Вообще, если разбить двигатель на n отдельных частей, то нагрев должен выразиться уравнением с n показательными функциями:

$$\tau = c_0 + c_1 e^{-\frac{t}{T_1}} + c_2 e^{-\frac{t}{T_2}} + \ldots + c_k e^{-\frac{t}{T_k}} + \ldots + c_{n-1} e^{\frac{t}{T_{n-1}}} + c_n e^{-\frac{t}{T_n}}. \qquad (118)$$

Отсюда видно, что в реальных условиях нагрев двигателя подчиняется сложной показательной зависимости. Ввиду этого действительные кривые нагрева тяговых электродвигателей должны отличаться от таковых в случае рассмотрения их как однородного тела. Для более точного определения нагрева желательно было бы разбивать массу двигателя на достаточно значительное число различных в тепловом отношении частей. Однако, при решении такой задачи встречаются очень большие трудности как с решением самих уравнений, так особенно и с определением их отдельных параметров. Ввиду этого для практических целей приходится ограничиться двухступенчатой системой определения нагрева, в основу изложения которой здесь положена теория Luke (Л. 72).

Luke исходит из того, что наиболее нагретыми частями в тяговых двигателях являются обмотки. Отделенная изоляцией медь обмоток получает более высокую температуру, чем железные и вообще все внутренние массы двигателя. Чем толще слой изоляции и ниже ее теплопроводность, тем больше разность этих температур. В целях упрощения вопроса Luke предполагает, что все железные массы, имеющиеся внутри двигателя, а также и внешние поверхности обмоток имеют одну и ту же температуру, причем температуру внешней поверхности кожуха он принимает для отдельных типов двигателей в некоторой постоянной зависимости от температуры внутренних частей.

Нужно иметь в виду, что температура внутренних масс двигателей по данным Luke создается всеми происходящими в них потерями за исключением потерь в передаточном механизме. Что же касается обмоток, то превышение их температур над температурами внутренних масс определяется только теми потерями, которые имеют место в каждой данной обмотке.

При изложении метода Luke будут приняты нижеприводимые обозначения:

P_n — сумма всех потерь двигателя в ваттах за исключением потерь в зубчатых передачах, V_0 — объем воздуха в m^3, прогоняемый в случае искусственной вентиляции через машину в одну секунду S_e — внешняя поверхность кожуха в m^2, Q_e — тепловой поток в ваттах, излучаемый 1 m^2 внешней поверхности, при превышении ее температуры над окружающей средой в 1° C (для стационарного состояния машины по данным Luke $Q_e = 20W$, при движении же машины эта величина увеличивается), S_i — внутренняя поверхность машины в m^2, подвергающаяся действию вентиляционного воздуха (сюда включается внешняя поверхность якоря, коллектора, поверхности полюсных башмаков, боковые аксиальные поверхности магнитных катушек, якорные каналы и, наконец, междуполюсные поверхности кожуха, омываемые воздухом), Q_i — тепловой поток в ваттах, переносимый с 1 m^2 вентилируемой поверхности, при условии превышения температуры данной поверхности над температурой воздушного потока в 1° C (значение Q_i в зависимости от скорости вентилируемого воздуха дает кривая рис. 137; скорость воздуха может быть определена путем деления его объема, прогоняемого через двигатель, на площадь того сечения, через которую проходит воздух; площадь сечения нужно брать через междужелезное пространство и электромагниты), τ_a — превышение температуры вентиляционного воздуха над окружающей средой при выходе его из двигателя, β_1 — отношение превышения температуры внешней поверхности кожуха двигателя к превышению температуры внутренних железных масс (для закрытых двигателей β_1 может быть взят равным 0,6, для двигателей с самовентиляцией 0,4 и для независимой вентиляции 0,2—0,3), G_a — вес в kg активного в тепловом отношении материала машины

НБ УГУНТ (ДІІТ)

(якоря, коллектора, обмоток главных и добавочных полюсов, полюсных наконечников, вкладышей или втулок подшипников), G_b — вес в kg неактивных масс машины, получаемых путем вычета из полного веса машины веса активных масс, причем весовые значения зубчатых передач и их частей не учитываются, C — коэфициент теплоемкости внутренних масс двигателя (значение его Luke принимает равным 475 джоулей), C_1 — теплота в джоулях, потребная для повышения температуры 1 m³ воздуха на 1° C (значение этого коэфициента берется равным 1200 джоулей).

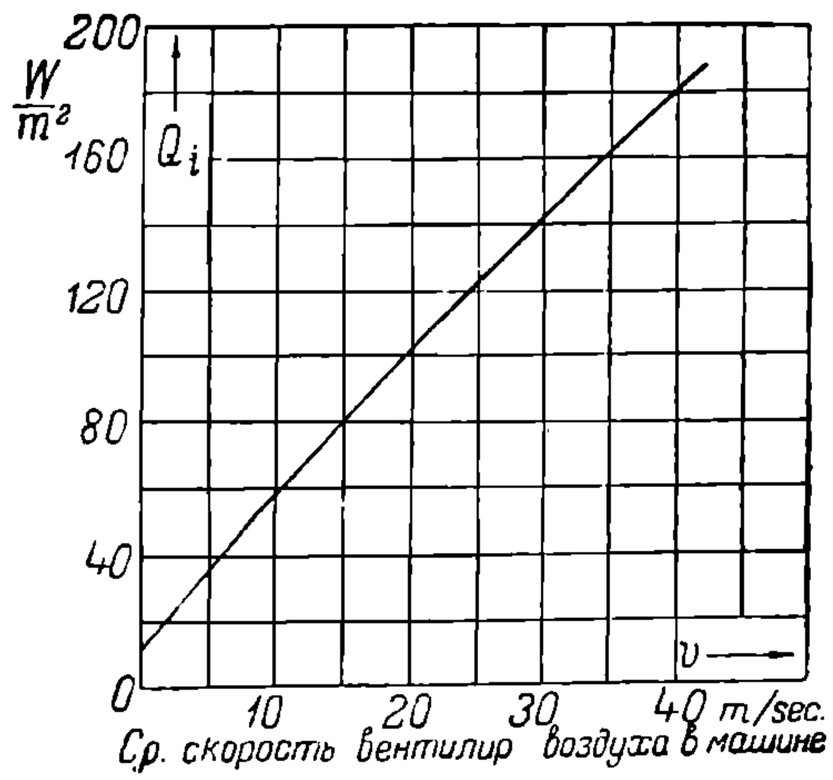


Рис. 137. Коэфициент поглощения тепла вентиляционным воздухом с 1 m² омываемой поверхности.

Обоснование своего метода Luke начинает с определения теплоемкости $A_{ж}$, коэфициента теплоотдачи $B_{ж}$ и постоянной времени $T_{ж}$, относимых ко всем внутренним массам двигателя. Согласно его положениям величина $A_{ж}$ должна представлять собою некоторую эквивалентную теплоемкость всей машины, причем принцип эквивалентности должен быть построен на предположении, что все железные части машины, а тивные и неактивные, внешние и внутренние, имеют одинаковое превышение температуры $\tau_{ж}$. Luke предлагает величину $A_{ж}$ выражать равенством (119), где коэфициент β_1 вводится для приведения всех железных масс к одному превышению температуры $\tau_{ж}$:

$$A_{ж} = C(G_a + \beta_1 G_b). \qquad (119)$$

Величина полной теплоотдачи двигателя $B_{ж}\tau_{ж}$ составляется из двух частей. В первую включаются потери, тепловой эффект которых излучается внешней поверхностью кожуха:

$$B'_{ж}\tau_{ж} = Q_e S_e \beta_1 \tau_{ж}.$$

Во вторую часть включаются тепловые потери, теплота которых уносится вентиляционным воздухом:

$$B''_{ж}\tau_{ж} = C_1 V_0 \tau_a.$$

При таких условиях значение $B_{ж}$ определяется выражением:

$$B_{ж} = \frac{1}{\tau_{ж}}(Q_e S_e \beta_1 \tau_{ж} + C_1 V_0 \tau_a).$$

Для исключения отсюда τ_a, трудно определимого заранее, второй член выражения в скобках может быть представлен в виде:

$$C_1 V_0 \tau_a = Q_i S_i \left(\tau_{ж} - \frac{\tau_a}{2}\right).$$

Так как при входе воздуха в двигатель $\tau_a = 0$, а при выходе $\tau_a = \tau_{a'}$, то этим объясняется, почему в скобках стоит $\frac{\tau_a}{2}$; член в скобках здесь характеризует среднее значение превышения температуры охлаждаемых масс над превышением температуры вентиляционного воздуха за время его нахождения в машине. На основании последнего равенства величина τ_a может быть определена выражением:

$$\tau_a = \frac{Q_i S_i \tau_{ж}}{C_1 V_0 + 0{,}5 Q_i S_i}. \qquad (120)$$

Путем подстановки получаем:

$$B_{ж} = Q_e S_e \beta_1 + \frac{C_1 V_0 Q_i S_i}{C_1 V_0 + 0{,}5 Q_i S_i}. \qquad (121)$$

При известной величине $B_{ж}$ значение $T_{ж}$ определяется соотношением:

$$T_{ж} = \frac{A_{ж}}{B_{ж}}, \qquad (122)$$

НБ УДУНТ (ДІТ)

Обращается внимание, что для двигателей с самовентиляцией $B_{ж}$ меняется со скоростью вращения машины, так как она влияет на V_0 и Q_i. В таких случаях $B_{ж}$ в части его составляющей $B''_{ж}$, приблизительно растет в прямолинейной зависимости с числом оборотов двигателя. При переменной $B_{ж}$ и постоянной величине $A_{ж}$ должна меняться со скоростью и величина $T_{ж}$, согласно равенству (122). Если известны потери машины, то, подставляя значения $T_{ж}$ и $B_{ж}$ в основное уравнение нагревания машины (89), можно определить температуру ее внутренних масс, согласно выражению:

$$\tau_{ж} = \frac{P_n}{B_{ж}}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_{ж}}}\right) + \tau_{ж_0} e^{-\frac{t}{T_{ж}}}. \qquad (123)$$

Как было указано, нагревание меди обмоток Luke устанавливает путем определения повышения ее температуры по отношению к только что определенному превышению температуры внутренних масс над температурой окружающей среды. Дальнейшие формулы будут выводиться при следующих обозначениях:

$P_{м}$ — потери в ваттах для исследуемой обмотки,

h — толщина изоляции в mm,

b — тепловая проводимость изоляции в ваттах на 1 cm² ее поверхности при толщине 1 mm и при превышении температуры в 1°C (в среднем b колеблется от 0,0099 до 0,012 W/cm² · mm),

S_0 — внешняя поверхность в cm² всех якорных катушек или всех полюсных катушек в зависимости от того, для какой обмотки определяется температура (по данным Luke $S_{як}$ = периферии впадины × число впадин × длину железа якоря, причем в периферию впадины клин не включается, $S_{кат}$ = периферии катушки × длину среднего витка × число катушек),

$G_э$ — эквивалентный вес меди [по эмпирической формуле Luke $G_э = 8{,}9 \times$ (объем меди $+ {}^1/_4$ объема изоляции), где объемы берутся в dm³].

Для определения превышения температуры меди над железом Luke пользуется основной формулой нагревания, вводя вместо коэфициентов B и T новые коэфициенты $B_{м}$ и $T_{м}$, определяемые по следующим формулам:

$$B_{м} = \frac{S_0 b}{h}, \qquad (124)$$

$$T_{м} = 400\,\frac{G_э}{B_{м}}. \qquad (125)$$

Наконец, результирующая превышения температуры меди над окружающей средой согласно теории Luke определяется выражением:

$$\tau = \frac{P_n}{B_{ж}}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_{ж}}}\right) + \tau_{ж_0} e^{-\frac{t}{T_{ж}}} + \frac{P_{м}}{B_{м}}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_{м}}}\right) + \tau_{м_0} e^{-\frac{t}{T_{м}}}. \qquad (126)$$

Данная формула предполагает общий случай, когда к началу рассматриваемого периода железные массы имели уже превышение температуры над окружающей средой $\tau_{ж_0}$, а медь по отношению к ним имела превышение $\tau_{м_0}$.

Пример. Двигатель с независимой вентиляцией, длительной мощностью в 70 PS, при напряжении в 600 V. Режим нагрева определяется для обмотки якоря при следующих данных:

$P_n = 6600$ W; $S_e = 3{,}03$ m²; $V_0 = 0{,}374$ m³/sec; $S_i = 3{,}52$ m²; $Q_i = 59$ W; $G_a = 810$ kg; $G_b = 844$ kg; $\beta_1 = 0{,}3$; $P_{м} = 1500$ W; $S_0 = 14600$ cm²; $b = 0{,}0099$ W/cm² · mm; $h = 2{,}54$ mm; $G_э = 120$ kg.

По формулам (121), (122), (124) и (125) определяются нижеследующие величины:

$$B_{ж} = 20 \times 3{,}03 \times 0{,}3 + \frac{1200 \times 0{,}374 \times 59 \times 3{,}52}{1200 \times 0{,}374 + 0{,}5 \times 59 \times 3{,}52} = 186{,}3\,\text{W};$$

$$T_{ж} = \frac{475\,(810 + 0.3 \times 844)}{186{,}3} = 2740\ \text{sec};$$

$$B_{м} = \frac{14600 \times 0{,}0099}{2{,}54} = 57\ \text{W};$$

$$T_{м} = 400 \times \frac{120}{57} = 843\ \text{sec}.$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

После определения по указанному способу тепловых коэфициентов общая формула нагрева, согласно теории Luke, примет вид:

$$\tau = \frac{6600}{186{,}3}\left(1 - e^{-\frac{t}{2740}}\right) + \tau_{ж_0} e^{-\frac{t}{2740}} + \frac{1500}{57}\left(1 - e^{-\frac{t}{843}}\right) + \tau_{м_0} e^{-\frac{t}{843}}.$$

Для частного случая длительного режима при $t = \infty$ превышение температуры железа получится равным:

$$\tau_{ж_\infty} = \frac{6600}{186.3} = 35{,}5^\circ\ \text{C}.$$

Конечное же превышение температуры меди якоря будет равно:

$$\tau_\infty = 35{,}5 + \frac{1500}{57} = 35{,}5 + 26{,}3 = 61{,}8^\circ\text{C}.$$

Для выяснения точности результатов, даваемых рассмотренным методом, Luke приводит кривые (рис. 138). Сплошными линиями и точками нанесены опытные кривые, кружками и линиями с кружками обозначены результаты, вычисленные по его формулам. Кривая I дает картину нагрева меди обмотки возбуждения, кривая II, вычисленная по данным Luke, характеризует нагрев меди якоря и кривая III — нагрев железа якоря. Период охлаждения здесь принят без вентиляции. Весьма характерен процесс остывания якорного железа. Как видно из кривой III, температура его при охлаждении сначала не понижается, а повышается. Объясняется это тем, что после прекращения вентилирования тепло, выделяемое медью обмоток, задерживается в кожухе, что и вызывает отмеченное повышение температуры железных масс.

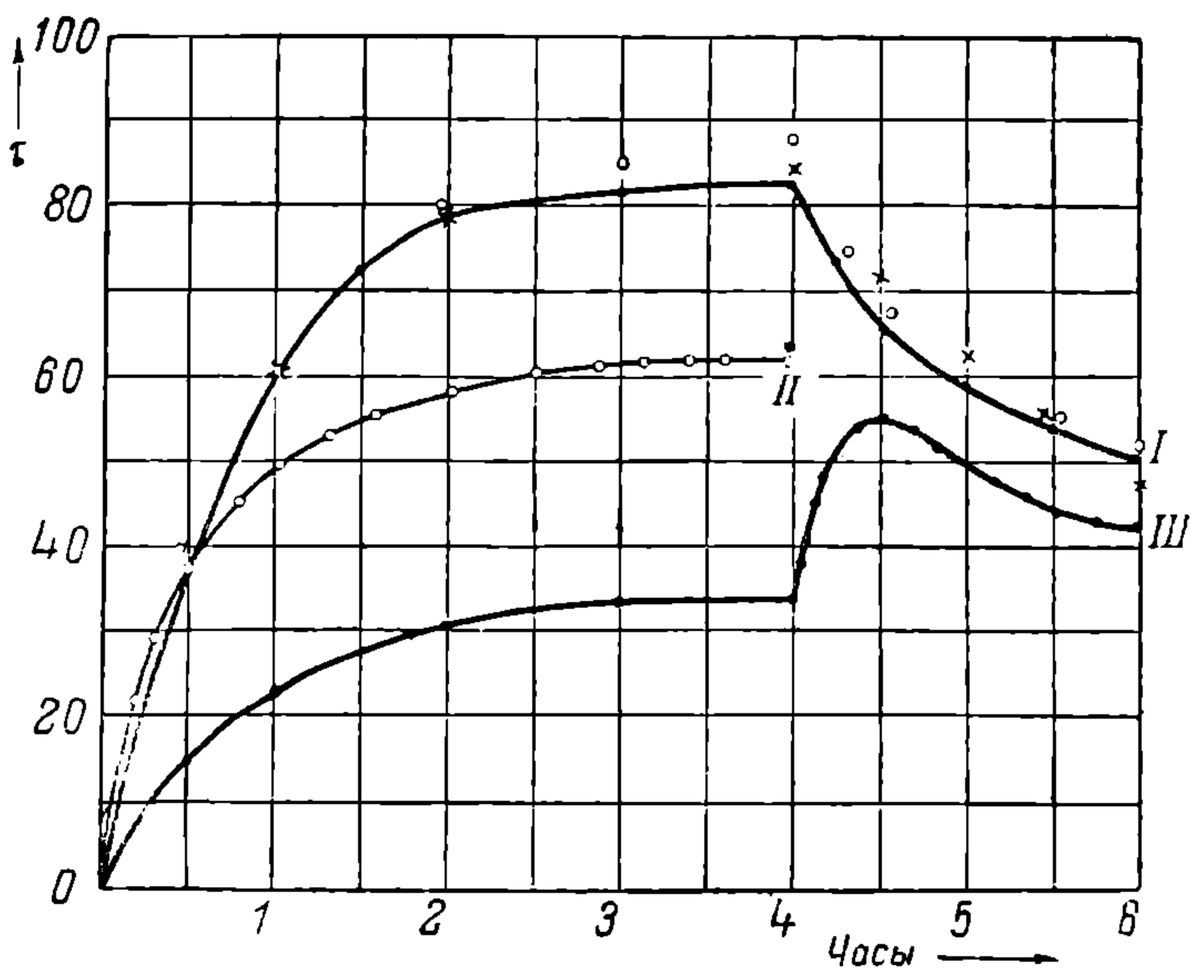


Рис. 138. Кривые нагрева и охлаждения двигателя в 56 KW, полученные из опыта и по вычислению.

Чтобы можно было сделать более или менее определенные заключения о степени надежности метода Luke, ниже приводятся сравнительные данные для некоторых существующих типов двигателей. В табл. 20 приведены данные для трех двигателей: электровозного типа ДПЭ-340 с независимой вентиляцией, трамвайного двигателя ПТ-35а с самовентиляцией и трамвайного двигателя АВ-52 закрытого типа. Данные о нагреве первого двигателя взяты из кривых заводского исследования, а для последних — из опытного их исследования в лаборатории электрической тяги ЛИИ.

ТАБЛИЦА 20.

Данные нагрева по вычислению из опытов °С.

Двигатели	Режим	Превыш. темп. главн. катуш. возбужд.		Превыш. темп. якорн. обм.	
		Вычислен.	Опытные	Вычислен.	Опытные
ДПЭ—340	I_h		—	122	120
	I_∞	—	—	104,4	116,5
АВ—52	I_h	70,8	71,5	73,3	88
	I_∞	82	63	83,2	82
ПТ—35а	I_h	76,9	77	93,5	92
	I_∞	72,2	74,4	88	86

Произведенное исследование показывает, что для вентилируемых двигателей метод Luke дает достаточно приемлемые результаты. Для двигателей же закрытых результаты менее удовлетворительны. Объясняется это тем, что в закрытых машинах температуры отдельных частей машины внутри кожуха сильно раз-

НБ УГУНТ (ДІІТ)

нятся друг от друга. Ввиду этого нагревы железных масс якоря и индукторов могут сильно отличаться друг от друга, тогда как Luke принимает их одинаковыми. Из числа вопросов, также возбуждающих некоторые сомнения в рассмотренной теории, следует обратить внимание на учет механических потерь. В своих основных положениях Luke предлагает вводить их полностью. Однако, в частных примерах, например, при расчете нагрева якоря самовентилирующего двигателя, он берет только их половину. Опыты, произведенные лабораторией электрической тяги ЛИИ с трамвайным двигателем W-241, имевшим большие механические потери, показали, что теория Luke в данном случае дает перегревы, далеко превышающие опытные. Есть основание полагать, что в отношении учета механических потерь метод Luke должен быть уточнен. Точно так же необходимо обратить внимание на значение Q_e, которое для многих типов двигателей получается выше, чем по Luke.

В общем по отношению к рассмотренному методу можно сделать заключение, что он несомненно является большим шагом вперед, раскрывающим много характерного в тепловых соотношениях тяговых электродвигателей. Однако, для окончательного его оформления требуются добавочные исследования и уточнения, особенно, как это уже отмечалось, применительно к двигателям, работающим без вентиляции.

4. Нагрев тягового двигателя, как эквивалентного однородного тела.

При практическом решении вопроса о нагреве двигателей многоступенчатые методы определения нагрева представляют часто большие затруднения. С другой стороны, если рассматривать двигатель, как одно однородное тело подвергающееся нагреву под действием всех потерь, выделяющихся в нем, то это может повлечь за собою существенные неточности. Очевидно, для применения одноступенчатой теории нагрева необходимо внести в нее корректирующие дополнения. Для этого приходится обратиться к теории эквивалентности. Тяговый двигатель нужно себе мыслить, как некоторое эквивалентное ему в тепловом отношении однородное тело. Самый же принцип эквивалентности требуется построить на требовании, чтобы температуры наиболее нагретых частей двигателя определялись по одноступенчатой системе нагрева путем однозначных функций (89).

Основные формулы нагрева тягового электродвигателя весьма рационально строить, исходя из потерь Джоуля или из пропорциональных им квадратов нагрузочных токов. Помимо большого удобства оперирования с токами, фигурирующими как необходимый элемент во всяком тяговом расчете, потери Джоуля оказывают особенно большое влияние на нагрев двигателей. При указанной трактовке вопроса нагревание тягового двигателя, как эквивалентного однородного тела, можно представить формулой:

$$\tau = \frac{I^2}{B_э}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_э}}\right) + \tau_0 e^{-\frac{t}{T_э}}. \qquad (127)$$

Рассмотрение данной формулы, отличающейся от нормальной (89) только размерностью своих коэфициентов, показывает, что она может дать хорошие результаты в том лишь случае, если будет найдена достаточно удовлетворительная методика определения $B_э$ и $T_э$. Естественно, как это уже отмечалось автором в его работах (Л. 215 и Л. 196), — эти коэфициенты не могут оставаться постоянными при различных режимах работы машины. В общем случае на величины коэфициентов $B_э$ и $T_э$ должны оказывать влияние потери холостого хода машины. Теория нагрева показывает, что пренебрегать влиянием потерь холостого хода, особенно потерь магнитных, совершенно недопустимо. Ввиду этого, если исходить из пропорциональности нагрева только квадрату тока, другими словами, — из потерь Джоуля, то влияние потерь холостого хода на нагрев машины должно быть учтено коэфициентами $B_э$ и $T_э$.

Помимо этого, на эти коэфициенты оказывает влияние и вентиляция машин. Если для двигателей закрытых и с независимой вентиляцией можно практически с этим не считаться, то для двигателей с самовентиляцией это влияние имеет очень существенное значение. В этих двигателях с изменением скорости вращения тепловая отдача резко изменяется. С возрастанием скорости она растет, с понижением падает.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

При изучении вопроса об изменении $B_э$ и $T_э$ необходимо учитывать, что значения их могут изменяться не только в процессе перехода от одной нагрузки к другой, но и в пределах одной и той же нагрузки в зависимости от ее длительности. В этом можно удостовериться как путем анализа этих коэфициентов на основании теории двухступенчатого нагрева, так и непосредственно на основании опытных кривых нагрева.

При изучении изменения $B_э$ и $T_э$ необходимо прежде всего выяснить влияние на них длительности нагрева. Это удобней всего сделать, если исходить из теории двухступенчатого нагрева. При пользовании этой теорией метод эквивалентности можно обосновать, исходя из формулы (126). Для $\tau_0 = 0$ ее можно представить в таком виде:

$$\tau = \frac{I^2}{B'_м}\left[\frac{P_п B'_м}{I^2 B_ж}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_ж}}\right) + \left(1 - e^{-\frac{t}{T_м}}\right)\right] \tag{128}$$

При данной трактовке вопроса коэфициент $B_м = \frac{B_м}{r}$ включает в себя сопротивление обмоток. Принцип эквивалентности строится на выражении:

$$\frac{I^2}{B_э}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_э}}\right) = \frac{I^2}{B'_м}\left[\frac{P_п B'_м}{I^2 B_ж}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_ж}}\right) + \left(1 - e^{-\frac{t}{T_м}}\right)\right]. \tag{129}$$

Введем для упрощения обозначения:

$$\frac{P_п B'_м}{I^2 B_ж} = P_0; \quad e^{-\frac{t}{T_ж}} = x \text{ и } e^{-\frac{t}{T_м}} = y. \tag{130}$$

На основании их можно то же самое выражение переписать в виде:

$$\frac{1}{B_э}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_э}}\right) = \frac{1}{B'_м}[P_0(1-x) + (1-y)]. \tag{131}$$

Если последнее выражение отнесено ко времени не t, а $2t$, то оно принимает форму:

$$\frac{1}{B_э}\left(1 - e^{-\frac{2t}{T_э}}\right) = \frac{1}{B'_м}[P_0(1-x^2) + (1-y^2)].$$

При почленном делении данного выражения на предыдущее получается:

$$1 + e^{-\frac{t}{T_э}} = \frac{P_0(1-x^2) + (1-y^2)}{P_0(1-x) + (1-y)}.$$

Это дает:

$$e^{-\frac{t}{T_э}} = \frac{P_0 x(1-x) + y(1-y)}{P_0(1-x) + (1-y)} \tag{132}$$

или

$$T_э = -\frac{t}{2{,}31\lg\frac{P_0 x(1-x) + y(1-y)}{P_0(1-x) + (1-y)}}. \tag{133}$$

Путем таких же несложных преобразований для коэфициента $B_э$, на основании формул (131) и (132), можно написать:

$$B_э = B'_м \frac{P_0(1-x)^2 + (1-y)^2}{[P_0(1-x) + (1-y)]^2}. \tag{134}$$

Выражения (133) и (134) дают возможность проанализировать, как будут меняться тепловые коэфициенты $B_э$ и $T_э$, если период прохождения двигателя под нагрузкой t будет изменяться, в частности — если он будет расти. При рассмотрении выражений (133) и (134) прежде всего необходимо констатировать, что в случае равенства $x = y$, или, что то же: $T_ж = T_м$, коэфициенты $B_э$ и $T_э$ остаются величинами неизменными для всех периодов времени. В случае $T_ж \neq T_м$, как следует из формулы (134), коэфициент $B_э$ должен понижаться, достигая minimum'a при $t = \infty$. Что же касается $T_э$, то согласно выражению (133) при увеличении t этот коэфициент растет. Интенсивность изменения $B_э$ и $T_э$ зависит от постоянных машины.

НБ УГУНТ (ДІТ)

В табл. 21 приведены данные для якорной обмотки $B_э$ и $T_э$ двигателя постоянного тока на 1500 V типа GEC-1730 с интенсивной независимой вентиляцией.

ТАБЛИЦА 21.

Величины тепловых постоянных в зависимости от времени нагрева и охлаждения.

t в min	По нагреву		По кривой охлаждения
	$B_э$	$T_э$	$T_э$
1	555	13,2	16,4
5	535	14	16,7
10	524	14,5	17,9
30	485	15,7	19
60	471	21,2	23,2
120	—	36,6	—
∞	465	—	—

ТАБЛИЦА 22.

Зависимость постоянной времени от длительности нагрева.

t min	$T_э$	Примечание
1	9,1	Коэфициент $B_э$ меняется мало, держась около 26—27.
5	9,8	
10	15,4	
60	54,5	
150	163	
300	218	

Еще более резкое изменение коэфициента $T_э$ получается для закрытых двигателей, у которых разница между $T_ж$ и $T_м$ особенно значительна. Табл. 22 дает представление о коэфициенте $T_э$ для закрытого трамвайного двигателя типа АВ-52.

Табл. 20 и 21 рассчитаны по формулам двухступенчатого нагрева. Опытные кривые подтверждают тот же характер изменения $T_э$. Особенно это ясно видно из кривых охлаждения, дающих нормально в первые моменты сильное снижение температуры с последующим уменьшением темпа понижения. В результате $T_э$ сильно меняется. Что же касается теплоотдачи $B_э$, она с изменением времени нагрева изменяется в значительно меньших пределах.

Следующим вопросом является выяснение влияния на $B_э$ и $T_э$ изменения режимов двигателя в отношении нагрузок. Для решения этого вопроса можно воспользоваться уже выведенными формулами. При условии постоянства времени t все значения x, y и t в этих формулах будут оставаться неизменными. Величины $B_э$ и $T_э$ с изменением нагрузок будут зависеть только от величины P_0. При уменьшении нагрузки и увеличении скорости вращения значения P_0 растут, так как, с одной стороны, понижается ток, а с другой — растут потери холостого хода.

Из формулы (134) ясно видно, что с увеличением P_0 коэфициент $B_э$ падает. Чем меньше нагрузочный ток и, следовательно, чем выше скорость, тем меньше эквивалентный коэфициент теплоотдачи. Для примера приведена табл. 23, в которой даны коэфициенты $B_э$ для двигателя типа GEC-1730 и двигателя АВ-52. Коэфициенты вычислены по формулам двухступенчатого нагрева и взяты для длительного режима. Для первого двигателя приведены также их значения, полученные из кривых нагрева, данных GEC.

ТАБЛИЦА 23.

Зависимость B от величины нагрузки.

Двигатель типа GEC-1730				Двигатель АВ-52	
I	Якорь	Возбуждение	Опытные данные	I	Якорь
300	490	427	—	100	28
250	470	412		79	25,4
225	465	407	405	50	19,6
160	412	367	367	32,5	12,2
100	290	267	250	20	5,6

Приведенные данные показывают, что с уменьшением нагрузки в двигателях закрытых и с независимой вентиляцией $B_э$ падает. Сложнее дело обстоит в двигателях с самовентиляцией. Здесь изменение P_0 зависит не только от соотношения потерь, но и от изменения $B_ж$ со скоростью. Например, в случае уменьшения нагрузки и повышения скорости отношение P_0 уменьшается, а $B_ж$ растет. В случае повышения нагрузки картина получается обратная. В результате изменение $B_э$ получает характер U-образной кривой. Наибольшее его значение получается при некоторой критической нагрузке. В обе же стороны от этой нагрузки он понижается.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Исследование изменения величины $T_э$ с нагрузкой удобней всего вести на основании уравнения (133). При постоянном значении t величина $T_э$ зависит только от знаменателя, который для более наглядного исследования вопроса рационально представить в виде:

$$D = 2{,}3 \lg \frac{x\left(P_0 + \frac{y}{x}\frac{1-y}{1-x}\right)}{P_0 + \frac{1-y}{1-x}}. \qquad (135)$$

Выражение (135) показывает, что $T_э$ в первую очередь зависит от P_0. Если $x = y$, то $T_э$ меняться не будет, оставаясь равным неизменно $T_ж$. Во всех же прочих случаях с изменением P_0 оно будет также меняться. Однако, здесь в отличие от $B_э$ характерно то, что с возрастанием P_0 может получаться и уменьшение и увеличение $T_э$. Это зависит от отношения:

$$\frac{y}{x} = \frac{e^{-\frac{t}{T_м}}}{e^{-\frac{t}{T_ж}}} = e^{\frac{t}{T_ж} - \frac{t}{T_м}}$$

Из последнего равенства следует что при $T_ж > T_м$ нужно ждать с возрастанием P_0 увеличения $T_э$, а при $T_ж < T_м$ его понижения. Нормально чаще всего получается первый случай, т. е. с уменьшением нагрузки $T_э$ увеличивается. Но иногда могут быть случаи и обратные, а именно у двигателей с очень сильной вентиляцией при относительно толстой изоляции. Скорей всего это можно ожидать в случае двигателя постоянного тока для обмоток возбуждения. Характерно, что для некоторых типов двигателей может получиться с увеличением P_0 для обмотки якоря возрастание $T_э$, а для обмотки возбуждения некоторое его понижение. В табл. 24 приведены значения $T_э$ для двигателя с независимой вентиляцией и для двигателя закрытого типа. Данные определены для якорных обмоток.

ТАБЛИЦА 24.

Зависимость $T_э$ от величины нагрузок.

Двигатель с независимой вентиляцией		Двигатель закрытый	
I	$T_э$	I	$T_э$
300	20,6	100	224
250	21,2	79	237
225	21,4	50	254
160	23,2	32,5	272
100	27,6	20	281

Из приведенных данных видно, что при установлении формул нагрева тяговых двигателей, как эквивалентных однородных тел, приходится считаться с тем, что тепловые коэфициенты $B_э$ и $T_э$ зависят как от длительности нагрузок, так и от их величин. Естественно, что при таких условиях метод эквивалентного тела не может быть построен на абсолютно точных предпосылках. Для практического его применения приходится итти на некоторые допущения.

Не может быть, конечно, сомнения в том, что при установлении $B_э$ и $T_э$ необходимо считаться с влиянием на них величин нагрузок и скорости. Но вопрос осложняется тем, что нет определенных указаний, к какой длительности этих нагрузок следует относить их значения. Повидимому, наиболее правильно основываться на нормальной длительности этих нагрузок, например, для часового режима относить коэфициенты к периоду 30—60 мин., для длительного — к нескольким часам и т. д. В отношении теплоотдачи $B_э$ можно итти и на дальнейшие допущения. Ввиду того, что он в зависимости от времени в пределах реально возможных нагрузок изменяется не особенно значительно, можно брать для него периоды длительного режима. Это будет итти несколько в запас мощности двигателя и сильно облегчит расчеты. Что же касается коэфициентов $T_э$, то их желательно брать, учитывая нормальную длительность нагрузок.

В табл. 25 приведены значения $T_э$ для двигателя АВ-52, с учетом длительности нагрузок. Здесь же даны вычисленные раньше коэфициенты $B_э$ (табл. 23) и определены значения эквивалентной теплоемкости, на основании известного соотношения для однородного тела (97).

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ТАБЛИЦА 25.

Тепловые постоянные в зависимости от нагрузки для закрытого двигателя.

I	$\frac{t}{\text{в min}}$	$T_э$	$B_э$	$A_э$
1,25 I_h	45	105	28	2940
I_h	60	130	25,4	3300
0,64 I_h	150	157	19,6	3080
I_∞	300	272	12,2	3080

Кроме отмеченных здесь обстоятельств, в условиях реального процесса работы тяговых двигателей приходится учитывать, что процесс нагрева их зависит еще от сопротивления обмоток, изменяющихся с их температурой. Чем выше температура, тем больше сопротивления, и тем выше джоулевы потери. Указанное обстоятельство было уже разобрано при анализе уравнений (89 и 92). Как было там выяснено, изменение температуры меди обмоток сказывается на величине коэфициента теплоотдачи, а это влечет за собою и влияние на постоянную времени, связанную с теплоотдачей уравнением (97).

Для того, чтобы показать, каких соотношений $B_э$ и $T_э$ нужно ждать в реальных условиях опыта, приведена табл. 26. В ней даны тепловые коэфициенты на основании опытных кривых (рис. 133).

ТАБЛИЦА 26.

Тепловые коэфициенты, полученные из опытов.

Двигатель ТН закрытый			
I	$B_э$	$T_э$	$A_э$
75	38	112	3460
50	25	154	3880
35	11,2	268	3030

Определив общий характер изменения $B_э$ и $T_э$, необходимо теперь установить способы их определения. Понятно, что к методу нагрева тягового двигателя как однородного тела приходится прибегать, главным образом, тогда, когда не имеется необходимых данных для более точных методов или когда желательно по возможности упростить подсчеты.

Наиболее просто определяются $B_э$ и $T_э$, если известны хотя бы три кривые нагрева двигателей для трех разных нагрузочных токов. По данным кривым согласно формулам (106) и (107) можно для каждого из этих коэфициентов установить в зависимости от нагрузочного тока или от скорости три значения и построить по ним кривые $B_э = f(I)$ и $T_э = f(I)$ или $B_э = f(v)$ и $T_э = f(v)$. Естественно, чем больше имеется кривых нагрева, тем точнее можно построить данные кривые. По такому методу определена табл. 26.

В том случае, если кривых нагрева не имеется, можно воспользоваться данными о длительных токах двигателя. Как уже отмечалось выше, довольно часто, особенно в американской практике, токи длительных мощностей нормально относятся к трем напряжениям — полному, трехчетвертному и половинному. Общий характер соотношений таких токов можно видеть из вышеприведенной табл. 19, где дана сводка данных о нормальных типах американских вигателей.

При наличии трех токов длительной мощности $I_{\infty 1/1}$, $I_{\infty 3/4}$ и $I_{\infty 1/2}$, можно получить три точки для $B_э$:

$$\left.\begin{array}{ll} \text{для напряжения полного} & B_э = \dfrac{I^2_{\infty 1/1}}{\tau_\infty} \\ \text{для напряжения, равного трем его четвертям,} & B_э = \dfrac{I^2_{\infty 3/4}}{\tau_\infty} \\ \text{для напряжения, равного его половине,} & B_в = \dfrac{I^2_{\infty 1/2}}{\tau_\infty} \end{array}\right\}. \qquad (136)$$

Значение τ_∞ дается заводом или устанавливается согласно нормам. При данной постановке вопроса удобней всего построить изменение $B_э$ в функции от скорости. Для этого необходимо от напряжений перейти к скоростям. Если этого за отсутствием нужных данных о двигателе точно определить нельзя, то в первом приближении можно считать, что при данных токах скорости пропорциональны напряжениям. При таком условии достаточно иметь кривую $v = f(I)$ для одного напряжения. Нормально всегда должна быть дана эта кривая для режима полного напряжения. Исходя из нее, скорости при двух других напряжениях можно определить простым умноже-

РБ УПУНТ (ДІІТ)

нием их значений на $^3/_4$ и на $^1/_2$. На рис. 139 нанесена кривая $B'_э = f(v)$, полученная указанным методом. При построении данной кривой приходится делать допущение, что значения $B_э$ не зависят от величины нагрузочного тока, а определяются только скоростью движения поезда. В действительности же это не совсем так. Проанализировать это можно на основании выражения (134), дающего закон изменения $B_э$. При условии, что время нагрева не оказывает влияния на $B_э$, значения $B_э$ будут определяться величиной P_0. Как показывает выражение (130), для установления P_0 нужно исходить прежде всего из общих потерь двигателя $P_п$. Они могут быть представлены в виде:

$$P_п = I^2\Sigma r + I\Delta U + kv^{1,5}B^2 + P_{мех}. \quad (137)$$

Первый член дает общие потери Джоуля, второй — электрические потери на коллекторе, третий определяет на основании часто применяемой формулы магнитные потери, и четвертый дает механические потери.

Выражение для P_0 при данных $P_п$ должно получить вид:

$$P_0 = B_м \frac{I^2\Sigma r + I\Delta U + kv^{1,5}B^2 + P_{мех}}{I^2 r B_ж}. \quad (138)$$

Здесь r — сопротивление той обмотки, температура которой определяется. Выражение (138) показывает, что P_0 зависит от тока, Если принять во внимание, что $I\Delta U$ относительно мало, а $P_{мех}$ имеют относительно небольшое влияние на нагрев, то влияние изменений тока будет зависеть главным образом от соотношения:

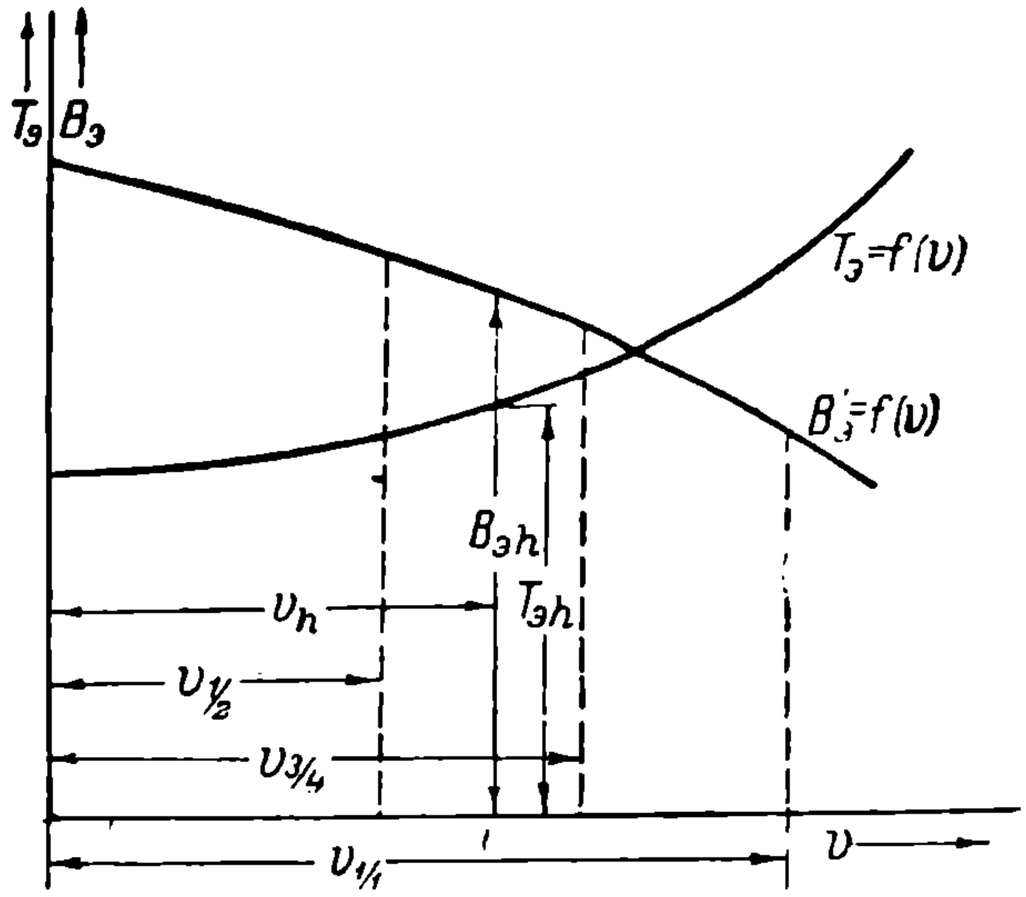


Рис. 139. Кривые тепловых коэфициентов тягового электродвигателя.

$$\delta = \frac{kv^{1,5}B^2}{I^2 r}. \quad (139)$$

Здесь v — скорость, а B — средняя индукция в якоре. Если бы насыщения не было, данное выражение не зависело бы от тока, так как B была бы пропорциональна I. При учете же насыщения переход от меньшего тока к большему должен сопровождаться уменьшением P_0. При учете $I\Delta U$ и $P_{мех}$ указанный эффект станет еще сильнее. Отсюда можно сделать заключение, что от состояния покоя до скорости, соответствующей I_∞, при полном напряжении, действительные $B_э$ должны быть меньше, чем это следует из диаграммы рис. 139. При скоростях же, превышающих указанную, они могут быть несколько выше. Это происходит потому, что в первом диапазоне нагрузочные токи будут больше токов длительных мощностей, а во втором диапазоне они будут меньше.

Для определения второй зависимости $T_э = f(v)$ нужно знать так же, как и для $B_э = f(v)$, по крайней мере три режима нагрева двигателя. Но в отличие от предыдущего режимы эти должны иметь конечную длительность, например, часовую, получасовую и пятиминутную. Тогда при известных $B_э$ величины $T_э$ определятся для трех точек из общей формулы нагрева. Практически, однако, установление T очень сильно осложняется потому, что вместо трех режимов нормально бывает известен только один часовой. В данном случае $T_э$ может быть определено только для одной скорости часового режима. Его определяют, исходя из формулы (96). В ней τ_h означает превышение температуры, допускаемое при часовом режиме. Оно в общем случае по нормам может отличаться от τ_∞, допускаемого для длительного режима. Значение B_h нужно взять для скорости часового режима v_h из построенной выше кривой $B_э = f(v)$. Вместо же $P_п$ нужно поставить I_h^2. Наличие одной только точки для построения кривой $T_э = f(v)$ влечет за собою большие осложнения. Одним из выходов может служить введение в расчет допущения, что эквивалентная теплоемкость $A_э$ будет величиной постоянной. При таком допущении $A_э$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

можно определить из выражения (97), где $B_{эh}$ и $T_{эh}$ определяются только что изложенным методом из часового режима:

$$A_э = B_{эh} T_{эh}. \tag{140}$$

Зная же $A_э$ и принимая ее за величину постоянную, можно определить значения $T_э$ для других скоростей, исходя из общего выражения (140), причем для каждой данной скорости величины $B_э$ надо брать из кривой рис. 139. Построенная таким образом кривая $T_э = f(v)$ нанесена на том же рис. 139. Применяя предлагаемый метод, необходимо иметь в виду, что значения $A_э$ в действительности не остаются точно постоянной величиной (Л. 215).

Второй метод установления $T_э$, рекомендуемый некоторыми авторами, может быть построен на допущении, что это величина постоянная, определяемая только из одной формулы (96). Такое решение вопроса в большинстве случаев будет иметь следствием для режимов при скоростях бо́льших v_h преуменьшение $T_э$, а при скоростях меньших — преувеличение. В общем случае такое допущение должно повлечь за собою преувеличение расчетной температуры.

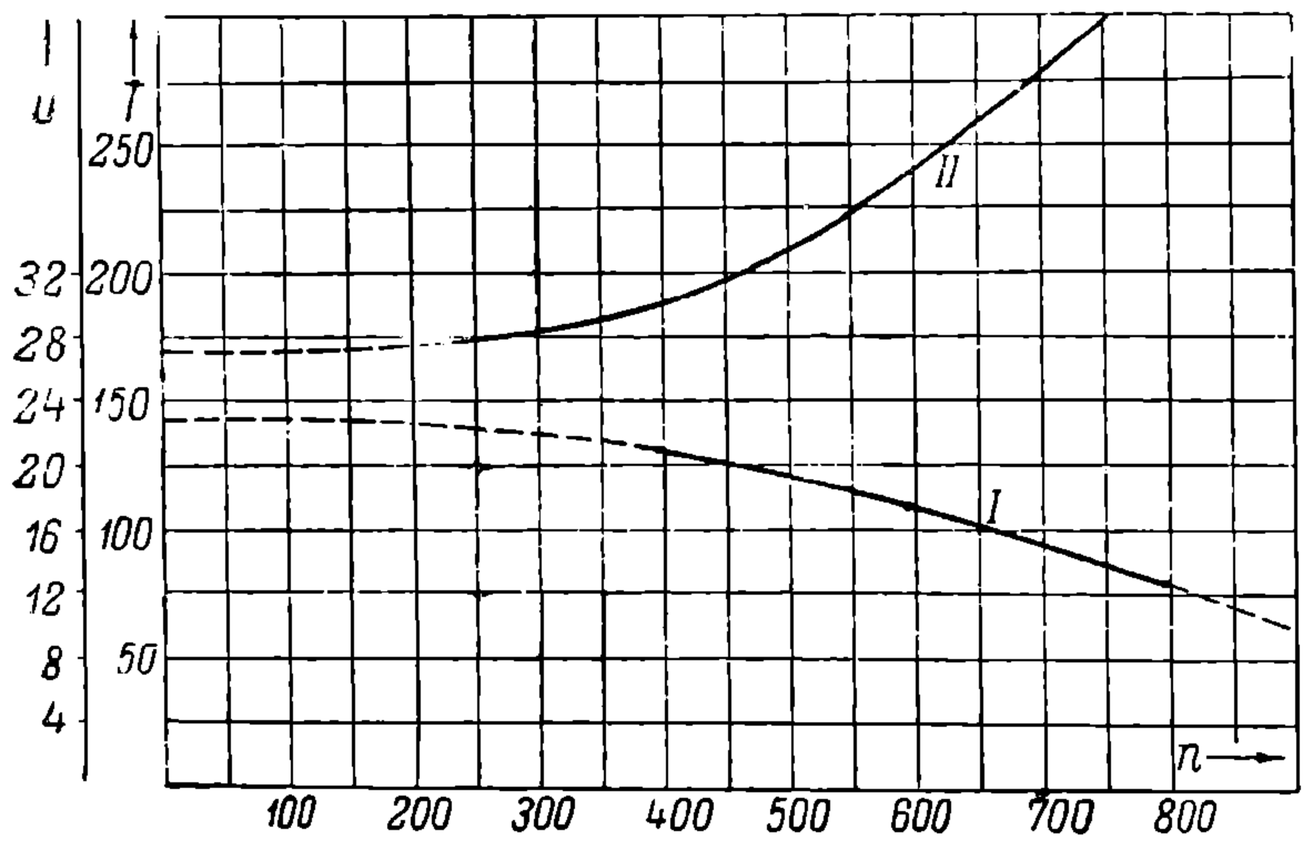


Рис. 140. Тепловые коэфициенты в функции от числа оборотов для закрытого двигателя ВКЭ типа АВ-52.

На рис. 140 приведены кривые $B_э$ и $T_э$ в функции от числа оборотов для закрытого двигателя типа АВ-52, построенные по методу трех напряжений. Если сравнить характер этих кривых с полученными из опыта или на основании двухступенчатого метода, то изменение $B_э$ и $T_э$ здесь имеется более резко выраженным. На рис. 141 даны кривые $B_э$ и $T_э$ (кривые I и II) для двигателя типа ПТ-35а, определенные по методу эквивалентного однородного тела, причем характер изменения I_∞ в зависимости от напряжения взят из табл. 19. Для сравнения там же применительно к соответствующим кривым нанесены точки, определенные по опытным кривым нагрева.

Очень труден для решения вопрос, какую величину коэфициента $T_э$ брать для моментов работы тяговых двигателей без тока. При решении этого вопроса приходится учитывать, что в первые моменты охлаждения значения $T_э$ в большинстве случаев сильно понижаются. Кроме того, необходимо иметь в виду, что в периоды работы машины без тока значения $T_э$ сильно зависят от того, каковы были перед этими периодами соотношения превышений температур $\tau_{ж}$ и $\tau_{м}$.

Одним из возможных решений этого вопроса может служить допущение, что для двигателей закрытых и с независимой вентиляцией при относительно коротких периодах охлаждения без тока значение $T_э$ можно брать по кривой $T_э = f(v)$ для $n = 0$ или $v = 0$. В случае же двигателей с самовентиляцией можно предложить значение $B_э$ определить по касательной к основанию кривой $B_э = f(v)$, как это показано на рис. 141. По определении же указанным способом $B_э$ величины $T_э$ допустимо устанавливать из соотношения (140), имея в виду, что при данном методе $A_э$ считается величиной неизменной. На рис. 141 кривая IV показывает степень совпадения предлагаемого решения вопроса с двухступенчатым методом. Кривая IV построена на основании касательной III. Кружками обозначены точки, определенные по методу двухступенчатого нагрева для пятиминутного остывания двигателя. Если период охлаждения очень длителен или если вообще допустимо

НВ УДУНТ (ДІІТ)

итти на большой запас рассчитываемой мощности, то можно для периода охлаждения так же, как и для нагревания, пользоваться основными кривыми $B_э$ и $T_э$ типа I и II. Для иллюстрации совпадения результатов метода эквивалентного тока с опытными данными можно обратиться к рис. 138. Как уже было отмечено, на нем сплошными линиями и точками обозначены данные из опытов, кружками — данные по вычислению Luke и крестами — по вычислению на основании метода эквивалентного тела.

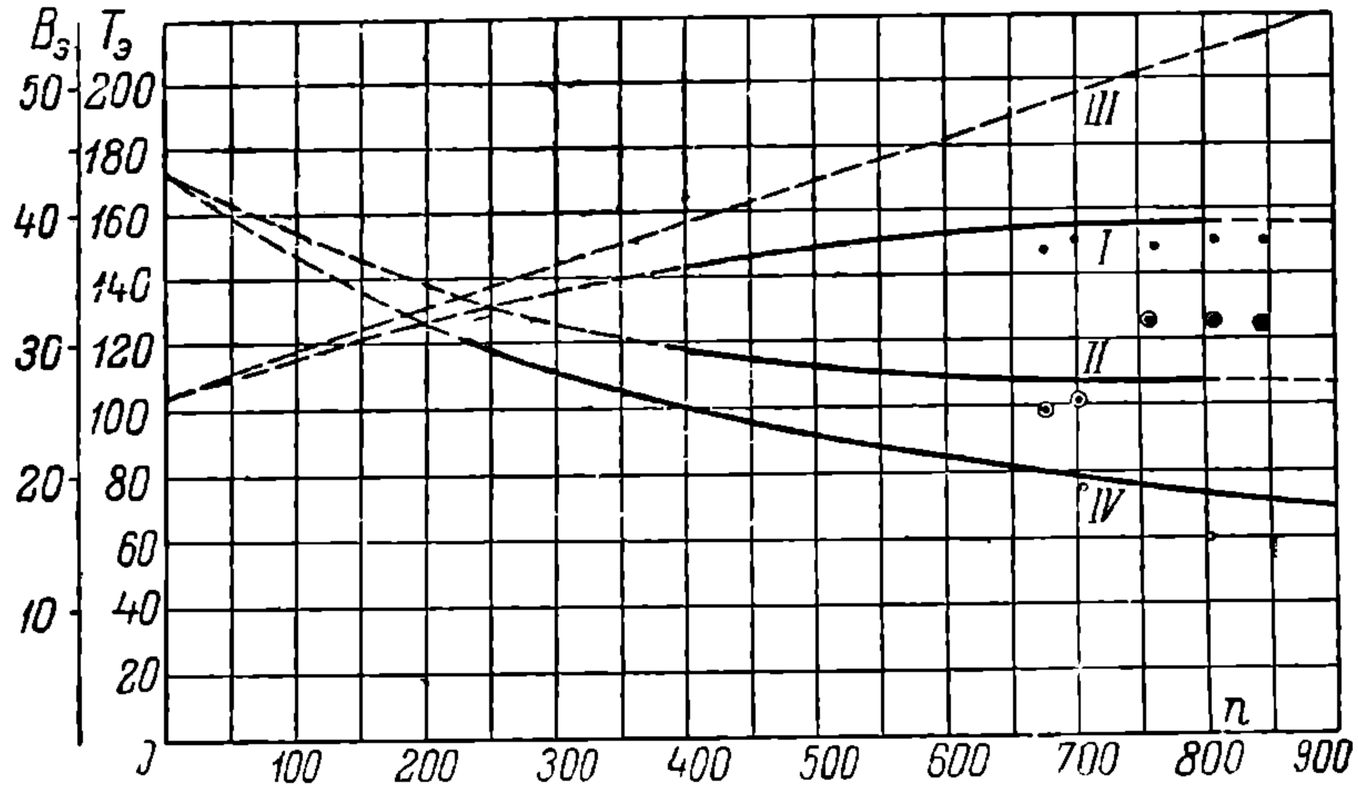


Рис. 141. Тепловые коэфициенты в зависимости от числа оборотов для двигателя с самовентиляцией типа ПТ-35а.

Метод эквивалентного однородного тела для отдельных режимов работы машины может дать достаточно удовлетворительные результаты. Однако, гарантировать при нем полное отсутствие неточностей для всех режимов работы не представляется возможным. В некоторых случаях он может повлечь за собою и ощутимые погрешности. Он является преимущественно применимым для случаев, не требующих особенно большой точности, главным образом в условиях предварительных тяговых расчетов.

Чтобы определение нагрева по методу однородного эквивалентного тела сделать достаточно надежным, нужно иметь кривые при полном напряжении для достаточно большого числа различных токов. Кроме того, для пускового периода, протекающего нормально при пониженном напряжении, важно иметь кривые нагрева при различных напряжениях для того тока, при котором двигатель пускается. При наличии таких кривых можно достаточно точно определить указанными выше методами $B_э$ и $T_э$ для всех основных режимов работы двигателя.

5. Определение нагрева тяговых двигателей при переменном режиме работы.

В реальных условиях эксплоатации тяговые двигатели работают с переменным режимом. В отдельные периоды работы они потребляют различные токи, временами оказываясь без всякой нагрузки. Периоды нагрева их нормально чередуются с периодами охлаждения. Такой режим работы очень сильно осложняет расчет нагрева.

Из методов, которыми можно пользоваться при таких условиях работы, прежде всего нужно остановиться на методе тепловых характеристик. Если даны кривые нагрева и охлаждения, по типу приведенных на рис. 135, то определение нагрева не представляет особых затруднений. Для примера предположим, что процесс работы двигателя, согласно рис. 135, начинается с тока в 90 А и продолжается на этом режиме в течение периода времени Δt_1. За этот период по кривой нагрева для 90 А превышение температуры поднимется до 50° С. Допустим, что дальше режим работы переходит на ток в 103 А и длится Δt_2. Для определения превышения температуры в конце этого периода нужно, как показано на рисунке, перейти сначала на кривую нагрева при 103 А и, начиная от полученной температуры в 50°, отсчитать по ней повышение температуры за время Δt_2. Это даст превышение температуры около 88°. Пусть третий режим с длительностью Δt_3 опять соответствует току 90 А. Естественно, двигатель будет охлаждаться. При таких условиях нужно перейти на кривую охлаждения при токе 90 А и по ней, начиная с 88°, отсчитывать температуру, которая получится после периода времени Δt_3; в данном случае она равна около 82°. Оперируя таким образом и для всех прочих нагрузочных токов, можно в результате определить конечное превышение температуры двигателя. Если кривых недостаточно, можно прибегнуть к интерполированию.

Принципиальная неточность данного метода заключается в том, что при переходе от одной тепловой характеристики к другой не выдерживаются соотношения между температурой железных масс внутри двигателя и температурой меди.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

При одной и той же температуре обмоток, как было выяснено в двухступенчатой теории нагрева, железные массы в зависимости от нагрузки могут иметь различные температуры. Ввиду этого, при переходе от одной тепловой характеристики к другой, хотя он совершается для одной и той же температуры обмоток, тем не менее нагрев железных масс не соответствует тому, который получился бы, если бы двигатель работал все время только по одной характеристике. Это обстоятельство влечет за собою некоторую неточность метода.

Второй метод определения температуры при переменном режиме можно основать на методе двухступенчатого нагрева. При его применении рекомендуется пользоваться формулой двухступенчатого нагрева, представленной в виде:

$$\tau = I^2\left[\frac{P_п}{I^2 B_{ж}}\left(1-e^{-\frac{t}{T_{ж}}}\right)+\frac{1}{B'_{м}}\left(1-e^{-\frac{t}{T_{м}}}\right)\right]+\tau_{ж_0}e^{-\frac{t}{T_{ж}}}+\tau_{м_0}e^{-\frac{t}{T_{м}}}. \qquad (141)$$

При пользовании этой формулой, для каждого тока I нужно знать сумму потерь $P_п$ в двигателе за вычетом потерь в передаче. Если дана кривая к. п. д., то это не представляет особого затруднения. В случае нужды потери в зубчатой передаче можно определить по нормальной американской шкале (Л. 196).

Значительно более сложную задачу представляет определение тепловых постоянных $B_{ж}$, $T_{ж}$, $B'_{м}$ и $T_{м}$. Оно относительно легко в том случае, если известны все необходимые для этого параметры машины. Однако, этих данных при тепловых расчетах в условиях проектирования дорог в большинстве случаев не имеется. Одним из способов, с помощью которых можно определить искомые коэфициенты, может явиться метод двух тепловых характеристик. Практически для этого удобней всего воспользоваться кривыми нагрева при токе I_h и токе I_∞, так как эти кривые в большинстве случаев даются заводами, производящими двигатели. Если эти характеристики даны, то, при принятых выше обозначениях, можно написать четыре уравнения, базируясь на формуле (141). Из кривой тока I_∞ для периода t и $2t$ при $\tau_{ж_0}=0$ и $\tau_{м_0}=0$ напишутся два уравнения:

$$\frac{\tau_1}{I^2_\infty}=\frac{P_п}{I^2_\infty B_{ж}}\left(1-e^{-\frac{t}{T_{ж}}}\right)+\frac{1}{B'_{м}}\left(1-e^{-\frac{t}{T_{м}}}\right). \qquad (142)$$

$$\frac{\tau_2}{I^2_\infty}=\frac{P_п}{I^2_\infty B_{ж}}\left(1-e^{-\frac{2t}{T_{ж}}}\right)+\frac{1}{B'_{м}}\left(1-e^{-\frac{2t}{T_{м}}}\right). \qquad (143)$$

Из кривой тока I_h для тех же периодов t и $2t$:

$$\frac{\tau'_1}{I^2_h}=\frac{P'_п}{I^2_h B_{ж}}\left(1-e^{-\frac{t}{T_{ж}}}\right)+\frac{1}{B'_{м}}\left(1-e^{-\frac{t}{T_{м}}}\right) \qquad (144)$$

и

$$\frac{\tau'_2}{I^2_h}=\frac{P'_п}{I^2_h B_{ж}}\left(1-e^{-\frac{2t}{T_{ж}}}\right)+\frac{1}{B'_{м}}\left(1-e^{-\frac{2t}{T_{м}}}\right). \qquad (145)$$

Если из первого уравнения вычесть третье и из второго четвертое и затем второе полученное выражение почленно поделить на первое, то в результате будет иметь место соотношение:

$$1+e^{-\frac{t}{T_{ж}}}=\frac{\frac{\tau_2}{I^2_\infty}-\frac{\tau'_2}{I^2_h}}{\frac{\tau_1}{I^2_\infty}-\frac{\tau'_1}{I^2_h}}. \qquad (146)$$

Отсюда при обозначении $k_в=\frac{I_\infty}{I_h}$ получается:

$$T_{ж}=-\frac{t}{2{,}3\lg\frac{(\tau_2-\tau_1)-(\tau'_2-\tau'_1)k^2_в}{\tau_1-\tau'_1 k^2_в}}. \qquad (147)$$

После определения $T_{ж}$ из этих же четырех уравнений можно определить и прочие три коэфициента $B_{ж}$, $B'_{м}$ и $T_{м}$.

Второй способ определения тепловых коэфициентов можно рекомендовать, если известны длительные токи для двух режимов. Токи могут быть даны и для полного напряжения и для напряжения пониженного. Это, по существу, роли не играет.

НВ УГУНТ (ДІІТ)

Кроме того, нужно знать какую-либо одну из кривых нагрева, например, для I_h или I

Если предположить, что потери $P_п$ и токи I_∞ известны для полного и половинного напряжения, то при $t=\infty$ на основании уравнений (142) можно написать:

$$\left.\begin{aligned}\frac{\tau_\infty}{I^2_{\infty^1/_1}} &= \frac{P_{п^1/_1}}{I^2_{\infty^1/_1}B_{ж}}+\frac{1}{B'_{м}}\\ \frac{\tau_\infty}{I^2_{\infty^1/_2}} &= \frac{P_{п^1/_2}}{I^2_{\infty^1/_2}B_{ж}}+\frac{1}{B'_{м}}\end{aligned}\right\}. \tag{148}$$

Из этих уравнений определяются $B_{ж}$ и $B'_{м}$. После их определения по кривой нагрева, если предположить ее известной для тока I_∞, значение $T_{ж}$ и $T_{м}$ определяются из уравнении типа (142) и (143). Если же известна кривая нагрева для I_h, то те же самые величины можно найти из уравнений (144) и (145).

В том случае, если ни одна кривая не известна, а даны только I_h и I_∞, вопрос очень осложняется. Выходом из затруднения может служить определение теплоемкости двигателя по формуле Luke (Л. 72). Для этого нужно знать общий вес двигателя. Соотношение же веса активных и веса неактивных частей можно брать ориентировочно. Пределы этого соотношения в среднем таковы: для мощностей порядка трамвайных двигателей нормально веса активных и неактивных масс приблизительно равны; для двигателей же мощностью порядка 300—400 kW вес активных масс составляет до 60% от полного. После определения $B_{ж}$ и $A_{ж}$ находят $T_{ж}$, а затем, принимая $\tau_{ж_0}=0$ и $\tau_{м_0}=0$, из уравнения (141) для часового режима при $t=60$ min определяют и $T_{м}$.

Предлагаемый метод определения коэфициентов двухступенчатого нагрева из тепловых характеристик и из данных постоянной мощности принципиально дает более точные результаты, чем определение этих коэфициентов по методу Luke, по параметрам машины. При определении их из опытных данных имеется большая гарантия, что допущения, делаемые Luke, сами собою корректируются в процессе опыта. Однако, здесь необходимо иметь в виду, что определение тепловых характеристик из кривых нагрева требует достаточно точного снятия последних. В противном случае может получиться значительная ошибка. Рационально определять коэфициенты для нескольких точек работы.

Необходимо учитывать, что все приведенные методы определения тепловых коэфициентов пригодны только для двигателей закрытых и с независимой вентиляцией. Очень осложняется вопрос по их определению в случае двигателей с самовентиляцией. Здесь приходится считаться с тем, что при переходе от одной нагрузки к другой меняется $B_{ж}$ и $T_{ж}$. Ввиду этого воспользоваться методом двух тепловых характеристик здесь практически не представляется возможным. Из наиболее простых способов определения искомых коэфициентов нужно указать на метод трех длительных токов и одной кривой нагрева при какой-либо нагрузке. Выше было уже указано, что для двигателей с самовентиляцией коэфициент $B_{ж}$ меняется в зависимости от скорости по прямолинейному закону, которую можно выразить соотношением:

$$B_{ж}=B'_{ж}+B_v v. \tag{149}$$

Таким образом, одну неизвестную $B_{ж}$ здесь приходится заменять двумя $B'_{ж}$ и B_v. Если известны три тока длительной мощности $I_{\infty^1/_1}$, $I_{\infty^3/_4}$ и $I_{\infty^1/_2}$ и соответствующие им скорости, а также и потери $P_{п^1/_1}$, $P_{п^3/_4}$ и $P_{п^1/_2}$, то неизвестные $B'_{м}$, $B_{ж}$ и B_v определяются из трех уравнений:

$$\left.\begin{aligned}\frac{\tau_\infty}{I^2_{\infty^1/_1}} &= \frac{P_{п^1/_1}}{I^2_{\infty^1/_1}\left(B'_{ж}+B_v v'\right)}+\frac{1}{B'_{м}}\\ \frac{\tau_\infty}{I^2_{\infty^3/_4}} &= \frac{P_{п^3/_4}}{I^2_{\infty^3/_4}\left(B'_{ж}+B_v v''\right)}+\frac{1}{B'_{м}}\\ \frac{\tau_\infty}{I^2_{\infty^1/_2}} &= \frac{P_{п^1/_2}}{I^2_{\infty^1/_2}\left(B'_{ж}+B_v v'''\right)}+\frac{1}{B'_{м}}\end{aligned}\right\}. \tag{150}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

После определения $B'_{ж}$ и B_v, согласно выражению (149), строится прямая $B_{ж}=f(v)$. После этого можно приступить к определению $T_{ж}$ и $T_{м}$. Для этого нужно обратиться к вышеупомянутой кривой нагрева при каком-либо из нагрузочных токов и на основании ее составить уравнения по типам (142) и (143) или (144) и (145), беря $B_{ж}$ при той скорости, которая соответствует току кривой нагрева. Отсюда определяются значения $T_{ж}$ и $T_{м}$. Вслед за этим устанавливается теплоемкость внутренних масс согласно уравнению (122), причем $B_{ж}$ и $T_{ж}$ берутся для одной и той же скорости, соответствующей току кривой нагрева. Для других скоростей значения $T_{ж}$ определяются по найденной постоянной $A_{ж}$ и прямой $B_{ж}=f(v)$. Величины $B'_{м}$ и $T_{м}$ для двигателей с самовентиляцией так же, как и для прочих типов, остаются постоянными.

Кроме разобранных методов — метода тепловых характеристик и двухступенчатого, определять нагревание тепловых двигателей можно и по методу эквивалентного тела. Для этого нужно построить по одному из вышеуказанных способов кривые зависимости $B_э=f(v)$ и $T_э=f(v)$ или $B_э=f(I)$ и $T_э=f(I)$.

Определение нагрева для каждого данного тока I производится по основной формуле нагревания (127), куда подставляются значения $B_э$ и $T_э$, соответствующие той скорости, которую развивает двигатель при данном токе. Значение τ_0 для самого первого режима будет равно нулю, а для каждой последующей нагрузки его нужно брать из предыдущего интервала. Так, переходя от одного режима к следующему, можно постепенно определить превышение температуры, которое получится в конце всего режима.

6. Тепловой баланс и допустимые температуры нагрева тяговых электродвигателей.

При изучении тяговых электродвигателей очень важно знать, какое количество тепла при различных нагрузках нормально поглощается теплоемкостью, и какое количество уходит в атмосферу в силу теплоотдачи. Для характеристики теплового баланса современных американских двигателей приведена табл. 27. Она особенно ценна потому, что, кроме собственного теплового баланса, дает представление и о том, каким образом распределяются потери в тяговых двигателях между отдельными их частями.

При рассмотрении этой таблицы нужно иметь в виду, что двигатели, помещенные в первом и втором столбце, отличаются только тем, что второй выполнен с вентилированием. Таблица очень наглядно характеризует влияние интенсивности вентиляции на тепловой баланс. Влияние это особенно характерно проявляется в отношении данных второго и третьего двигателя. Из них первый работает с относительно умеренной вентиляцией, а второй, принадлежа по типу к ультрабыстроходным двигателям, имеет вентиляцию весьма интенсивную. Несколько непонятным в таблице может показаться, почему при часовом режиме в закрытом двигателе 7,8% тепла уносит выходящий из кожуха воздух, тогда как при длительном режиме все тепло исключительно отдается через поверхность кожуха. Есть основание полагать, что это объясняется прежними американскими нормами, по которым часовой режим предписывалось вести с открытой крышкой кожуха. Очень характерны данные таблицы в отношении весовых соотношений двигателей, показывающие, какое огромное значение на их удельные веса оказывает степень интенсивности вентилирования.

Весьма важным вопросом при изучении тепловых свойств тяговых двигателей являются допустимые пределы их нагрева. При установлении предельных норм температуры приходится руководствоваться прежде всего теплостойкостью изоляции. Качество последней зависит от ее сорта. Современную изоляцию принято делить на два класса, *A* и *B*. К первому относят хлопчатую бумагу, шелк, бумагу и и прочие такого же вида материалы органического происхождения с пропиткой специальными лаками и маслами. Сюда же относятся и эмалированные провода. К классу *B* относят материалы и их композиции из слюды, азбеста и прочих такого же вида материалов неорганического происхождения в соединении со связующими веществами.

По данным AIEE для изоляции класса *A* нормально допустимой температурой нагрева нужно считать 105° С. При особенно высоком качестве этого типа изоля-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ТАБЛИЦА 27.

Данные теплового баланса тяговых двигателей.

Типы двигателей	Закрытый		С самовентиляцией				С независимой вентиляцией	
Напряжение в V	600	450	600	450	600	450	600	450
Режим нагрузок .	1 час	∞	1 час	∞	1 час	∞	1 час	∞
Мощность в PS .	60	—	65	—	25	—	200	—
Ток в A . . .	88	36	95	60	37	35	280	220
Число оборотов в мин.	700	827	700	638	1225	950	670	550
Вес двигателя без передачи в kg . .	1075	—	1075	—	396	—	2380	—
Вес якоря в kg . . .	281	—	281	—	106	—	780	—
Потери в обмотке якоря в W	1800	301	2100	840	820	733	3980	2450
Потери в железе в W .	1170	560	1170	620	780	500	3250	2500
Потери в щетках в W	264	103	285	180	111	105	840	660
Потери в обмотке возбуждения в W . .	1825	306	236	950	650	580	4690	2960
Потери на трение в W	600	800	65	560	440	310	1800	1400
Общие потери на 1 kg веса всего двигателя	5,36	1,93	6,10	2,93	7,25	5,65	6,11	4,2
Потери, тепло которых поглощается теплоемкостью в % ко всем потерям	81,4	0	81,9	0	57,5	0	69	0
Потери, тепло которых излучается кожухом в % ко всем потерям	10,8	100	4,6	6,2	12,5	45	4,9	14,3
Потери, тепло которых уносится с воздухом, выходящим из кожуха в % ко всем потерям	7,8	0	13,5	38	30	55	26,1	85,7

ции возможны и более высокие нагревы, порядка 115—120° С. В случае единичных кратковременных перегревов эта цифра, как показывает опыт, может быть повышена даже до 175—200° С. Однако, для нормальных условий эксплоатации такие высокие температуры нагрева допускать нельзя. Наблюдения за изоляцией показывают, что достаточно машину нагреть до указанных норм несколько раз, как уже изоляция теряет свою стойкость, быстро обращаясь в труху. При таких условиях изоляционный материал быстро осыпается. Особенно этого приходится опасаться в условиях тряски и ударов, которые неизбежны при работе двигателей в поезде. Ввиду этого для класса *A* в нормах обычно не допускают температуры выше 105° С.

Значительно более стоек в отношении изоляционных качеств класс изоляции *B* Азбест и слюда допускают очень высокие нагревы, до 150° С и выше. Здесь допустимые пределы нагрева приходится ограничивать, считаясь отчасти со стойкостью связывающих материалов, а главное с надежностью мест спаек. Наибольшие температуры, допускаемые для класса *B*, определяются около 130—150° С.

Естественно, что и с точки зрения производства и с точки зрения эксплоатации для тяговых двигателей, как и для электрических машин вообще, должны существовать вполне определенные установленные нормы. Долгое время различные государства в этом отношении держались разных точек зрения. В настоящее время большинство стран, в том числе и СССР, примкнуло к так называемым международным нормам, приведенным в табл. 28.

Нормы, приведенные в табл. 28, дают допустимые превышения температур над окружающей средой, температура которой принята в 25° С. Характерной. особенностью этих норм является то, что для часового режима допускаются нагревы выше, чем для длительного. Мотивируется это тем, что при кратковременных нагрузках можно допускать более высокие перегревы, чем при длительных. Нужно, однако, иметь в виду, что в условиях эксплоатации нормально приходится иметь дело не специально с часовым нагревом, а с нагревом двигателей вообще в процессе его длительной работы. Если двигатель случайно и работает в эксплоатации

НБ УГМНТ (ДІТ)

ТАБЛИЦА 28.

Допускаемые превышения температур для тяговых двигателей.

Мощности	Части двигателя	Род изоляции	Методы измерения	Допускаемые превышения температур
Часовая	Обмотки якоря и магнитов	Класс *A*	По сопротивлению	100°C
		Класс *B*	То же	120°C
		Класс *A*	По термометру	75°C
		Класс *B*	То же	95°C
	Кольца и коллекторы	—	То же	90°C
Продолжительная	Обмотка якоря и магнитов	Класс *A*	По сопротивлению	85°C
		Класс *B*	То же	105°C
		Класс *A*	По термометру	65°C
		Класс *B*	То же	85°C
	Кольца и коллекторы	—	То же	85°C

при часовом режиме, то этот режим регулярно повторяется. При современной технике производства тяговых электродвигателей, особенно при применении изоляции класса *B*, своевременно поднять вопрос о повышении допустимых норм нагрева по сравнению с интернациональными. В частности в СССР для этого класса изоляции предположено допустимое превышение температуры повысить.

Как основной метод, определяющий нагрев наиболее ответственных частей двигателя — обмоток, нормы принимают способ сопротивления. При пользовании им рекомендуется исходить из формулы:

$$R = R_0 \frac{235 + \theta}{235 + \theta_0} \tag{151}$$

Здесь R и R_0, θ и θ_0 — соответственно омические сопротивления и температуры нагрева для любого текущего и начального моментов работы машины. Отсюда искомая текущая температура нагрева:

$$\theta = \frac{235(R - R_0)}{R_0} + \theta_0 \frac{R}{R_0}. \tag{152}$$

Практически за начальную температуру удобней всего брать холодное[1] состояние машины, т. е. когда θ_0 равно температуре окружающей атмосферы.

В нормах некоторых государств, помимо метода сопротивления, измерение температур обмоток разрешается производить с помощью термопар. Последние в таких случаях должны помещаться в местах, где ожидается наибольшее повышение температуры. Преимущество измерения термопарами — в том, что они измеряют наибольшую температуру, тогда как по методу сопротивлений определяется среднее ее значение. Американцы разность эту определяют в 10—15° С. Поверхностные температуры по нормам можно определять термометрами или также термопарами. Здесь применение термопар особых осложнений не вызывает.

Испытание двигателей на нагрев можно вести как с помощью нагрузки их тормозом, так и по методу возвратной работы. Эти же методы можно применять и для других испытаний двигателей, например, для снятия характеристик и определения к. п. д. Метод возвратной работы особенно удобно применять с вольтодобавочной машиной. Самые методы исследования тяговых двигателей, по существу, не отличаются от применяемых к обычным машинам. Следует иметь в виду, что вышеприведенные нормы допускаемых превышений температуры предполагают испытание машин в стационарных условиях лаборатории (Л. 83).

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ОТДЕЛ ТРЕТИЙ.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЕЗДОМ.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ.

1. Общая постановка вопроса о пуске и разгоне поезда.

При изучении вопроса об управлении поездом приходится рассматривать три основных периода движения. Первый — регулирование движения в течение пуска и разгона поезда, второй — регулирование скорости нормального движения и третий — процесс торможения. Особенно сложен процесс разгона поезда. При разгоне в большинстве случаев требуется сообщать поезду высокие ускорения, и, как следствие этого, возникают большие тяговые усилия двигателей. В результате последние часто несут большие перегрузки. Кроме того, периоды разгона поезда сопровождаются сильно возрастающим потреблением энергии. Вопрос осложняется еще и затруднениями механического характера, так как при высоких ускорениях разгона неизбежны сотрясения, толчки и удары, влекущие за собою неудобство для пассажиров и расстройство как подвижного состава, так и рельсового пути.

Особенно нужно обратить внимание на то, что в процессе пуска и разгона поезда при небрежном и неумелом отношении к делу ведущих поезд могут иметь место крупные аварии, влекущие за собою разрывы поездов, выход из строя двигателей, аппаратов управления, а в некоторых случаях и еще более тяжелые последствия. Ввиду этого знание основ теории пуска и разгона поезда должно быть обязательным для всех, кто соприкасается с ведением поездов.

Изучение вопроса о разгоне поезда необходимо производить с механической и экономической точек зрения. С точки зрения механической необходимо при разгоне так планировать движение, чтобы получить как можно более плавный ход поезда, а с точки зрения экономической необходимо применять такие методы включения двигателей, которые позволяли бы экономить как можно больше электрической энергии, держа в то же время перегрузку двигателей в допускаемых для нее пределах.

При изучении вопроса о плавности разгона поезда наиболее целесообразно исходить непосредственно из основного уравнения движения (8). На основании общих принципов механики плавность хода может быть обеспечена только в том случае, если изменение скорости идет пропорционально времени, независимо от того, будет ли иметь место процесс ускорения или замедления. Для этого требуется, чтобы ускорение или замедление оставалось величиной неизменной:

$$\frac{dv}{dt} = a = \text{const}. \qquad (153)$$

Из основного уравнения движения следует, что для соблюдения этого условия рассматриваемый процесс ускорения поезда должен быть подчинен соотношению:

$$F - \Sigma R = \text{const}. \qquad (154)$$

Это равенство требует, чтобы в каждый данный момент разность между силой тяги F и сопротивлениями движению ΣR — так называемое ускоряющее усилие — оставалась постоянной. Практически регулировать разность $F - \Sigma R$ в течение полного периода нарастания скорости не представляется возможным. Ввиду этого выделяется первоначальный пусковой период, в течение которого такая регулировка производится. В дальнейшем же двигатели предоставляются самим себе, и работа их, как принято говорить, идет по автоматической характеристике.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Для облегчения расчетов пусковых приспособлений по большей части допустимо пренебречь в течени пускового периода изменением ΣR, так как нормально изменение это невелико, да и кроме того, по величине пусковая сила тяги при больших ускорениях значительно превышает сопротивления. При сделанном допущении условие достижения плавности хода сводится к требованию так регулировать работу двигателей, чтобы в течение всего первоначального пускового периода пусковая сила тяги оставалась неизменной:

$$F = \text{const.} \qquad (155)$$

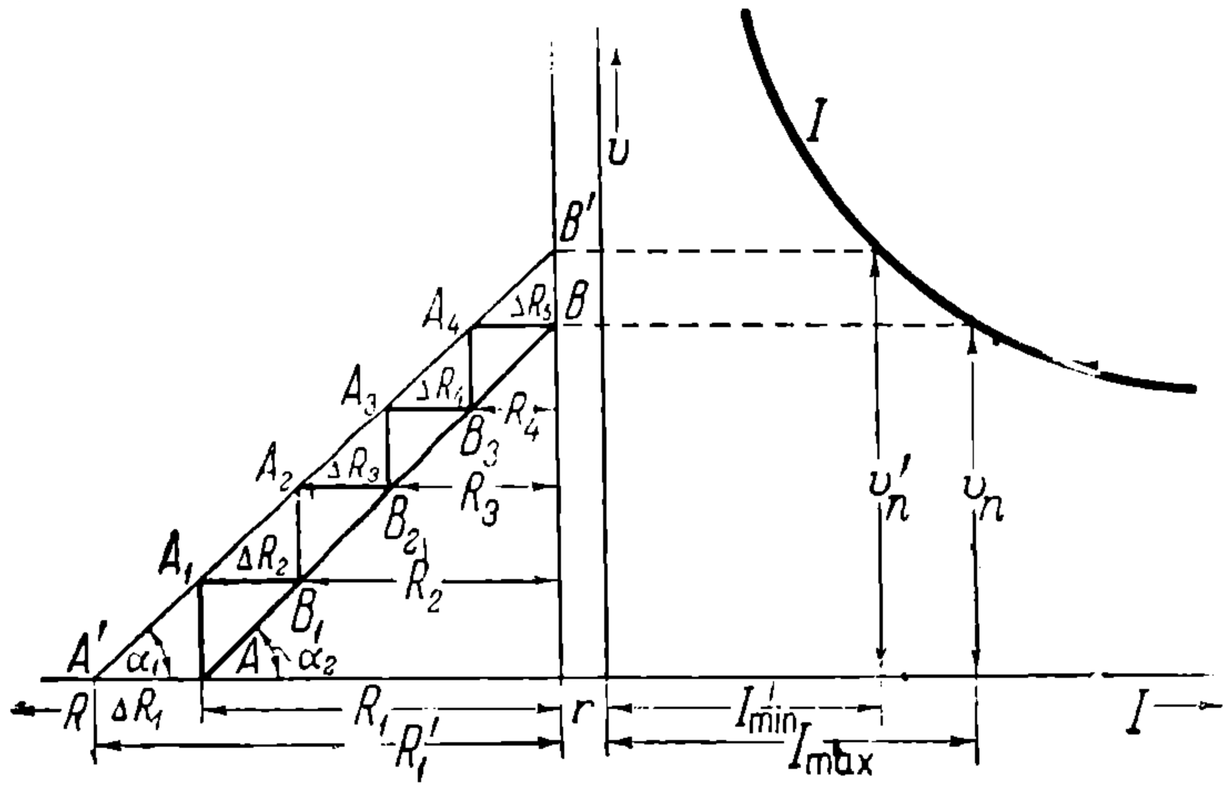


Рис. 142. Диаграмма для определения ступеней пусковых сопротивлений.

Однако, и данное равенство на практике в полной мере не удается соблюсти. Для этого требовалось бы непрерывно регулировать пусковой ток двигателей, определяющий собою величину F. Такая регулировка требует чрезмерного осложнения пусковых приспособлений, и потому она в большинстве случаев заменяется регулировкой ступенчатой. Принцип последней заключается в допущении колебания силы тяги F, но при соблюдении того непременного условия, чтобы эти колебания происходили в определенных и по возможности постоянных пределах при неизменном среднем значении F. Пределы колебаний силы тяги и тока задаются практическими данными, и для различных условий, как будет указано ниже, они имеют различные значения.

2. Управление поездом при постоянном токе.

Расчет пусковых реостатов и схемы пуска. Для управления поездом при постоянном токе в начальной стадии движения, как общее правило, приходится включать в цепь двигателей пусковые сопротивления. Расчет ступеней пусковых реостатов должен производиться согласно вышеуказанным условиям плавности хода. Отдельные ступени должны следовать друг за другом таким образом, чтобы колебания тока имели место в заранее намеченных пределах.

На рис. 142 дана схема расчета пусковых реостатов на основе данного метода. Кривая I дает характеристику двигателя $v = f(I)$. Интервалы изменений величин пусковых токов задаются токами I_{max} и I_{min}. Сопротивление всех обмоток двигателя принимается равным r. Сопротивления отдельных ступеней реостатов обозначаются через R_1, R_2, $R_3 \ldots R_n$.

При обосновании предлагаемого метода следует исходить из основного уравнения цепи двигателя, связывающего напряжение сети U, э. д. с. двигателя E и падение напряжения $I(r+R)$:

$$U = E + I(r+R). \qquad (156)$$

В данном случае приведенное уравнение должно быть проанализировано для

$$I = \text{const.}$$

При этом условии э. д. с. будет изменяться только в зависимости от скорости поезда v. Чтобы поддержать $I = \text{const}$, сопротивление R должно подчиняться условию:

$$U = kv_y + I(r+R_x). \qquad (157)$$

Полученное уравнение изображает прямую линию с переменными v_y и R_x. Оно дает возможность при изменении скорости поезда определять те пусковые сопротивления, которые необходимы для поддержания $I = \text{const}$. Прямые подобного рода справедливы для каких угодно токов, и в том числе для I_{max} и I_{min}:

$$U = kv_y + I_{max}(r+R_x) \qquad (158)$$

и

$$U = kv_y + I_{min}(r+R_x). \qquad (159)$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Уравнения (158) и (159) и кладутся в основу определения ступеней реостатов. На их основании прежде всего строятся прямые для I_{max} и I_{min}, которые в дальнейшем будут называться предельными. Строятся они по двум точкам. Точка покоя двигателя подчинена условиям:

$$\left.\begin{aligned} v_y = 0, \quad r + R_1 &= \frac{U}{I_{max}} \\ \text{и} \qquad\qquad r + R'_1 &= \frac{U}{I_{min}} \end{aligned}\right\}. \tag{160}$$

Точка выключения последней ступени реостатов дает для обоих случаев абсциссы, равные r, и ординаты — скорости v_n и v_n', соответствующие токам I_{max} и I_{min}. Искомые прямые AB и $A'B'$ нанесены на рис. 142 слева.

Первая ступень реостатов определяется величиною R_1. Дальнейшее определение ступеней производят, исходя из точки A. При трогании поезда с места и нарастании скорости начальный ток I_{max} начинает уменьшаться, но допустить это уменьшение согласно заданию можно только до момента, когда прямая AA_1 пересечет предельную прямую $A'B'$ Дальше работать на первой ступени реостату нельзя, так как пусковой ток сделался бы меньше I_{min}. Поэтому включается вторая ступень реостатов. Определяется она пересечением линии A_1B_1 с первой предельной прямой AB. Тогда в двигателе ток I_{min} снова поднимается до I_{max}. Такое построение продолжается, пока в цепи двигателя не остается только его сопротивление r. Построение произведено правильно, если последняя точка лестницы сопротивлений попадает в точку B, соответствующую скорости при токе I_{max}. Если с первого раза этого не случится, то нужно сделать новое построение, вариируя I_{max} и I_{min}, а также и число отдельных ступеней реостатов.

Вместо изложенного, наиболее часто применяемого графического метода определить ступени реостатов можно и по аналитическому способу, который для общего случая n числа реостатных ступеней следует из нижепроводимых выкладок (рис. 142).

$$\left.\begin{aligned} \Delta R_2 &= \Delta R_1 \operatorname{tg}\alpha_1 \operatorname{ctg}\alpha_2 = \Delta R_1 \frac{v'_n}{v_n}\frac{R_1}{R_1'} = \Delta R_1 q \\ \Delta R_3 &= \Delta R_2 q = \Delta R_1 q^2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \Delta R_4 &= \Delta R_3 q = \Delta R_1 q^3 \\ &\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \Delta R_n &= \Delta R_{n-1} q = \Delta R_1 q^{n-1} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \\ \Delta R_{n+1} &= \Delta R_n q = \Delta R_1 q^n \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \end{aligned}\right\}. \tag{161}$$

Отсюда выводится расчетное уравнение:

$$\Delta R_1 (q + q^2 + q^3 + \qquad + q^n) = R_1. \tag{162}$$

Путем преобразований оно приводится к виду:

$$n = \lg \frac{R'_1 - \dfrac{R_1}{q}}{R'_1 - R_1} : \lg q. \tag{163}$$

Так как значения R'_1, R и q устанавливаются по предварительным заданиям из выражений (160) и (161), то уравнение (163) дает непосредственно число ступеней. Если n получилось дробным, то привести его к ближайшему целому нужно путем вариирования I_{max} и I_{min}.

Окончательные величины отдельных ступеней реостатов для обоих методов определяются выражениями:

$$\left.\begin{aligned} &1 \text{ ступень} \quad \ldots\ldots\ldots R_1 \\ &2 \quad \text{„} \quad \ldots\ldots\ldots R_2 = R_1 - \Delta R_2 \\ &3 \quad \text{„} \quad \ldots\ldots\ldots R_3 = R_1 - (\Delta R_2 + \Delta R_3) \\ &\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &n \text{ ступень} \quad \ldots\ldots\ldots R_n = R_1 - \sum_2^n \Delta R \end{aligned}\right\}. \tag{164}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Приведенные методы расчета сопротивлений относятся к случаю, когда имеется один двигатель, но они справедливы и для случая, когда двигатели включены как угодно, только бы соединение между ними не изменялось, т. е. когда они включены по так называемой одноступенчатой схеме. При групповых одноступенчатых схемах следует только соответственным образом устанавливать r и $v=f(I)$, учитывая число и способ включения отдельных цепей двигателей и напряжения, подводимые к отдельным единицам.

Экономика пуска при одноступенчатом включении двигателей может быть исследована на основании диаграммы (рис. 143). По оси ординат здесь отложены мощности, а по оси абсцисс — время движения поезда. Прямая OB характеризует собою всю ту мощность, которую берет двигатель при пуске. Кривая AD дает потери в двигателе. Линия OD представляет мощности, расходуемые непосредственно на производство движения. Линия эта должна быть близка к прямой, так как ускорение за время пуска, как было отмечено, поддерживается практически постоянным. Следовательно, скорость поезда при разгоне изменяется пропорционально времени, а потому и мощности при $F=\text{const}$, как это следует из общего уравнения (7), будут также изменяться пропорционально времени, т. е. прямолинейно. При таких условиях на рис. 143 площадь I характеризует собою потери в двигателях, площадь II — потери в реостатах и площадь III — полезную работу, затрачиваемую на движение поезда, причем через I_n обозначен средний пусковой ток и через T_n — время нахождения двигателей под реостатами.

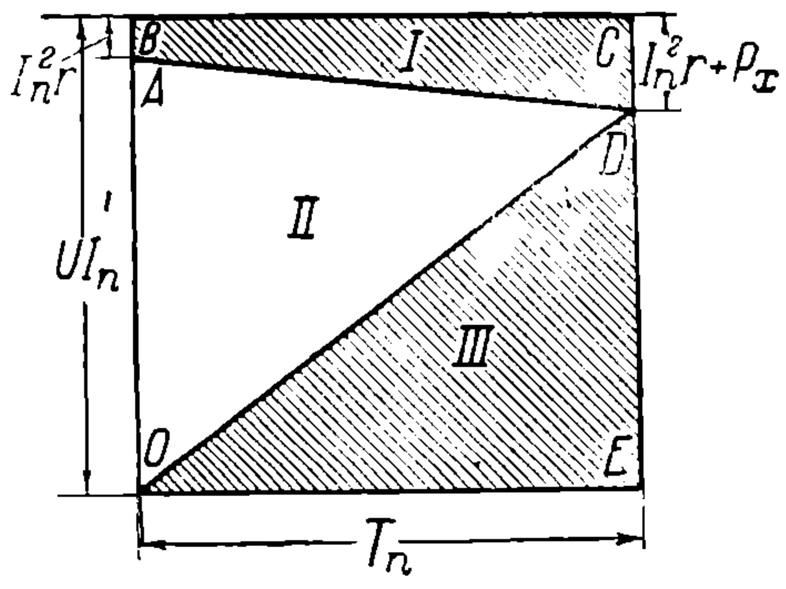


Рис. 143. Диаграмма для определения потерь в пусковых реостатах.

Полный коэфициент полезного действия пуска с учетом потерь в двигателе определяется выражением:

$$\eta_n=\frac{\square ODE}{\square OBCE}. \tag{165}$$

Числовое значение этого к. п. д. ориентировочно можно определить на основании следующих предпосылок:

$$\square ODE \cong 0{,}5\,(UI_n - I^2{}_n r - P_x)\,T_n,$$
$$\square OBCE = UI_n T_n,$$
$$\square OAD \cong 0{,}5\,(UI_n - I^2{}_n r)\,T_n.$$

Для средних типов двигателей можно допустить:

$$I^2{}_n r \cong 0{,}09 UI_n,$$
$$P_x = 0{,}04 UI_n.$$

Тогда числовое значение:

$$\eta_n = 43{,}5^0{}_0.$$

Очень удобно потери в пусковых реостатах определять в зависимости от скорости v_n, при которой выключаются реостаты. В период пуска двигателей вся полезная работа, совершаемая ими, идет, во-первых, на компенсацию работы вредных сопротивлений и, во-вторых, на сообщение живой силы поезду. Если путь движения поезда под реостатами обозначить через l_n, то работа вредных сопротивлений за период пуска будет равна:

$$A'_n = \int_0^{l_n} \Sigma R\,dl \ \text{kgm}$$

или приближенно:

$$A'_n = l_n \Sigma R_{cp} \ \text{kgm}.$$

Живая же сила, запасенная к моменту выключения реостатов, если выразить пусковую скорость в km/h, по общему правилу выражается:

$$A''_n = \frac{M_n v^2{}_n}{2 \times 3{,}6^2} \ \text{kgm}.$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ОПЕЧАТКИ

Строка	*Напечатано*	*Должно быть*
1 сн.	$2\left(\quad I_n^2 r - P_x\right)$	$2\left(UI_n - I_n^2 r - P_x\right)$

НБ
УДУНТ
(ДІІТ)

Отсюда вся работа при пуске с учето потерь в двигателях:

$$A_п = \left(l_п \Sigma R_{ср} + \frac{M_п v^2_п}{2 \times 3{,}6^2}\right) \frac{1}{\eta_{ср}} \text{ kgm.} \quad (166)$$

Так как из предыдущих рассуждений видно, что потери энергии в пусковых реостатах приблизительно равны энергии, расходуемой для полезной работы, то выражение (166) одновременно может служить и мерилом энергии, затрачиваемой в этих реостатах. Допущение, которое при этом делается, характеризуется соотношением:

$$\square ODE + \square ABCD \cong \square OAD.$$

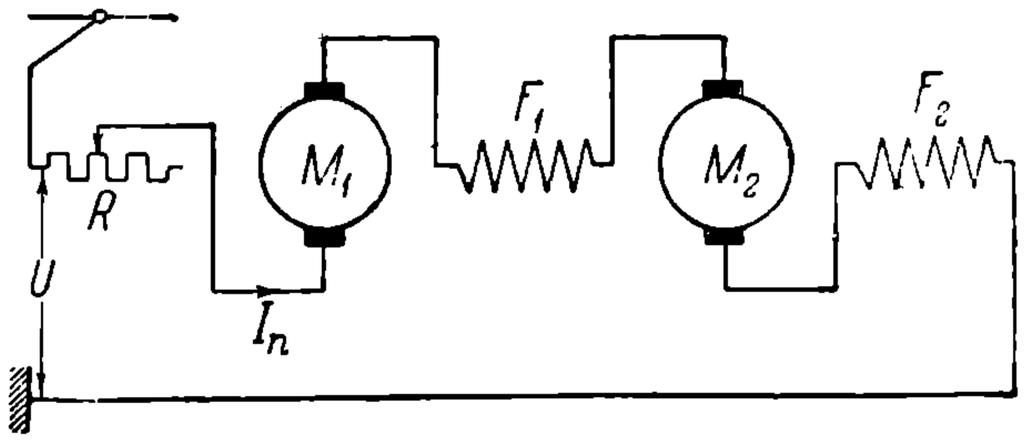


Рис. 144. Схема последовательного включения тяговых электродвигателей.

Как выяснено, степень использования энергии при одноступенчатом пуске получается очень низкая. Около 50% энергии затрачивается в пусковых реостатах. Для улучшения экономики пуска приходится отказываться от одноступенчатой системы и прибегать к системам многоступенчатым. Из них наибольшим распространением пользуется система двух ступеней. В простейшем виде она представлена на рис. 144 и 145. Здесь двигатели на протяжении первой части пускового периода, когда не требуется больших скоростей движения, и когда достаточно поэтому подводить к ним половинное напряжение, включены последовательно, а затем, когда уже половинного напряжения недостаточно, они переводятся на параллельную работу. Экономика данной системы пуска в ход, требующей не меньше двух двигателей, видна из рис. 146.

Периоды $T_п'$ и $T_п''$, в течение которых двигатели находятся в последовательном и в параллельном соединении при условии постоянства ускорения, определяются на основании скоростей поезда, при которых производят выключение реостатов

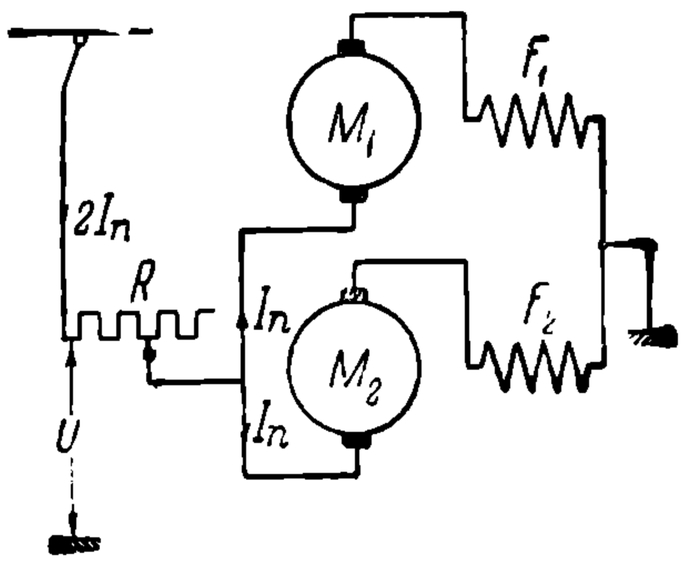


Рис. 145. Схема параллельного включения тяговых электродвигателей.

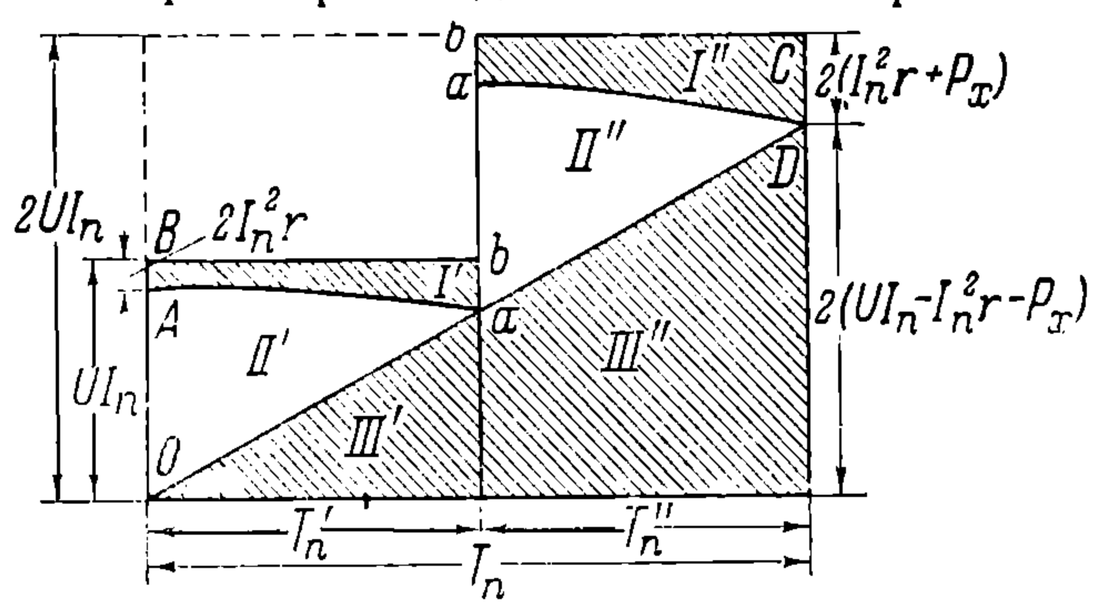


Рис. 146. Диаграмма для определения потерь при последовательно-параллельном пуске тяговых электродвигателей.

при том и другом режиме. Так как скорости вращения двигателей при одном и том же токе пропорциональны э. д. с., и так как к концу периода $T'_п$ при условии $a = \text{const}$ скорость определяется величиной пропорциональной $0{,}5(U - 2I_п r)$, а к концу $T_п$ — величиной пропорциональной $U - I_п r$, то отношение периодов $T_п'$, $T_п''$ и $T_п$ можно найти на основании следующего выражения:

$$\frac{T'_п}{T_п} = \frac{T'_п}{T'_п + T''_п} = \frac{0{,}5\,(U - 2I_п r)}{U - I_п r}. \quad (167)$$

Для практических целей, пренебрегая падениями напряжения, возможно принять:

$$T'_п = T''_п = 0{,}5 T_п. \quad (168)$$

При сделанном допущении коэфициент полезного действия пускового периода для последовательно-параллельного соединения определяется соотношением:

$$\eta_п = \frac{0{,}5 \times 2\,(U_п \quad I^2_п r - I_x)\, T_п}{0{,}5 U I_п T_п + U I_п T_п} = 58\%.$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Полученные цифры указывают на значительные преимущества двухступенчатого пуска. Экономия энергии по сравнению с одноступенчатым достигает 14,5%, причем самые потери в реостатах, как легко убедиться из рис. 143 и 146, уменьшились почти в два раза.

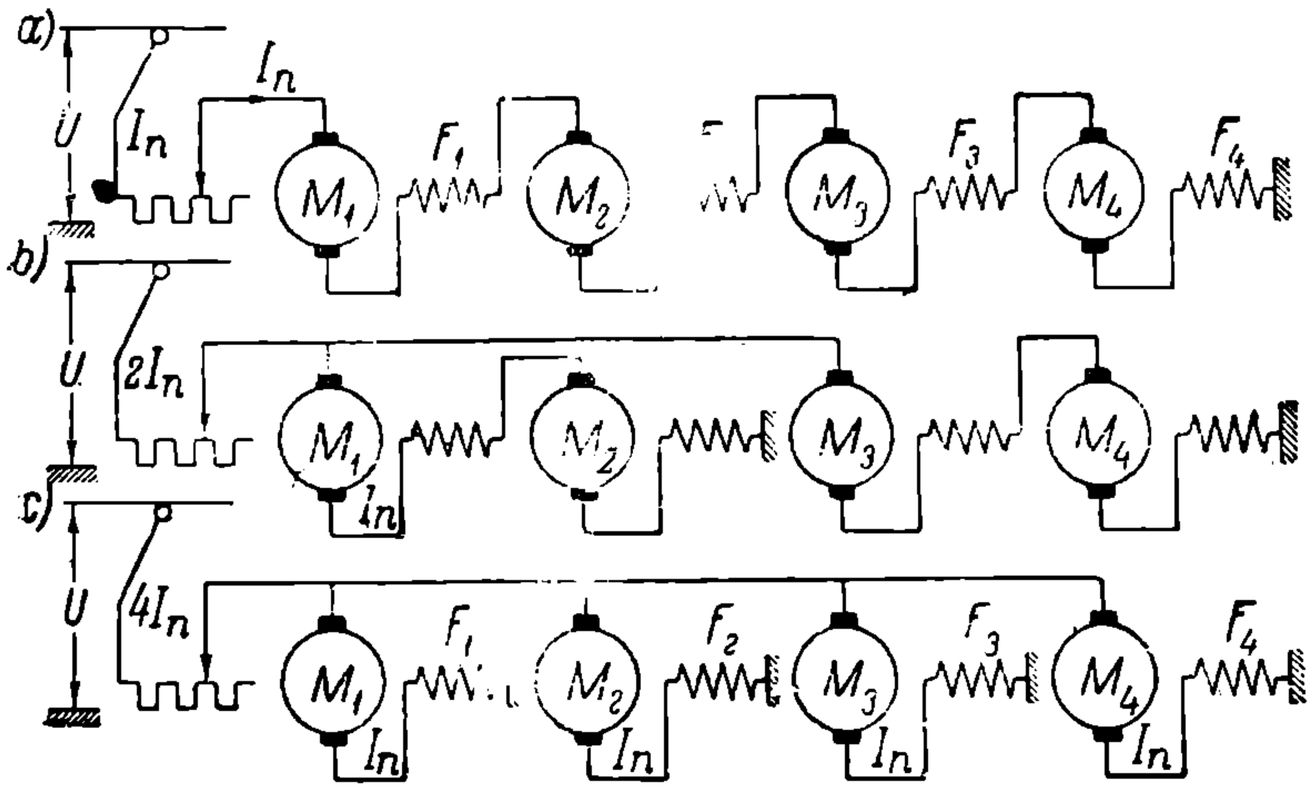


Рис. 147. Схема трехступенчатого пуска при четырех двигателях.

Для дальнейшего понижения расхода энергии при пуске иногда прибегают к трехступенчатой системе. Применение ее для наиболее часто встречающейся системы четырехосных вагонов с четырьмя двигателями показано на рис. 147. Здесь сначала все двигатели включаются последовательно, беря на себя по одной четверти полного напряжения, затем они включаются последовательно-параллельно с половиной напряжения на каждом и в последней стадии — все параллельно при полном напряжении.

Диаграмма экономики трехступенчатого пуска приведена на рис. 148. Учитывая напряжения, получаемые двигателями в конце каждой из трех ступеней, соотношения периодов отдельных пусков можно принять равными:

$$\left.\begin{aligned} T'_n = T''_n = 0{,}25\,T_n \\ T'''_n = 0{,}5\,T_n \end{aligned}\right\}. \qquad (169)$$

и

Коэфициент полезного действия пускового периода определяется выражением.

$$\eta_n = \frac{0{,}5 \times 4\,(UI_n - I^2_n r - P_x)\,T_n}{0{,}25UI_nT_n + 0{,}25 \times 2UI_nT_n + 0{,}5 \times 4UI_nT_n} \cong 63{,}5\%.$$

По сравнению с предыдущей схемой экономия получается равною всего лишь 5,5%. Ввиду относительно небольшого прироста к. п. д., трехступенчатая схема во избежание усложнения в управлении поезда применяется редко. Она заменяется двухступенчатой при комбинациях *a* и *b* или *b* и *c*. Первая применяется преимущественно при высоких напряжениях в контактной системе, когда важно понизить напряжение на коллекторе, а вторая при низких, когда этого понижения не требуется.

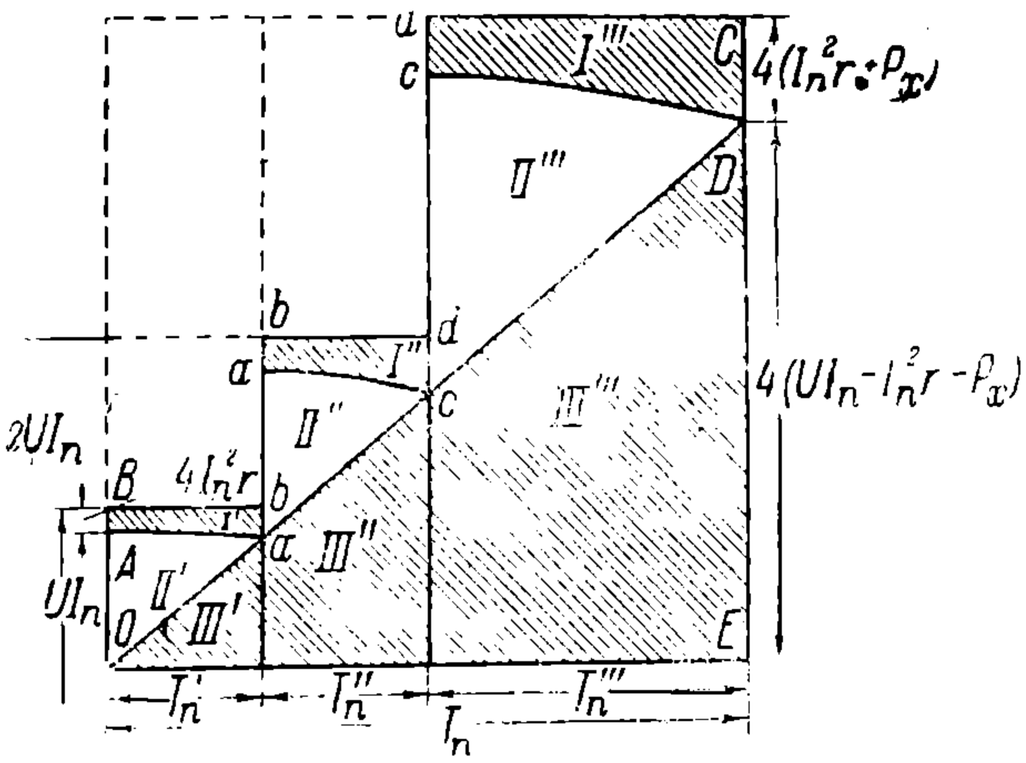


Рис. 148. Диаграмма для определения пусковых потерь при трехступенчатой системе пуска.

Причина относительно малого увеличения к. п. д. при последней схеме объясняется частично неравномерным соотношением периодов времени работы на каждой ступени (169). Эффект получается несколько лучший, если указанные соотношения подчинить условию:

$$T'_n = T''_n = T'''_n = \frac{1}{3}\,T_n. \qquad (170)$$

На рис. 149 приведен образец такой схемы. Применяется она иногда на электровозах, когда число двигателей кратно шести. Диаграмма ее энергетики строится подобно диаграмме рис. 148, но только с учетом вместо соотношения (169) выражения (170).

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Данная схема дает к. п. д. равный:

$$\eta_n = \frac{0{,}5 \times 3\,(UI_n - I^2{}_n r - P_x)\,T_n}{\frac{1}{3} UI_n T_n + \frac{1}{3} \times 2UI_n T_n + \frac{1}{3} \times 3UI_n T_n} \cong 66\%.$$

Обращаясь теперь к выражению (166), для многоступенчатых систем пуска при выражении потери энергии в джоулях можно написать его в общей форме:

$$A_n = k_n \left(\frac{M_n v^2{}_n}{2 \times 3{,}6^2} + l_n \Sigma R_{cp} \right) \frac{9{,}81}{\eta_{cp}}. \qquad (171)$$

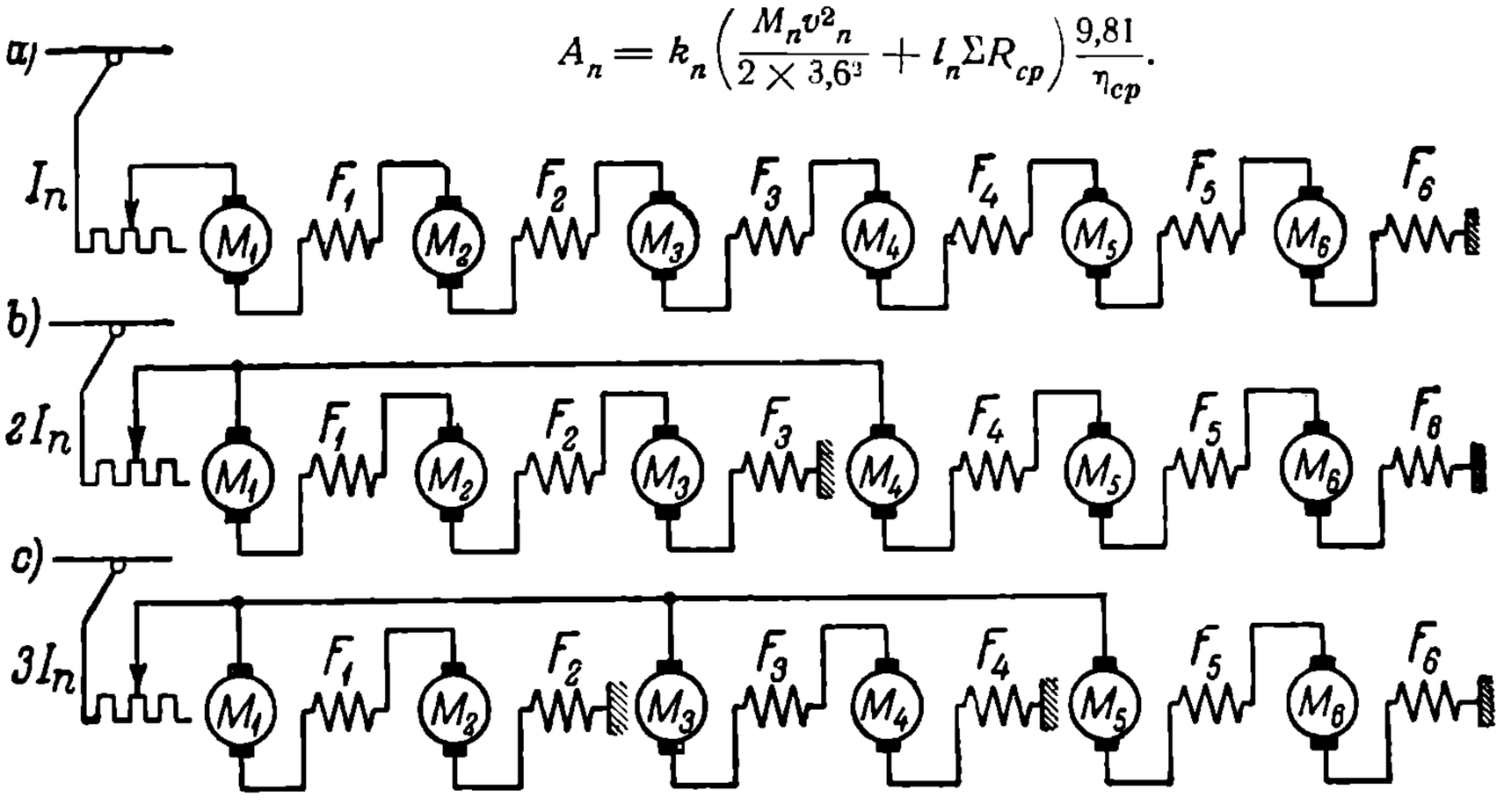


Рис. 149. Схема трехступенчатого включения при шести двигателях.

Здесь k_n характеризует собою уменьшение потерь в реостате при многоступенчатых системах пуска по сравнению с одноступенчатым. Было уже выяснено, что для двухступенчатого пуска этот коэфициент приблизительно равен $^1/_2$. Таким же самым образом, можно установить, что для рассмотренных трехступенчатых систем пуска он с достаточным приближением может быть принят соответственно равным $^3/_8$ и $^1/_3$. В табл. 29 сведены данные, характеризующие потери в пусковых реостатах для различных систем.

ТАБЛИЦА 29.

Характеристика потерь в пусковых реостатах

Схемы	k_n	к. п. д. %
Одноступенчатая . .	1	43,5
Двухступенчатая . . .	$^1/_2$	58,0
Трехступенчатая неравномерная . .	$^3/_3$	63,5
Трехступенчатая равномерная .	$^1/_3$	66,0

Расчет пусковых реостатов для двухступенчатого пуска виден из рис. 150, где кри-

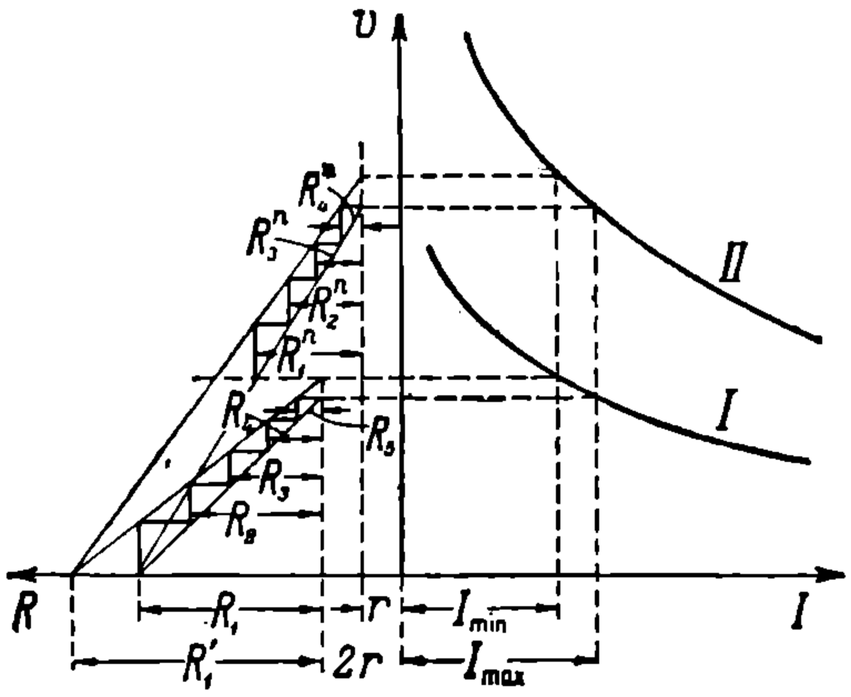


Рис. 150. Диаграмма для определения ступеней пусковых сопротивлений при последовательно-параллельном включении двигателей.

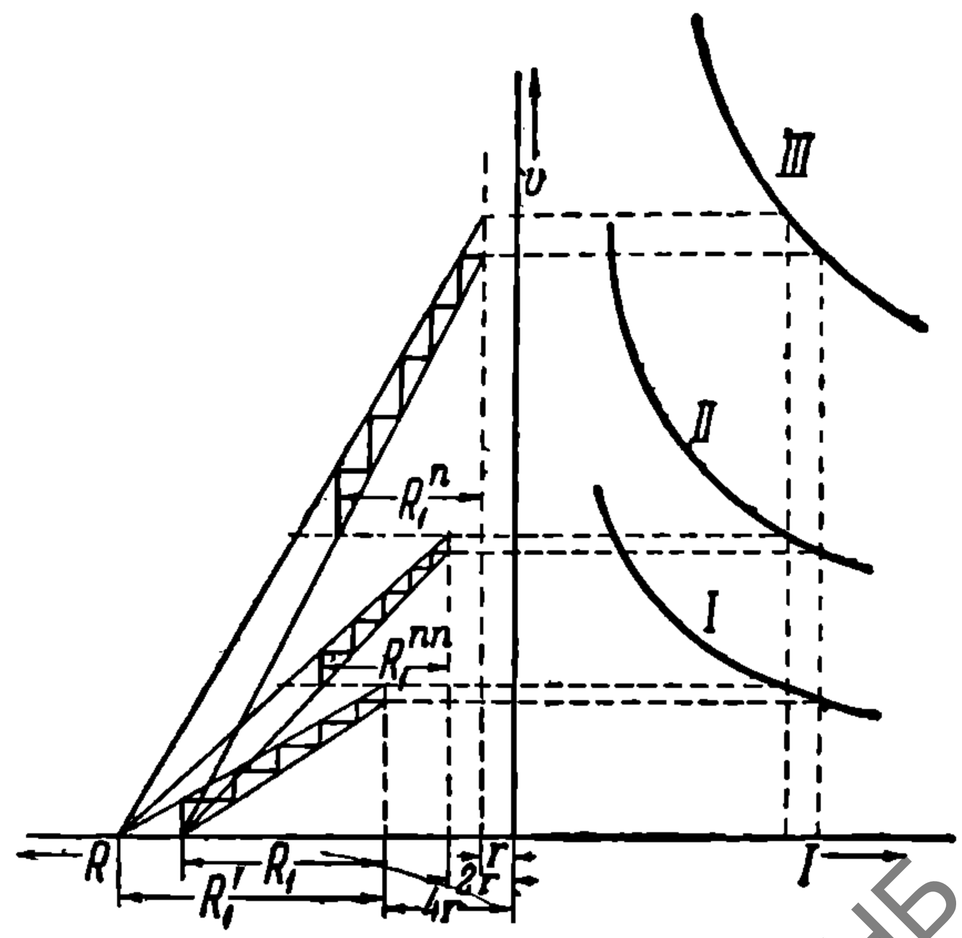


Рис. 151. Диаграмма для определения ступеней пусковых реостатов при трехступенчатой схеме пуска в случае четырех двигателей.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

вая I построена для последовательно соединенных двигателей, а кривая II для каждого двигателя в отдельности. Определение ступеней реостатов для трехступенчатой системы представлено на рис. 151. Здесь кривая I построена для последовательного соединения четырех двигателей, II — для двух и III — для одного. Ввиду такого способа построения характеристик для получения действительных ступеней реостатов при последовательных включениях следует брать их такими, как они определены на рисунках. Для определения ступеней параллельного включения при двухступенчатой схеме и последовательно-параллельного при трехступенчатой полученные на чертеже значения нужно делить на два. При установлении же ступеней параллельного включения трехступенчатой схемы полученные значения необходимо делить на четыре.

Количество пусковых ступеней реостатов. При расчете пусковых сопротивлений очень важно правильно установить значения I_{max} и I_{min}. Чем меньше между ними интервал, тем это благоприятнее для плавности хода поезда. Однако, чрезмерное снижение этого интервала может повлечь за собою недопустимо большое число ступеней реостатов. В среднем колебание тока при пуске трамвайных двигателей допускается в ту и другую сторону на 12—15%, что дает соотношение $I_{min} = 0{,}70 - 0{,}76 I_{max}$. Для тяжелых моторвагонных поездов и тяжелых электровозов норму колебания тока снижают до 6—10%.

В некоторых случаях часть ступеней реостатов может быть заменена ступенями регулирования поля двигателей. Для этой цели вместо введения новой ступени реостата уменьшают AW возбуждения, что производится или шунтированием обмотки возбуждения соответствующим сопротивлением, или секционированием ее витков. При ослаблении магнитного поля для поддержания постоянной пусковой силы тяги приходится увеличивать ток, что влечет за собою добавочную перегрузку двигателей и сети. Во избежание этого иногда идут на постоянном пусковом токе, но уменьшают силу тяги. Данный метод в свою очередь имеет недостаток в том отношении, что влечет за собою изменение пусковой тяги в процессе разгона, вследствие чего нарушается плавность хода, и ослабляется общий эффект ускорения. Регулирование поля при пуске в ход дает возможность уменьшить число реостатных ступеней и этим самым понизить пусковой расход энергии.

Число отдельных ступеней пуска колеблется в широких пределах, в зависимости от типа движения. В табл. 30 приведены наиболее часто встречающиеся комбинации пусковых ступеней для трамвайного оборудования, причем через R обозначены реостатные ступени, через X—безреостатные и через X_0 — ступени без реостатов с ослаблением поля.

ТАБЛИЦА 30.
Пусковые положения трамвайных контроллеров.

Последовательное включение	Параллельное включение	Общее число ступеней
$4R + X$	$3R + X$	9
$5R + X$	$3R + X$	10
$4R + X + X_0$	$2R + X + X_0$	10
$4R + X + X_0$	$1R + X + 2X_0$	10
$4R + X + X_0$	$2R + X + 2X_0$	11
$4R + X + X_0$	$2R + X + 2X_0$	11

Степень ослабления поля при одной ступени чаще всего берется из расчета ослабления AW в обмотке возбуждения на 50% и реже — на 33%. При двух ступенях их ослабляют на 25% и 50%.

В моторных вагонах железнодорожного типа, а также в электровозах число ступеней берется значительно выше трамвайного. Примером могут служить электровозы дороги Ch. M. St. P. R, где число ступеней последовательного соединения доведено до $16 + X$ и параллельного $11R + X + X_0$, что дает в общей сложности тридцать положений.

Следует указать, что в последнее время замечается значительная тенденция к уменьшению колебания пускового тока, т. е. другими словами, к сближению значений I_{max} и I_{min}. Одним из решений этой задачи является идея применения коллекторных пусковых реостатов. Они состоят из коллектора, напоминающего обычный коллектор машины, к пластинам которого присоединяются отдельные секции пускового реостата. Изменение сопротивления достигается путем передвижения по коллектору щетки, отводящей ток от сопротивлений к двигателям. При большом количестве реостатных секций колебание пускового тока при переходе от каждой ступени сопротивления к следующей можно свести до весьма малых значений. Увеличивая или уменьшая скорость передвижения щетки, можно увели-

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

чивать или уменьшать ускорение поезда. Перемещение щетки можно автоматизировать путем применения регулируемого привода.

Основные правила управления тяговыми двигателями постоянного тока допускают езду на реостатных положениях только в периоды разгона поезда. Нормальная езда должна происходить на ходовых положениях. Таковыми следует считать безреостатные положения или с полным полем, или с полем ослабленным. Наличие нескольких ходовых положений дает возможность различным образом регулировать скорость при различных условиях движения. Так, например, если один и тот же поезд должен курсировать в городе и за чертой города, то целесообразно в городе применять ходовые положения при полном поле, а за городом — при ослабленном. Можно также исходить и из комбинации последовательно-параллельных соединений.

Способы включения отдельных секций реостатов. Схемы включения отдельных ступеней реостатов выполняются в различных формах. Идея таких схем заключается в стремлении по возможности уменьшить число отдельных мест контактов и облегчить вес пусковых сопротивлений. На рис. 152 приведены важнейшие способы включения реостатных ступеней. Схемы *a* и *b* дают последовательный способ включения реостатных ступеней. На схеме *a* в рабочем состоянии для выключения сопротивлений все контакты должны быть замкнуты. Через них проходит полный рабочий ток. Такой способ работы нерационален, так как контакты должны нести очень тяжелую работу. Такой же последовательный способ включения реостатов дает и схема *b*, но здесь контакты работают по очереди, и длительную нагрузку несет только контакт 5. Схема *c* дает параллельное включение отдельных ступеней. Контакты здесь работают по очереди, но большим ее недостатком являются тяжелые реостаты, так как для каждой ступени приходится иметь свои особые сопротивления. Способ включения *d* является последовательно-параллельным. Как показывает приведенная на рисунке таблица, для тех же манипуляций, что и в предыдущих схемах, здесь требуется меньше контактов и меньше отдельных ступеней реостатов. На практике наибольшим распространением пользуется схема *b*, применяемая, главным образом, для трамвайных вагонов, и схема *d*, находящая себе применение в железнодорожных вагонах и электровозах.

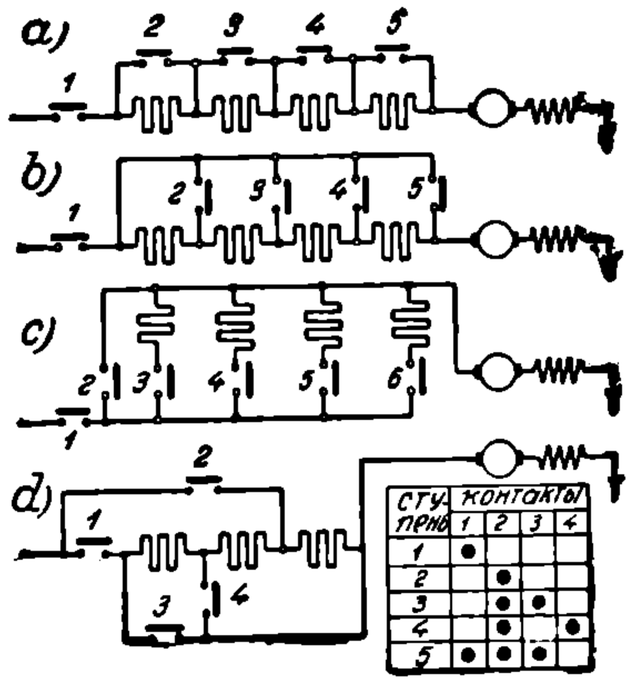


Рис. 152. Схемы включений отдельных ступеней пусковых сопротивлений.

Необходимо отметить, что при переходе от одной ступени реостатов к следующей не допускается разрыв цепи. Поэтому в моменты таких переходов, прежде чем выключить ступень предыдущую, например, по схеме *c* контакт 4, сначала включают ступень последующую (3) и только после этого отсоединяют пройденную ступень (4).

Типы реостатов. Реостаты, применяемые в настоящее время для пуска в ход тяговых двигателей, выполняются в виде или пластинчатых, или проволочных, или в виде ленточных с намоткой ленты на ребро на изоляторные стержни. Материалом для первого типа служат чугун, ферроманган, сплав чугуна с алюминием и железо с цементированными поверхностями. Отдельные пластины надеваются обычно на стержни с фарфоровыми втулками и изолируются друг от друга миканитовыми или азбестовыми шайбами и плотно стягиваются натяжными гайками.

Проволочные пусковые реостаты преимущественно выполняются из реотана, константана и резистана. Удельное сопротивление этой группы металлов около 0,5Ω и удельный вес порядка 8,3. Допустимая температура нагрева для них определяется в 300° С. Значительно более высокими качествами обладает хром-никель. Удельное его сопротивление порядка 1,1Ω. Допустимая температура нагрева его доходит до 1000° С; в условиях эксплоатации она может быть принята в 600° С. Широкому применению хромо-никелевых реостатов препятствует большая их стоимость. Проволочные реостаты выполняются в виде спиралей длиною порядка 2 m. Монтируются они на фарфоровых изоляторах и крепятся на металлических каркасах.

Пластинчатые сопротивления помещаются обычно под кузовом. Иногда они располагаются под сидениями вагонов и используются для отопления. В этом случае целесообразно иметь два комплекта реостатов: один под кузовом для теплого периода года, второй — под сидениями для холодного времени. Реостаты в мощных

НВ УРУНТ (ДІТ)

электровозах представляют собою большую тяжесть. Для облегчения их в некоторых случаях прибегают к искусственному охлаждению, с прогонкой через них значительных масс воздуха. Например, для одного из типов электровозов дороги Milano-Varese при мощности локомотива в 980 PS через реостаты прогоняется около 150 m³/min воздуха при давлении 45 mm ВС. Что касается размещения проволочных и ленточных реостатов, то они почти всегда располагаются на крыше вагонов, что обеспечивает хорошее естественное их охлаждение.

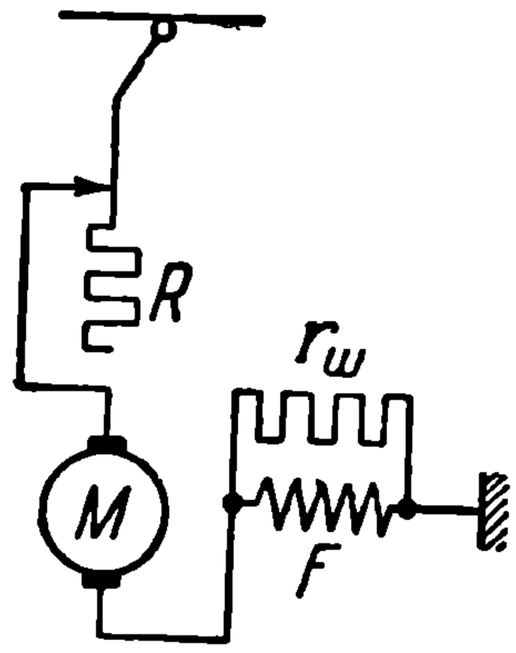


Рис. 153. Схема включения тягового двигателя при шунтировке обмотки возбуждения.

Несколько особо стоит вопрос о реостатах для шунтировки обмоток возбуждения двигателей. К ним приходится прибегать, когда для ослабления поля по условиям конструкции нежелательно секционировать обмотки возбуждения. Осложнения при применении реостатов, шунтирующих обмотки возбуждения, возникают в периоды мгновенного размыкания и замыкания цепи двигателей, случающихся, например, при отскакивании токоприемников от провода или при проходе секционных делителей без выключения цепи двигателей. Особенно опасны моменты мгновенного включения тока, когда в цепь не введены основные пусковые реостаты (рис. 153). В процессе неустановившихся режимов ток, подчиняясь законам изменения переменных токов, встречает в обмотке возбуждения большое реактивное сопротивление и устремляется, главным образом, по шунтирующему сопротивлению. В результате получается эффект, близкий к тому, который возникает при включении машины на сеть без возбуждения. Он приводит часто к появлению недопустимо больших токов и образованию кругового огня. Для предотвращения этого эффекта довольно часто прибегают в настоящее время к шунтам, которые, помимо омического сопротивления, обладают и сопротивлением реактивным. Порядок последнего берется близким к соответствующему сопротивлению обмотки возбуждения, по большей части несколько меньше последней. Подобные реактивные сопротивления выполняются в виде катушек самоиндукции с замкнутым железным контуром. Железо для сердечников таких шунтов нормально применяется листовое трансформаторное. Для уменьшения влияния насыщения в железном остове индуктивного шунта делается иногда небольшое междужелезное пространство. Результат действия реактивных шунтов можно видеть из кривых, приводимых Adler'ом (рис. 154). На кривых даны токи неустановившегося режима в функции от времени. Кривые I и II относятся к омическому шунту, а III и IV — к реактивному.

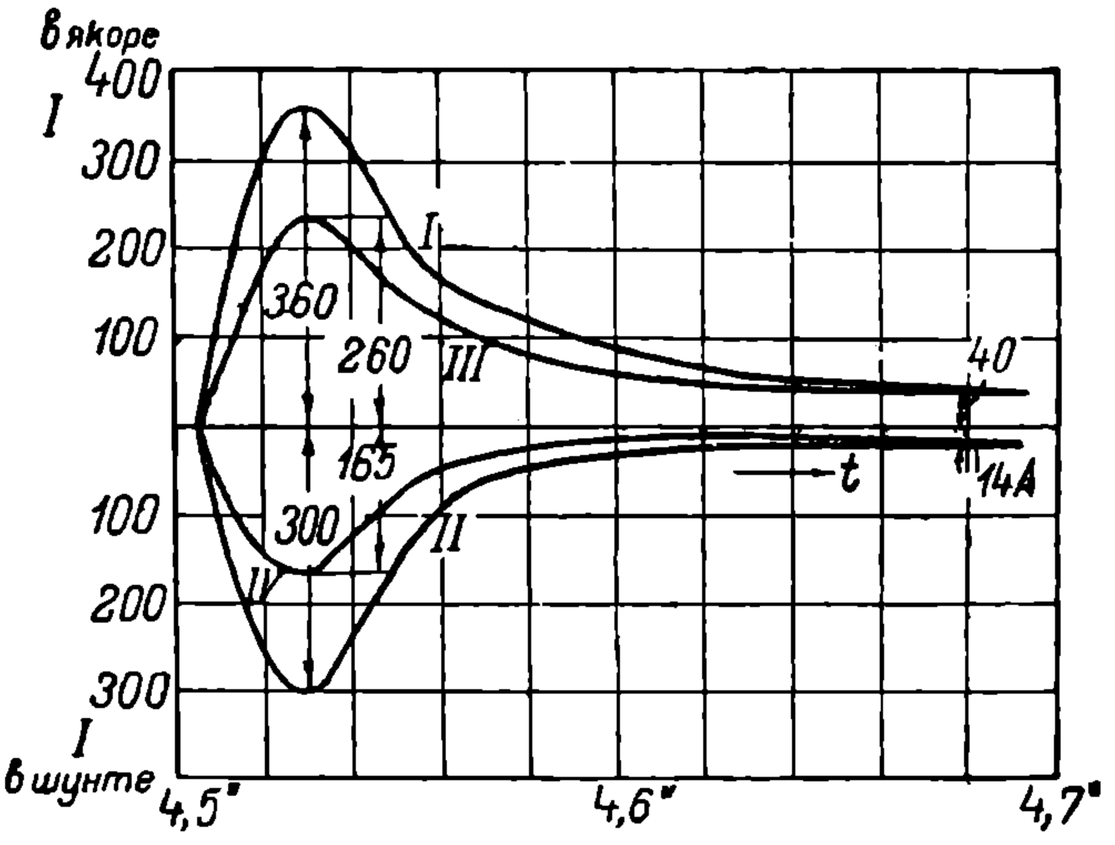


Рис. 154. Кривые изменения тока при шунтировке тягового двигателя омическим и реактивным шунтом.

Особые случаи расчета реостатов. Разобранные схемы включения реостатов и их расчеты в некоторых случаях, правда очень редких, строятся на иных началах. Так, например, иногда предпочитают рассчитывать ступени реостатов, исходя не из постоянства интервалов между I_{max} и I_{min}, а кладя в основу равные промежутки времени работы на каждой ступени. При таком способе управления удается облегчить работу и подготовку вожатых-машинистов, так как при первом способе ведение поезда сильно затруднено необходимостью работать на отдельных ступенях с различными интервалами времени.

Кроме указанного способа, иногда при пуске исходят из требования брать от сети один и тот же пусковой ток. Такой способ, применяемый, например, на пригородных железных дорогах Берлина, влечет за собою по мере увеличения числа

НБ УДУНТ (ДІІТ)

параллельных цепей двигателей соответственное уменьшение тока в каждой цепи. Работа здесь идет с изменяющимися силами тяги, а следовательно, и ускорением, но дает преимущества в отношении понижения перегрузок сети, что особенно важно при мощных поездах.

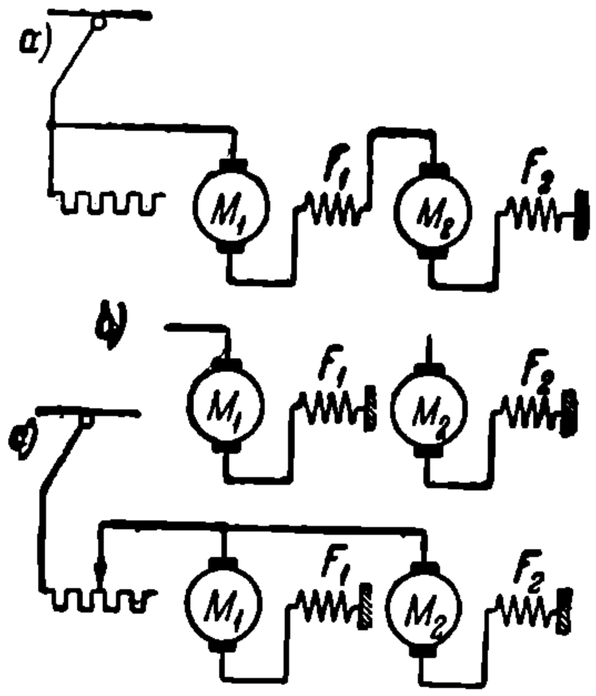


Рис. 155. Метод перехода с последовательного на параллельное включение двигателей путем разрыва главной цепи.

Способы перехода с последовательного включения двигателей на параллельное. Важный момент при управлении двигателями постоянного тока представляют периоды перехода от последовательного включения двигателей к включению параллельному. Здесь существует три способа. Первый способ основывается на разрыве цепи (рис. 155). Ввиду осложнений, связанных с разрывом цепи под током, этот метод теперь не применяется, за исключением небольших индустриальных локомотивов. Второй метод (рис. 156) имеет в своей основе короткое замыкание одного из двигателей. Недостаток его в том, что в переходный период работает только один двигатель. Третий метод (рис. 157) основан на принципе моста. Здесь все время включены оба двигателя, но зато схема осложняется и требует двух отдельных реостатов. По своим техническим качествам схема моста имеет преимущества. Основное ее достоинство в том, что во время всего переходного режима, как уже указано, работают оба двигателя, благодаря чему сила тяги не ослабляется, и не появляется никаких особых ударов и толчков. Кроме того, при обратном переходе с параллельного соединения на последовательное схема моста принципиально не склонна к перенапряжениям, возникающим, как известно, при разрыве индуктивных цепей. В мостике размыкаются только цепи сопротивлений, являющиеся омическими. При методе же короткого замыкания размыкается цепь отключаемого двигателя, обладающая большой индуктивностью. Если к моменту ее разрыва ток в ней еще не упал до нуля, то может появиться перенапряжение на разрываемых контактах.

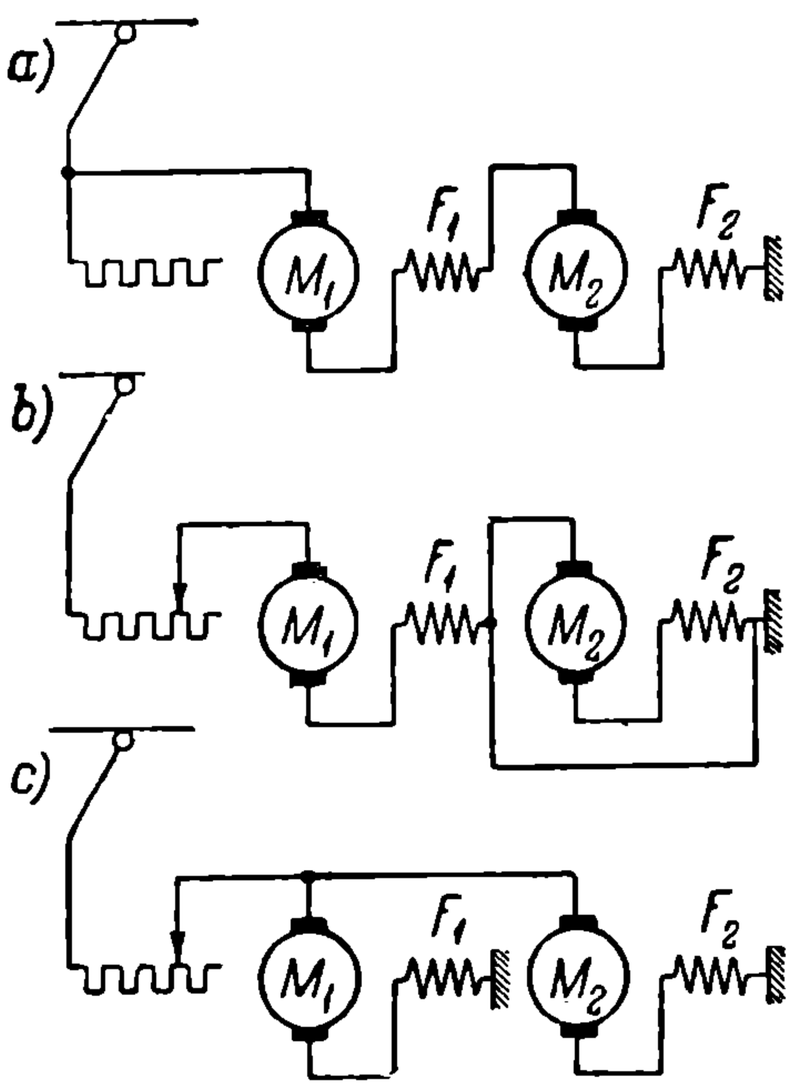


Рис. 156. Метод перехода с последовательного включения на параллельное путем короткого замыкания одного из двигателей.

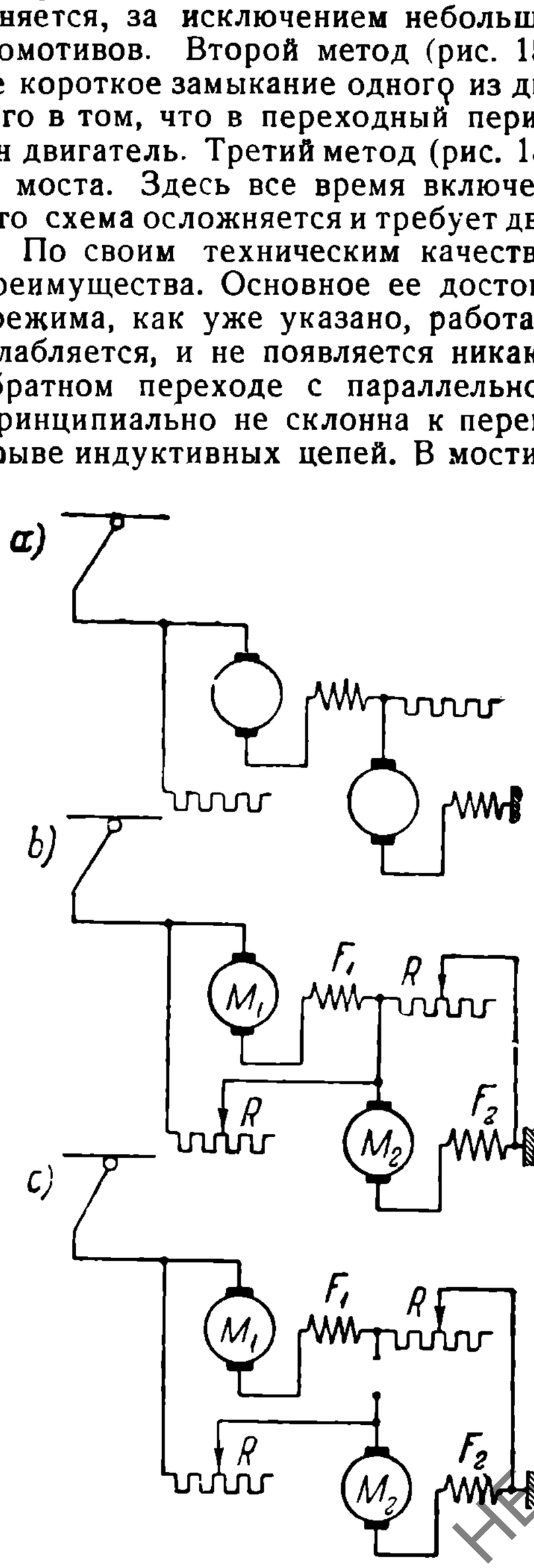


Рис. 157. Метод перехода с последовательного включения на параллельное методом мостика.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

При методе короткого замыкания иногда вместо проводника (рис. 156) шунтируют отключаемый двигатель небольшим сопротивлением. При таком условии через двигатель, пока он шунтирован, проходит ток, зависящий от сопротивления шунта. Практичéски этот ток в отношении поддержания силы тяги имеет ничтожное значение. Между тем включение сопротивления осложняет схему и ухудшает процесс разрыва цепи отключаемого двигателя.

Некоторые осложнения приходится преодолевать при трехступенчатом пуске тяговых двигателей (рис. 147 и 149). В общем, методы перехода остаются прежними, но увеличивается число цепей и аппаратов. Наиболее просто переход здесь можно осуществить коротким замыканием, причем накоротко можно замыкать как один двигатель, так, если нужно, и группу двигателей. Например, в схеме рис. 149 при переходе от положения *a* к положению *b* следует замкнуть накоротко группу из трех двигателей. Особое замечание нужно сделать к схеме рис. 149. При осуществлении по ней перехода с положения *b* на положение *c* выгоднее замыкать накоротко двигатели 1 и 6 или 3 и 4, чем 2 и 6 или 3 и 5, так как при таком способе уменьшается количество мест размыкания цепи.

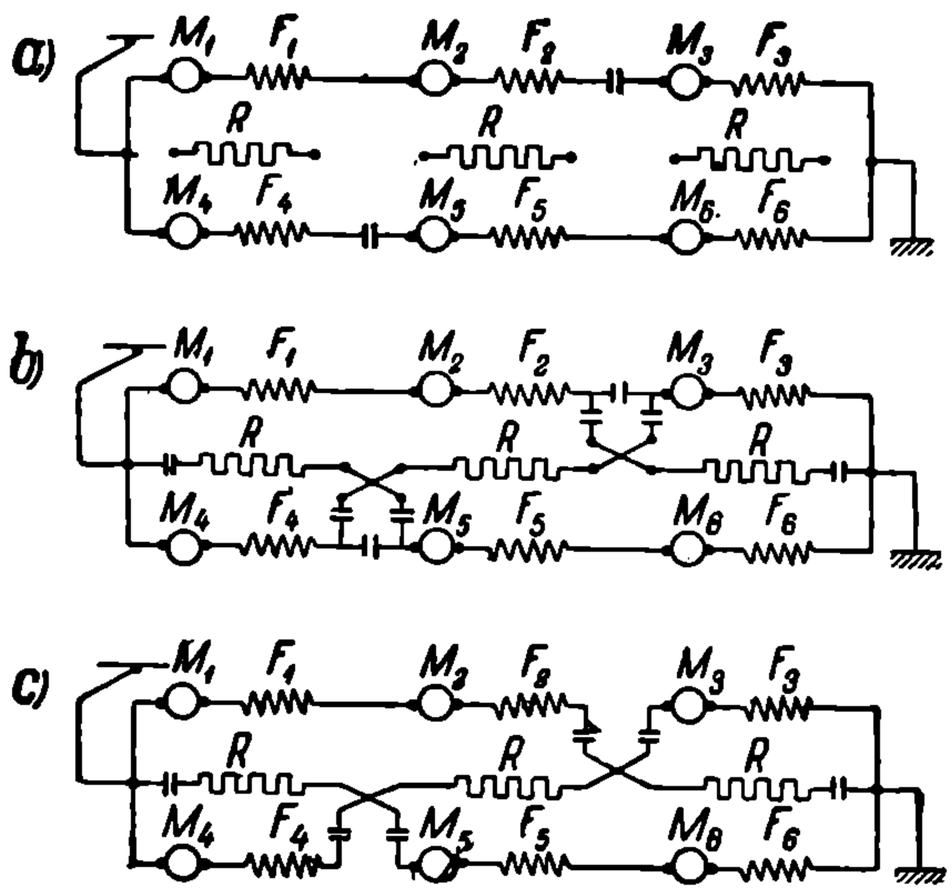


Рис. 158. Метод перехода путем мостика при шести двигателях.

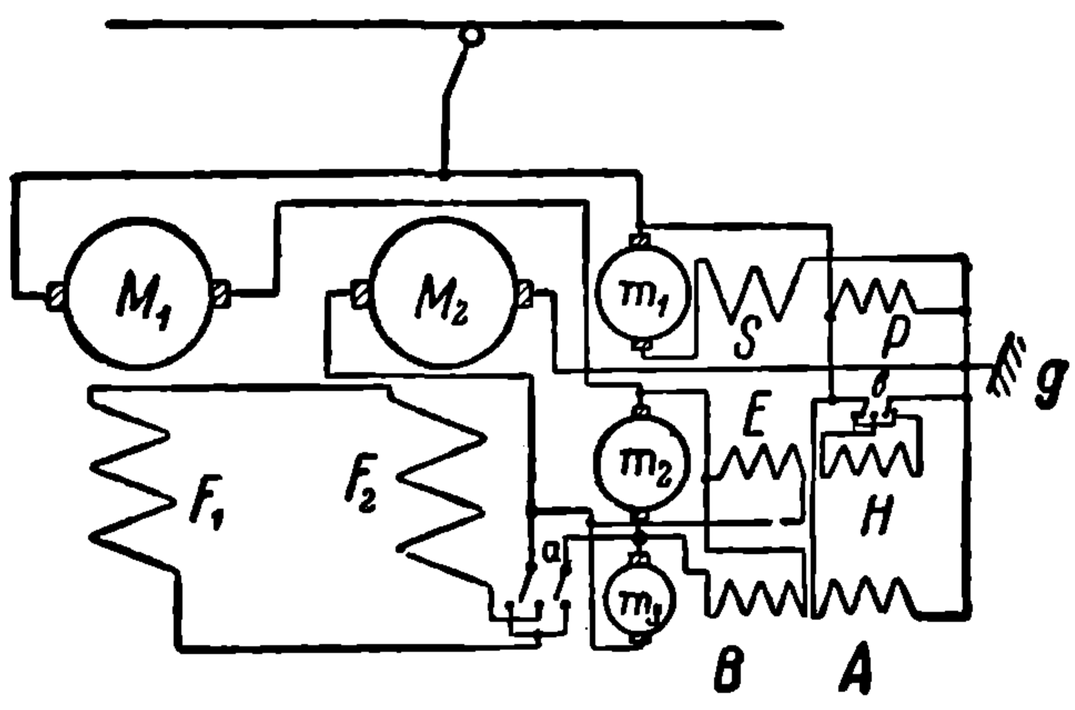


Рис. 159. Метод управления поездом по системе парижского метрополитена.

При трехступенчатом пуске применение мостика требует трех раздельных реостатов. Для схем рис. 147 мостик применяется принципиально так же, как при двух двигателях. Для схемы рис. 149 переход с положения *a* на положение *b* также происходит обычным порядком; отличие только в том, что вместо одного двигателя входят в группу три, последовательно соединенные. Сложнее переход от положения *b* на положение *c*. Схема его построена на рис. 158.

Из рассмотренных методов перехода в трамвайных условиях движения нормально применяют систему короткого замыкания. На моторных вагонах четырехосного типа, особенно вагонах метрополитена и пригородных ж. д., а также на четырехосных электровозах чаще встречается схема мостика. При шести осях и шести двигателях применяется система короткого замыкания или шунтировка сопротивлением. Метод мостика здесь пока не получает применения, повидимому, из-за его сложности.

Способы безреостатного разгона поезда. Схема парижского метрополитена. Как выяснено выше, в пусковых реостатах происходят значительные потери энергии. Стремление их устранить привело к предложению специальных схем безреостатного разгона поезда. Одной из первых таких является система STAR, испытанная на парижском метрополитене (рис. 159). Эта схема содержит два тяговых двигателя M_1 и M_2 Кроме того, имеется вспомогательный агрегат, состоящий из компаундной машины m_1, шунтовой с диференциальным возбуждением, m_2 и небольшой третьей машины m_3 также с диференциальным включением обмоток. Последняя машина работает только при рекуперации энергии, так как данная схема имеет назначением осуществлять не только безреостатный пуск, но и рекуперативное торможение, о чем будет сказано в соответствующей главе дальше.

ЛБ УДУНТ (ДІІТ)

При разгоне поезда система работает со следующими режимами. Перед пуском, когда главная цепь двигателей разомкнута, машина m_1 работает двигателем, а m_2 генератором в холостую. В начальной стадии пуска, когда главная цепь замкнута, машина m_2 работает двигателем, а машина m_1—генератором, перерабатывая ту энергию, которую потребляет m_2. Соотношение постоянных цепей и обмоток подбирается, так, что через главные двигатели проходит нормальный пусковой ток, причем преобладающее влияние на возбуждение машины m_2 оказывает обмотка E. В этой стадии работы почти все напряжение сети компенсируется противоэлектродвижущей силой машины m_2. По прохождении рабочего тока через тяговые двигатели поезд трогается.

В следующий этап работы по мере нарастания скорости движения напряжение сети начинает перераспределяться. Двигатели начинают развивать свои противоэлектродвижущие силы и брать на себя соответствующие части напряжения. Одновременно с этим напряжение на зажимах машины m_2 начинает уменьшаться, что вызывает, в свою очередь, понижение эффекта обмотки E, а следовательно, и уменьшение общего результирующего потока. В дальнейшем наступает момент, когда э.д.с. машины m_2 равна нулю, причем в якоре машины m_2 получается э.д.с. только от падения напряжения. В этот момент $AW_E = AW_H$. При дальнейшем возрастании скорости поезда знак э.д.с. машины m_2 меняется, и она начинает действовать совместно с напряжением сети, увеличивая напряжение на зажимах M_1 и M_2. Этот период работы идет до тех пор, пока напряжение на зажимах каждого из главных двигателей не поднимется до нормального. После этого вспомогательный агрегат можно выключить и перевести тяговые двигатели на параллельное включение. В этой системе весьма ценно то, что путем подбора постоянных пусковой ток в течение всего пускового периода можно автоматически получать близко постоянным.

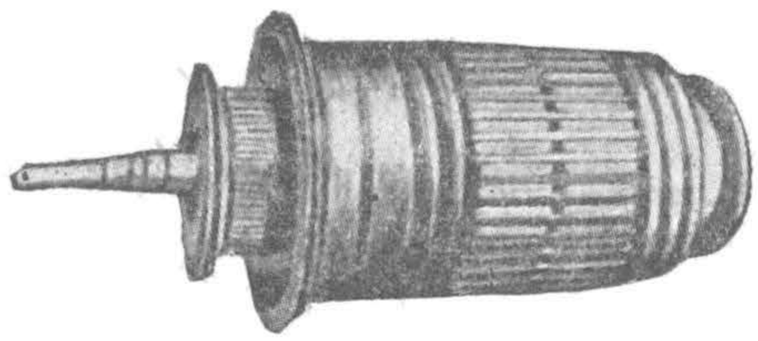


Рис. 160. Якорь динамотора Somaini.

Способ динамотора. Другой способ безреостатного пуска заключается в применении особых пусковых машин, называемых динамоторами. Из таких схем в настоящее время наиболее разработана итальянская система Somaini, которая так же, как и предыдущая, одновременно преследует и цель рекуперации энергии (Л. 119). В основе ее, как отмечено, лежит пусковой динамотор. Он представляет собою одноякорную машину с несколькими, нормально тремя, независимыми обмотками и тремя коллекторами (рис. 160). Проводники всех трех обмоток уложены в одних и тех же впадинах. Возбуждение динамотора компаундное. Имеются одна общая шунтовая обмотка возбуждения и, кроме того, у каждой якорной обмотки своя собственная, небольшая, последовательная. Количество витков в каждой последовательной обмотке пропорционально числу якорных проводов.

Обмотки динамотора могут работать на режиме двигателя и на режиме генератора. Комбинации обмоток могут быть различны, но непременно должно быть соблюдаемо равенство якорных ампервитков частей двигателя и генератора. При указанных условиях, благодаря тому, что витки обеих частей находятся в одних и тех

ТАБЛИЦА 31.

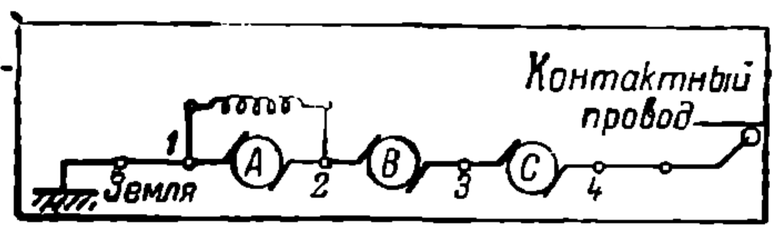
Характеристика мощностей динамотора Somaini.

Ступени	Мощности частей динамотора			Общая мощность
	A	*B*	*C*	
Первая .	$^1/_4U$ и $^3/_4I_n$	$^1/_2U$ и $^1/_4I_n$	$^1/_4U$ и $^1/_4I_n$	$^3/_8UI_n$
Вторая .	$^1/_4U$ и $^1/_2I_n$	$^1/_2U$ и $^1/_2I_n$	$^1/_4U$ и $^1/_2I_n$	$^1/_2UI_n$
Третья .	$^1/_4U$ и $^1/_4I_n$	$^1/_2U$ и $^1/_4I_n$	$^1/_4U$ и $^3/_4I_n$	$^3/_8UI_n$
Последовательное соединение . .	0 и 0	0 и 0	0 и 0	0
Пятая . .	$^1/_4U$ и $^1/_2I_n$	$^1/_2U$ и $^1/_4I_n$	$^1/_4U$ и $^1/_2I_n$	$^1/_2UI_n$
Параллельное соединение.	0 и 0	0 и 0	0 и 0	0

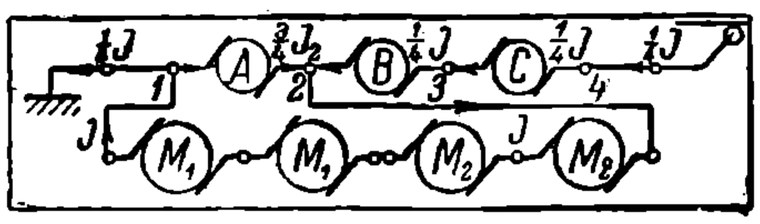
НБ УДУНТ (ДІІТ)

же впадинах, а токи в них будут прямо противоположны, получается взаимная компенсация реакций отдельных обмоток. Помимо этого, и коммутация получается весьма совершенная, так как поля, окружающие впадины, взаимно компенсируются, благодаря чему искровая э.д.с. практически полностью уничтожается.

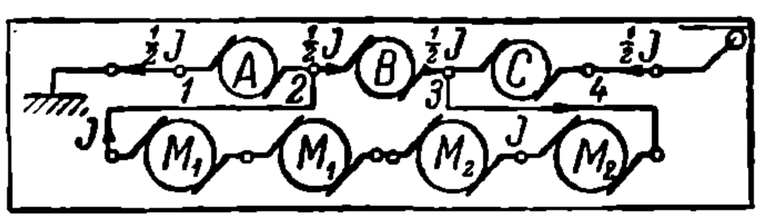
Соединение возбуждения динамотора.



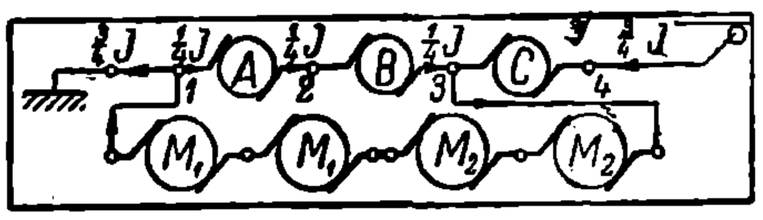
Первая скорость поезда.



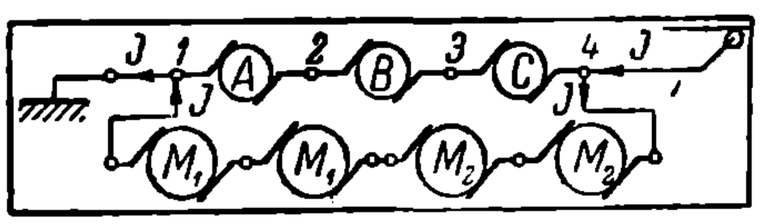
Вторая скорость поезда.



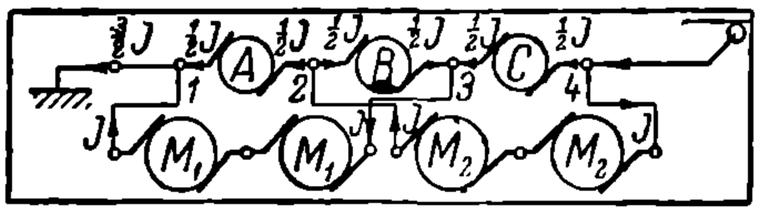
Третья скорость поезда



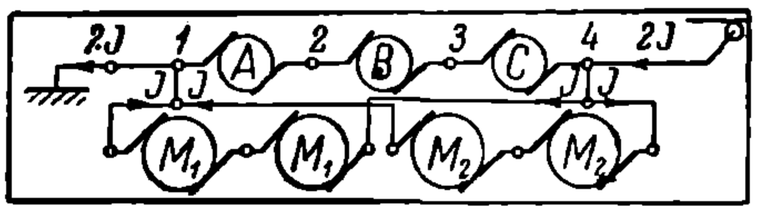
Четвертая скорость поезда.



Пятая скорость поезда.



Шестая скорость поезда.



Соединение динамотора при торможении на реостат.

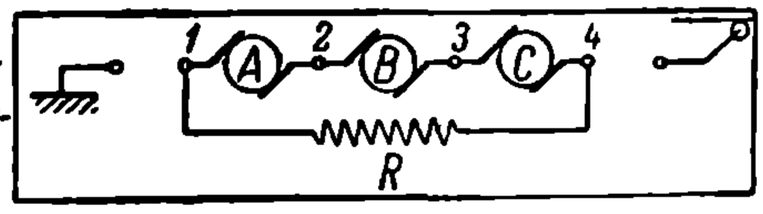


Рис. 161. Поездные положения в системе Somaini.

На рис. 161 приведены основные поездные положения системы Somaini для случая, если AW обмотки B взяты в два раза большими, чем у каждой из обмоток A и C. Нетрудно видеть, что на всех приведенных рабочих положениях AW обмоток, работающих на режиме двигателя, равны AW обмоток, работающим на режиме генератора. Токи, идущие на преодоление собственных потерь динамотора, на схеме не учитываются. В таблице 31 сконцентрированы нагрузки и напряжения, приходящиеся при пуске на каждую из трех обмоток динамотора. Следует указать, что рассматриваемая схема в ее чистом виде, при трех обмотках, вследствие малого количества ступеней дает значительные толчки тока при переходе от предыдущей ступени к последующей. Для уменьшения таких толчков Somaini в моменты перехода на новую ступень включает небольшие добавочные сопротивления, которые находятся в цепи короткий промежуток времени, и автоматически выключается, как только ток в цепи понижается до нормального. Выключение тока производится особым реле, замыкающим накоротко цепь сопротивлений.

Оригинально в рассматриваемой схеме решается вопрос о тяговом двигателе. В данном случае применяется двигатель со смешанным возбуждением, работающий при тяге по системе компаунд и при рекуперации по системе противокомпаунд. Питание шунтовой обмотки производится от одного из коллекторов динамотора. Ток в этой обмотке регулируется одноступенчатым реостатом. Для уменьшения указанных бросков тока в моменты включения новой ступени при тяге используется наибольшее возбуждение, которое затем уменьшается, как только скорость достигает нормальной величины данной ступени. Так как в рассматриваемом случае напряжение у шунтовой обмотки невелико, то она может быть взята с небольшим количеством витков и большими сечениями проводов, что устраняет одно из самых существенных возражений против применения компаундных двигателей для тяги. Для ускорения замедления динамотора, когда его нужно быстро остановить, его включают на тормозные сопротивления, как это показано на последней позиции рис. 161.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

Применение безреостатных систем разгона поезда в среднем дает около 5—8% экономии в расходе общей энергии, потребной для движения. Процент этот невелик, но совмещение безреостатного пуска с рекуперацией, как будет указано ниже, настолько увеличивает этот процент, что данные системы могут быть вполне рентабельны.

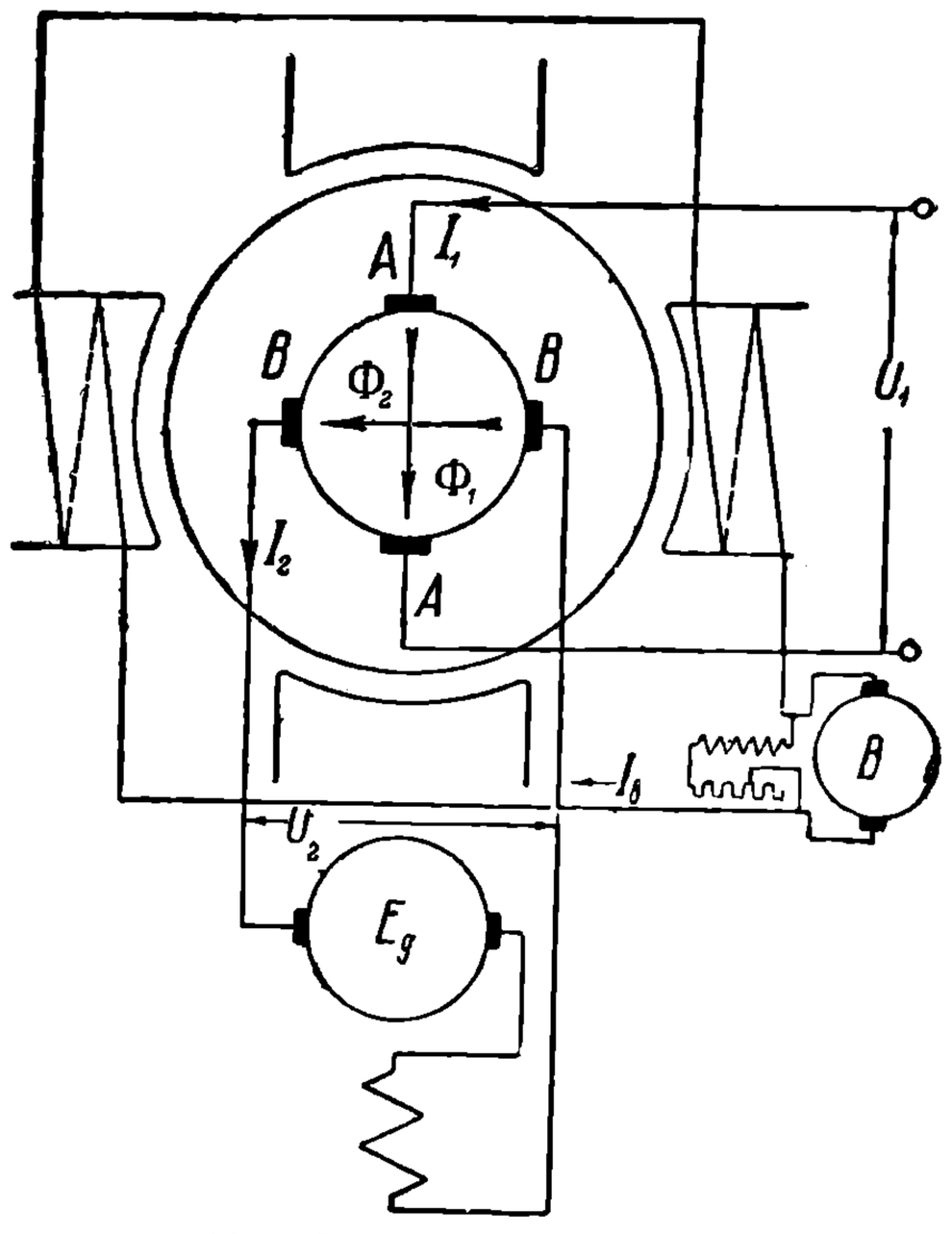


Рис. 162. Схема включения метадина.

Безреостатный разгон поезда с помощью метадина. При разборе безреостатного пуска и разгона поезда заслуживает внимание идея применения для этих целей машины, получившей название метадина. Последний представляет собою машину постоянного тока, имеющую обычную якорную обмотку и удвоенное число полюсов. В простейшем случае полюса могут быть без всяких обмоток. Система снабжается двумя парами щеток (рис. 162). К щеткам *AA* подводится ток от сети I_1, создающий поток Φ_1. От щеток *BB* отводится к тяговым двигателям ток I_2, производящий поток Φ_2. Во вторичной цепи метадина напряжение определяется выражением:

$$U_2 = E_2 - I_2 r.$$

При условии постоянства оборотов метадина и пренебрежения насыщением:

$$U_2 = k_1 \Phi_1 - I_2 r \cong k I_1 - I_2 r. \qquad (172\text{-a})$$

В первичной цепи напряжение подчиняется зависимости:

$$U_1 = E_1 + I_1 r$$

или при тех же условиях:

$$U_1 = k_1 \Phi_2 + I_1 r \cong k I_2 + I_1 r. \qquad (172\text{-b})$$

Из последнего уравнения видно, что всякое изменение тока I_2 вызывает противодействующее изменение тока I_1. Если предположить, что ток I_2 уменьшится, то увеличится ток I_1, что повлечет за собою возрастание U_2 с последующим увеличением I_2. Таким образом режим метадина устойчив и стремится сохранить постоянство тока вторичной цепи.

При работе метадина на тяговые двигатели в случае разгона поезда напряжение вторичной его цепи должно подчиняться соотношению:

$$U_2 = E_g + I_2 r_g = k v I_2 + I_2 r_g, \qquad (173)$$

где E_g — противоэлектродвижущая сила тягового двигателя, а r_g — сопротивление его обмоток.

При увеличении скорости поезда пусковой ток I_2 будет стремиться падать, но уменьшение его будет вызывать возрастание тока I_1, а следовательно, и U_2. Увеличение же U_2 будет иметь следствием последующее возрастание I_2. Таким образом, система будет иметь тенденцию к осуществлению разгона при автоматическом поддержании постоянства пускового тока.

Однако, сама регулировка работы метадина в его простейшем виде для практических целей является недостаточной. В данном случае не представляется возможным воздействовать на ток I_2. Для того, чтобы этот ток при работе метадина на тяговые двигатели можно было менять в заданных пределах, необходимо поместить на полюса преобразователя добавочную обмотку (рис. 162). Обмотка эта, называемая управляющей, должна питаться от особого возбудителя *B*. Она должна дать поток, направленный против потока Φ_2. При уменьшении тока $I_в$, ток I_1, а следовательно, и I_2 будут уменьшаться. При увеличении же его картина получается обратная. Таким образом, путем регулирования тока возбудителя $I_в$ можно изменять

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

ток I_2 по желанию. Можно поддерживать его постоянным, что требуется при разгоне поезда, но можно и изменять соответственно тому, как это имеет место при работе двигателей по автоматической характеристике. Регулировки тока $I_в$ можно автоматизировать.

Для приведения метадина во вращение и поддержания постоянства его скорости необходимо еще иметь добавочный вспомогательный двигатель. Легко видеть, что последний в основе должен покрывать только потери метадина. Это следует, из того, что вращающий момент метадина, создаваемый током I_1, равняется:

$$M_1 = k'_2 I_1 \Phi_2 \cong k_2 I_1 I_2. \quad (174)$$

Вращающий же момент от вторичной цепи:

$$M_2 = k'_2 I_2 \Phi_1 \cong k_2 I_1 I_2. \quad (175)$$

Из равенств (174) и (175) следует, что оба момента равны и в то же время, как нетрудно проследить по схеме, обратны по направлению действия. Следовательно, они взаимно компенсируют друг друга, и при таком условии приводный двигатель должен покрывать только потери в метадине. В случае действия управляющей обмотки картина несколько осложняется. При ее наличии приводному двигателю приходится развивать добавочную мощность для компенсации действия потока этой обмотки на вращающий момент.

Метадин представляет собою машину обратимую. Если тяговые двигатели заставить работать в качестве генераторов, то при соответствующей величине потока Φ_2 э.д.с. метадина E_1 может превышать напряжения сети U_1. Тогда ток I_1 будет отдаваться в сеть. Система будет рекуперировать энергию.

3. Управление поездом при однофазной тяге.

Пусковые трансформаторы и расчет их ступеней. Управление однофазными коллекторными двигателями почти исключительно производится с помощью секционированных трансформаторов. Простейшая схема такого управления приведена на рис. 163.

В основу расчета ступеней трансформаторов кладется та же идея, что и в основу расчета реостатов. Напряжения отдельных секций по условиям плавности разгона должны быть так подобраны, чтобы колебания пускового тока происходили в заранее намеченных пределах от I_{max} до I_{min}. Решить эту задачу применительно к последовательным коллекторным двигателям удобнее всего, если исходить из круговой диаграммы (рис. 53). Последнюю для данных целей можно несколько упростить, положив угол $\alpha = 0$. Метод расчета виден из рис. 164, причем на нем пределы изменения пускового тока определены окружностями I и II, описанными радиусами, равными в масштабе тока I_{max} и I_{min}.

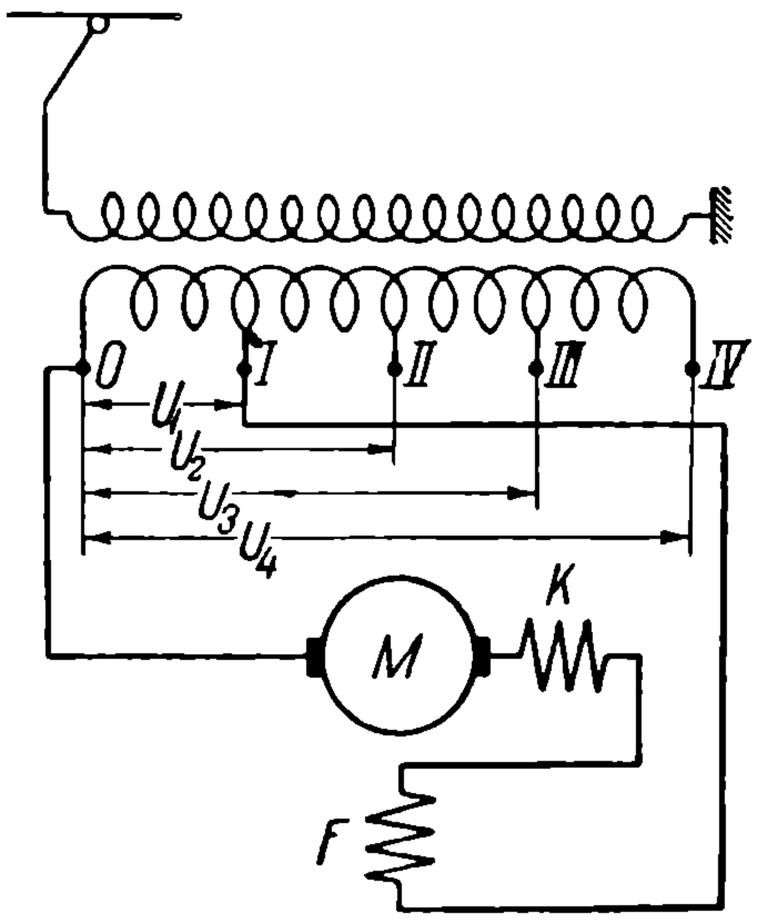


Рис. 163. Схема пуска в ход коллекторного двигателя с помощью секционированного трансформатора.

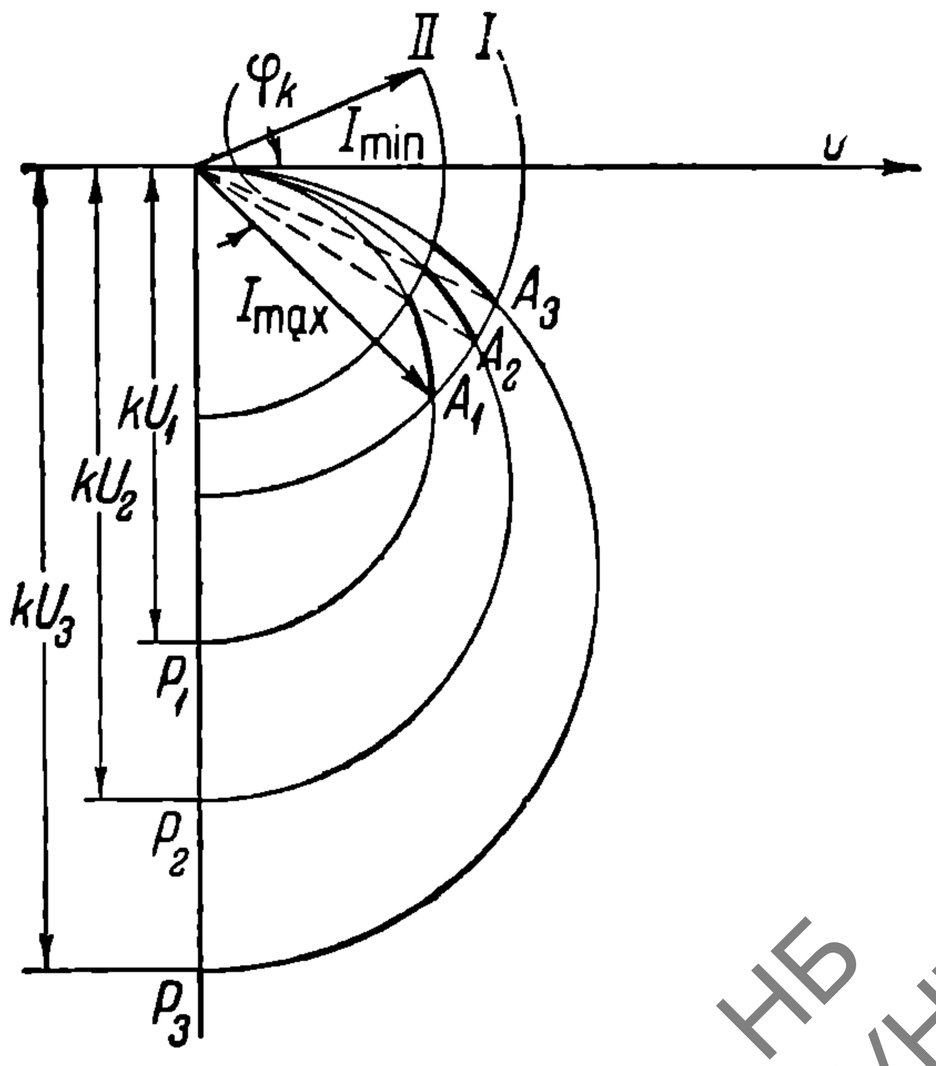


Рис. 164. Диаграмма для определения напряжений ступеней трансформатора.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Первая ступень напряжения U_1 находится из равенства:

$$U_1 = I_{max} z_k, \tag{176}$$

где z_k — полное сопротивление всех обмоток двигателя. Очевидно, что на первом положении управления режим работы двигателя должен итти по круговой диаграмме, построенной для напряжения U_1, причем ток I_{max} должен соответствовать току короткого замыкания машины. Если угол короткого замыкания φ_k дан, то окружность для напряжения U_1 легко строится по вектору I_{max} и условию, что центр ее находится на вертикали P_1P_2. Диаметр этой окружности в определенном масштабе измеряет U_1, так как чем больше U_1, тем выше I_{max}, а следовательно при постоянном φ_k и диаметр.

Начиная с момента трогания поезда, пусковой ток изменяется по построенной окружности, уменьшаясь с возрастанием скорости, причем это уменьшение можно допустить только до пересечения рабочей окружности с предельной окружностью тока I_{min}. После этого необходимо включить следующую ступень и с таким расчетом, чтобы перейти снова на I_{max}. Следовательно, точка A_2 должна соответствовать начальной точке работы машины по новой окружности, определяемой напряжением следующей ступени U_2. Вторая окружность строится по точке A_2 и условию положения центра искомой окружности на той же вертикали. Ясно, что диаметр вновь построенной окружности должен быть пропорционален U_2. Указанное построение продолжается таким же путем, пока не будет получено нормальное напряжение. Числовые значения определяемых ступеней при известной величине U_1 найдутся из выражений:

$$U_1 : U_2 : U_3 : \ldots : U_{n-1} : U_n = \\ = kU_1 : kU_2 : kU_3 : \ldots : kU_{n-1} : kU_n. \tag{177}$$

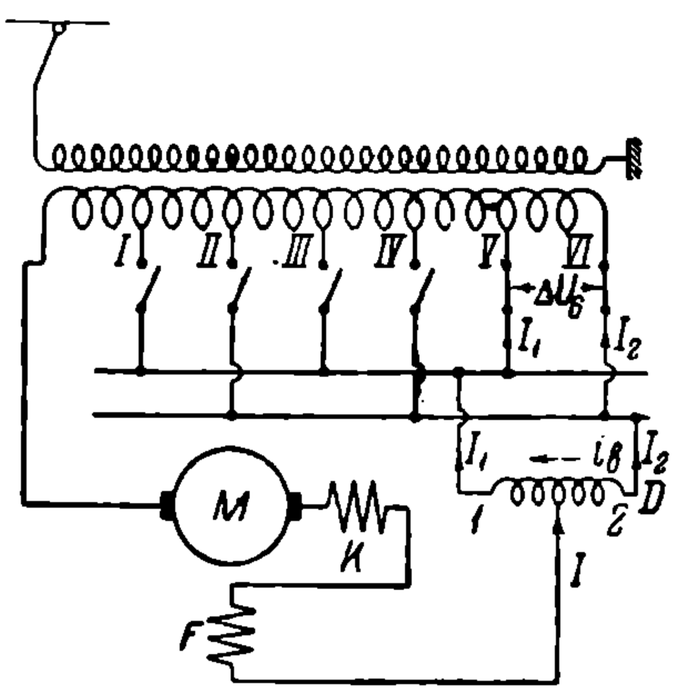


Рис. 165. Схема включения предохранительной катушки при регулировании пуска с помощью секционированных трансформаторов.

Схемы включения пусковых трансформаторов. При применении указанного на рис. 163 способа включения отдельных секций возникают значительные осложнения в моменты перехода от каждой ступени трансформатора к следующей. Этот переход по общему требованию должен производиться без разрыва цепи. При таких условиях в начальные моменты перехода неизбежно оказываются одновременно включенными два соседних контакта, замыкая накоротко соответствующую секцию трансформатора. Например, при переходе со ступени I на II секция трансформатора I—II попадает в короткое замыкание. Для устранения опасных токов коротких замыканий приходится включать в цепь главного тока особое ограничительное сопротивление, чаще всего выполняемое во избежание больших потерь в виде катушки с большой самоиндукцией (рис. 165). Схема осуществляется таким образом, что в период перехода от одной ступени к следующей главный ток проходит только через какую-либо половину катушки. В период же нормальной работы на каждом данном положении общий ток двигателя I распределяется на два тока I_1 и I_2. На рис. 165 такой случай взят при включенных секциях V и VI, причем здесь через i_β обозначен ток намагничения катушки D от приложенного к ней напряжения ΔU_6. Как видно из рисунка, ток I_2 должен быть приблизительно на $2i_\beta$ больше I_1. Преимущество такой схемы в том, что в рабочем положении контакторы, будучи включенными попарно, несут токи приблизительно равные половине общего тока. Последний полностью через каждый из них проходит только в переходный период, длительность которого относительно весьма мала.

Недостатком применения ограничительных катушек является увеличение пусковых потерь и ухудшение пускового $\cos\varphi$. Кроме того, включение и выключение частей катушек сопровождаются нежелательным колебанием напряжения у зажимов двигателя, так как общий самоиндукционный эффект катушки меняется в зависимости от того, работает ли одна половина катушки или обе. При переходе от двухстороннего действия катушки к одностороннему индуктивность ее будет сильно возрастать, что будет вызывать уменьшение напряжения на зажимах двигателей.

НТБ УГУНТ (ДІІТ)

В тех случаях, когда желательно по конструктивным соображениям уменьшить число выводных секций трансформатора и в то же время иметь нужное число пусковых ступеней, можно прибегать к схемам типа рис. 166. Здесь взяты три катушки, исполняющие в данном случае роль делителей напряжения. В зависимости от способа включения этих катушек и их питания э.д.с., ими производимые, могут складываться с напряжением каждой данной секции трансформатора или из него вычитаться. Напряжение первой секции на схеме принято равным U_1. Процесс включения идет таким образом: сначала включаются контакты 1—2—7—9. К двигателям подводится напряжение $U_1 + \frac{1}{8}\Delta U$. В следующем положении включаются контакты 1—2—8—10. Подводится напряжение $U_1 + \frac{3}{8}\Delta U$. Затем включаются контакты 1—2—7—10. Напряжение получается $U_1 + \frac{5}{8}\Delta U$. Наконец берутся контакты 1—2—8—9. Напряжение у двигателей получается $U_1 + \frac{7}{8}\Delta U$. После этого выключается контакт 1, и включается 3. Дальше картина повторяется. Разобранная схема включений показывает, что прибавка напряжений каждый раз равняется четвертой части напряжения каждой секции.

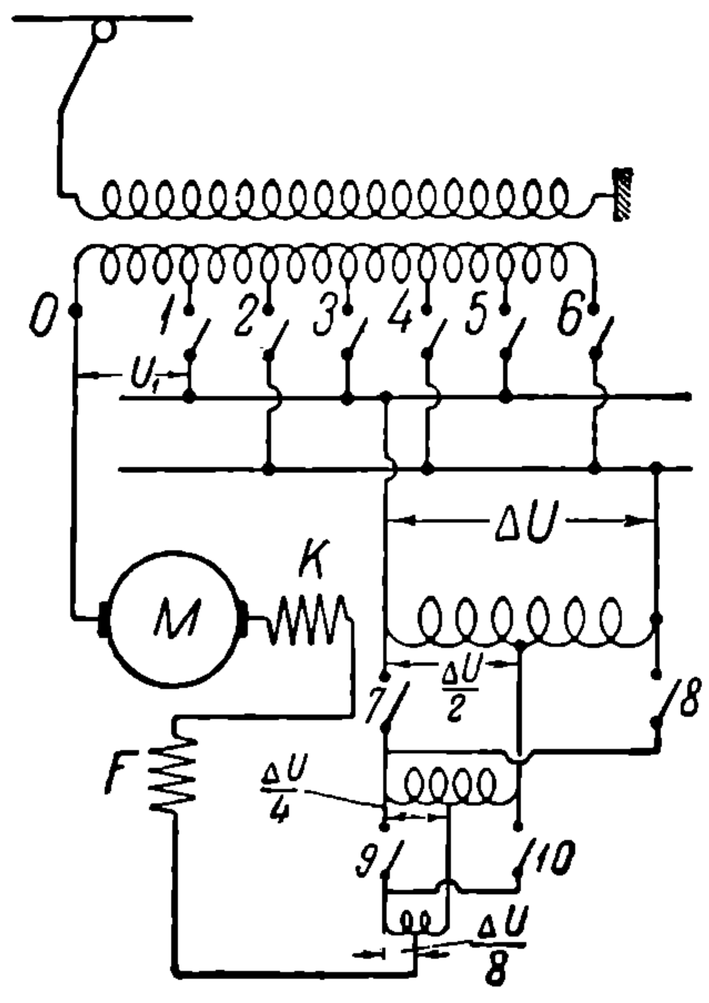


Рис. 166, Схема пуска в ход коллекторных однофазных двигателей путем применения делителей напряжения.

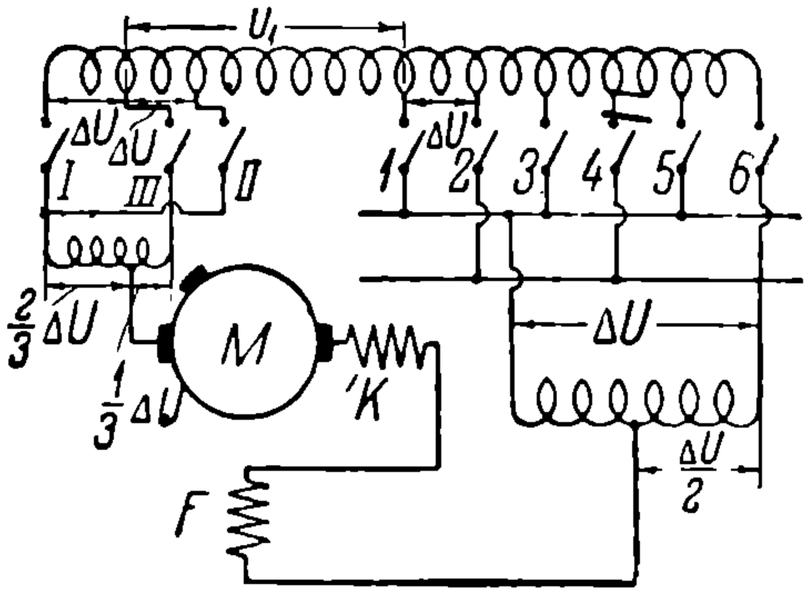


Рис. 167. Схема пуска в ход коллекторных однофазных двигателей с помощью введения в пусковую цепь добавочного напряжения.

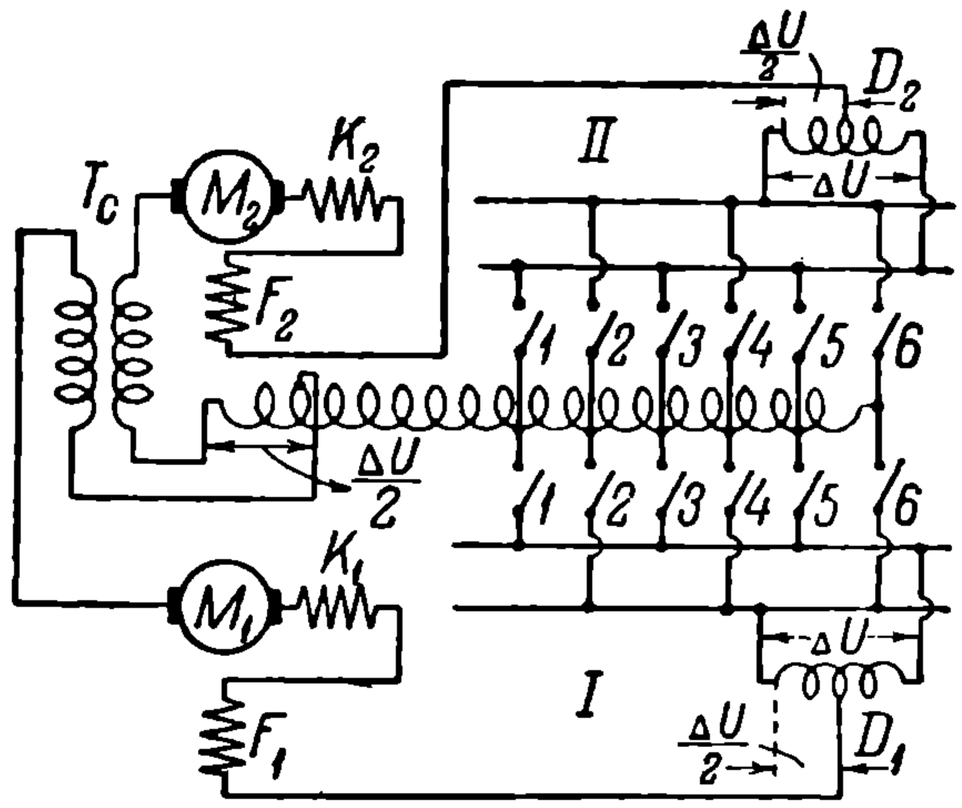


Рис. 168. Комбинированная система пуска при двух параллельно работающих коллекторных однофазных двигателях.

На рис. 167 приведена схема с добавочными напряжениями от главного трансформатора, преследующая ту же цель — уменьшение числа секций трансформатора. Добавочные напряжения здесь включаются или в направлении обратном главному напряжению, или совсем выключаются, или присоединяются к главному напряжению в одном с ним направлении. При включенных контактах 1—2—II—III напряжение у двигателей равно $U_1 + \frac{1}{2}\Delta U - \frac{1}{3}\Delta U$. При включенных контактах 1—2—III оно равно $U_1 + \frac{1}{2}\Delta U$ и, наконец, при включении 1—2—I—III напряжение поднимается до $U_1 + \frac{1}{2}\Delta U + \frac{1}{3}\Delta U$. Как мы видим, в пределах каждой секции трансформатора получаются три градации напряжений с разностью в $\frac{1}{3}\Delta U$.

Полезно обратить внимание на схему рис. 168, применяющуюся иногда при двух параллельных группах тяговых двигателей. Добавочное напряжение здесь введено в цепь II, так что напряжение на зажимах двигателей в общем случае получается

НБ УГУНТ (ДІІТ)

различное. Если, например, у I и II цепей включены контакты 1 и 2, то напряжение в цепи II будет выше на $\frac{\Delta U}{2}$. Если затем в цепи I вместо контакта 1 включить 3, напряжения в обеих цепях сделаются равными. Процесс включения отдельных цепей ведется таким образом, что напряжение в обеих группах двигателей получается или одинаковым, или у второй группы на $\frac{1}{2}\Delta U$ больше, чем у первой. Делается это с целью уменьшить броски нагрузок в сеть, так как в рассматриваемой схеме при переходе с одной ступени на следующую увеличение нагрузки определяется только одной группой электродвигателей, именно той, у которой увеличивается напряжение. Осложнением в этой схеме является периодически неравномерное распределение нагрузок на каждую группу двигателей. Для понижения такой неравномерности прибегают к применению уравнительного трансформатора T_c. Это трансформатор сериесного типа, и потому главное назначение его — выравнивать токи в обеих группах двигателей. Monath (Л. 112) показал, что выравниваются не только токи, но и частично напряжения, так что процесс работы, обеспечивая уменьшение бросков тока, и в отношении неравномерности нагрузок протекает достаточно удовлетворительно. Недостаток этой схемы — в значительном, хотя и очень кратковременном, понижении напряжения у двигателей в самые первые моменты включения новых ступеней, что вызывается некоторым запаздыванием в изменении тока одной обмотки трансформатора по отношению к другой.

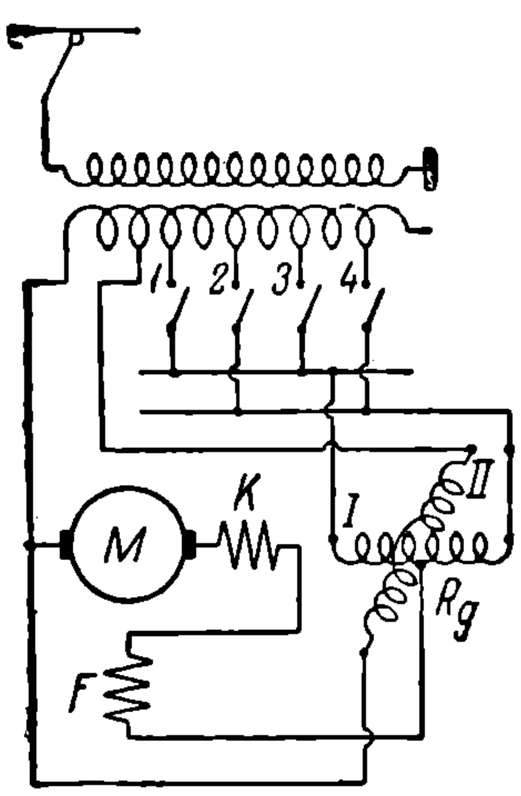


Рис. 169. Схема пуска коллекторных однофазных двигателей с помощью индукционного регулятора.

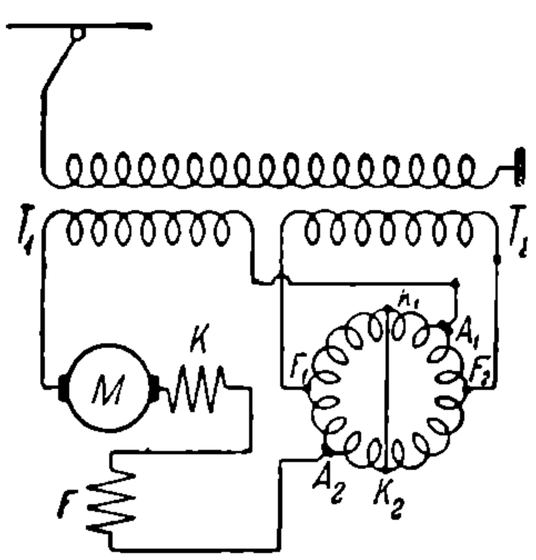


Рис. 170. Схема пуска коллекторных однофазных двигателей с помощью коллекторного регулятора.

Следующий тип пусковых схем однофазных двигателей составляют системы, построенные на применении различного рода вращающихся регуляторов напряжения. Из них наибольшее практическое значение имеет индукционный регулятор. В первых схемах с индукционными регуляторами были попытки использовать последние для полного регулирования напряжения от нуля до нормальной величины, как это, например, было сделано в однофазных электровозах Южно-французских ж. д. Однако, при таких условиях регуляторы получаются очень громоздкими, и теперь они применяются для регулирования напряжения в пределах только отдельных секций трансформатора (рис. 169). Как видно из схемы, регулирование напряжения производится за счет э. д. с., индуктируемой обмоткой II в обмотке I. Путем вращения обмотки II индуктируемую ею э. д. с. можно менять не только по величине, но и по направлению. Регулятор одновременно исполняет и функции ограничительной катушки.

Индукционный регулятор, представляющий собою механизм с междужелезным пространством, значительно ухудшает $\cos\varphi$ системы. В целях улучшения последнего Déri предложил коллекторный регулятор (рис. 170). Данный механизм состоит из кольцеобразного сердечника, вокруг которого положена обмотка, выведенная к коллектору. В точки F_1 и F_2 подводится напряжение от одной половины трансформатора T_2, а вторая T_1 вместе со щетками находится в цепи двигателей. В зависимости от положения щеток напряжение на них меняется. При совпадении линии щеток с осью F_1 F_2 оно получает наибольшее значение, а при положении перпендикулярном оно равно нулю. Напряжение на щетках может действовать или навстречу напряжению основного трансформатора T_1, или совместно с ним. Зависит это от направления поворота щеток. Схема Déri дает возможность при равных напряжениях трансформаторов T_1 и T_2 производить регулирование напряжения от нуля до удвоенной их величины. Для улучшения $\cos\varphi$ регулятора обмотка в перпендикулярном направлении к оси F_1 F_2 схвачена проводом K_1 K_2. В результате по оси K_1K_2 получается компенсационная обмотка, которая компенсирует самоиндукционный эффект, производимый в обмотке регулятора главным рабочим током.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Из приведенных схем управления однофазными двигателями наибольшее распространение имеют простейшие, с наличием одной или нескольких делительных катушек. Схемы с индукционными и коллекторными регуляторами применяются значительно реже

Преимущество трансформаторного пуска двигателей в ход заключается в отсутствии потерь в реостатах. Однако, совершенно безболезненно пусковой период не проходит и при трансформаторах, так как при разгоне система работает с пониженными $\cos\varphi$ и к. п. д.

Очень удобны трансформаторы и с точки зрения обеспечения какого угодно большого числа ходовых ступеней, так как, по существу, каждая ступень трансформатора является ходовой ступенью, хотя здесь необходимо рекомендовать пользоваться в качестве ходовых положений только теми ступенями, при которых к. п. д. двигателей получается приемлемым. Недостаток трансформаторов — значительное утяжеление и удорожание подвижного состава.

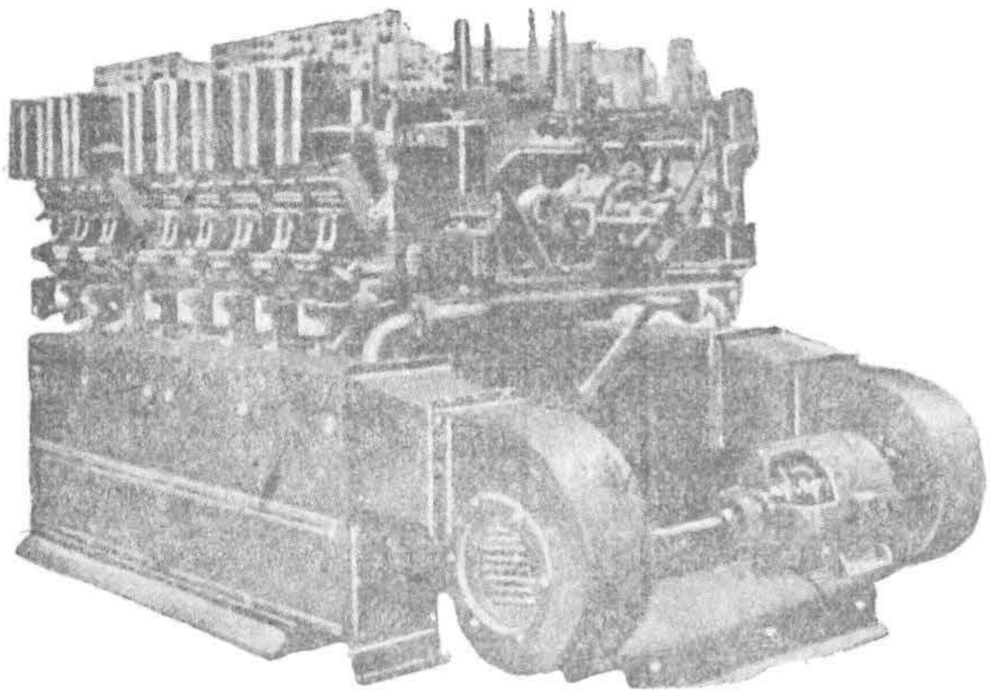


Рис. 171. Трансформатор стержневого типа с приспособлением для охлаждения масла.

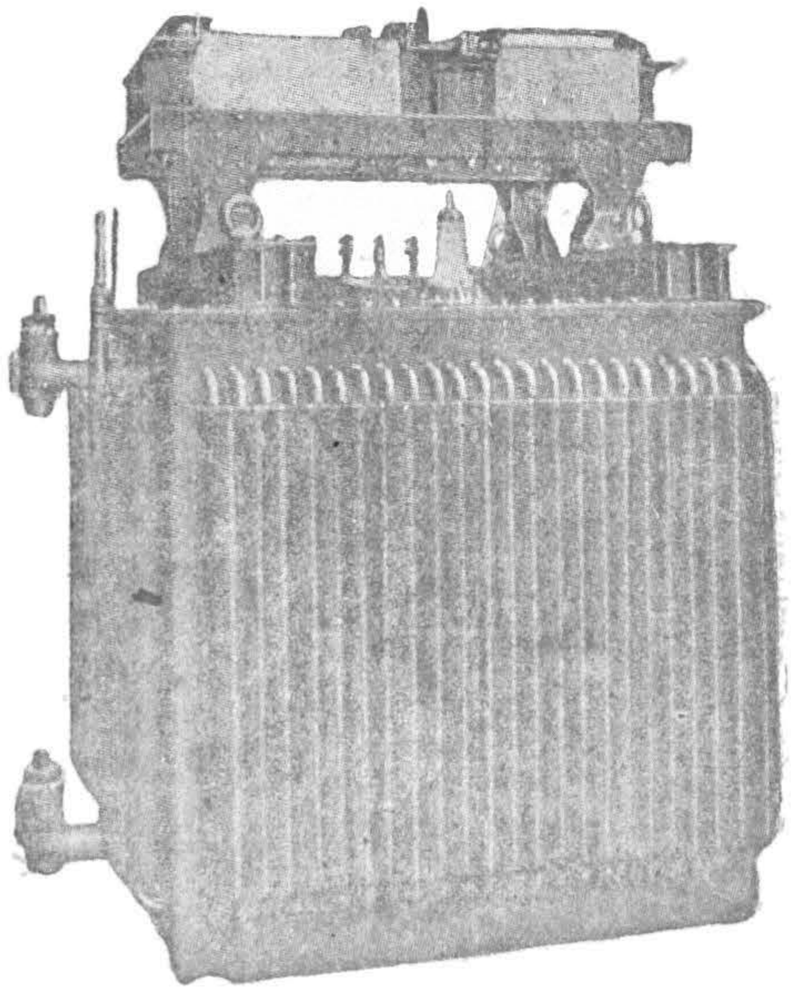


Рис. 172. Трансформатор броневого типа.

Конструктивные формы трансформаторов. Трансформаторы, применяемые в тяге, в основных частях своей конструкции не отличаются от стационарных. В тяге находят себе применение как стержневые типы, так и броневые (рис. 171 и 172). При больших мощностях, выше 1500 kW, предпочитают брать первый тип, так как он, имея несколько более растянутую форму, легче умещается в электровозе, располагаясь своей длинной стороной по его длине.

В отношении обмоток также нет установившихся норм. Применяются обмотки и цилиндрические и дисковые. Следует обратить внимание на защиту первых витков высокого напряжения от пробоя в связи с атмосферными воздействиями: процентов восемь — десять всех витков высокого напряжения обычно выделяется в особую обмотку с повышенной изоляцией. Запас берется чаще всего четырехкратный по отношению к нормальному рабочему напряжению.

Очень сложными в конструктивном отношении получаются выходные зажимы низкого напряжения. При большом количестве отдельных секций и очень высоких рабочих токах выводы занимают много места, что сильно осложняет конструкцию.

Важным вопросом при конструировании тяговых трансформаторов является вопрос об их охлаждении. Здесь также нет единства взглядов. В Америке применяются почти исключительно трансформаторы с воздушным охлаждением. В Европе же до последнего времени преобладали типы с охлаждением масляным. При воздушном охлаждении вентиляционный воздух особым вентилятором прогоняется через внутренние части трансформатора, охлаждая как обмотки, так и железо. Для охлаждения особенно удобны дисковые обмотки. По условиям интенсивности охлаждения желательно направление воздушного потока в трансформаторе иметь прямоточным без загибов.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Сложнее обстоит вопрос с трансформаторами масляными. В первых конструкциях охлаждение масла шло только за счет охлаждения трансформаторного кожуха. Этот тип применяется теперь преимущественно в трансформаторах с мощностью ниже 1 000 kW. В новейших же конструкциях мощных трансформаторов, как общее правило, осуществляется циркуляция масла, прогоняемого специальными масляными насосами через особые охладительные радиаторы. Последние делаются двух типов. Первый выполняется в виде труб большой поверхности, выносимых на внешние поверхности кузова электровоза и охлаждаемых естественным встречным потоком внешнего воздуха. Второй базируется на специальном радиаторе, помещенном внутри трансформатора и охлаждаемом специальными вентиляторами. В последнем случае поверхность радиатора может быть в четыре-пять раз меньше, чем в случае предыдущем.

Для охлаждения трансформаторов требуется значительное количество воздуха. Так, например, для трансформатора электровоза государственных германских ж. д. типа 1—4А—1 мощностью в 2500 kW при чистом воздушном охлаждении прогоняется около 380 m^3/min при давлении в 75 mm ВС. Для другого электровоза с масляно-воздушным охлаждением примерно той же мощности взято 300 m^3/min при 70 mm ВС, при условии работы масляного насоса на 600 l/min. В последнем случае требуются мощности для вентилятора около 4,5 и для насоса около 1,5 kW. Расход энергии на вентиляцию составляет около 1—1,5% от всей энергии, потребляемой на движение.

Какой из типов охлаждения трансформаторов следует считать более целесообразным, пока еще не представляется возможным определенно сказать. Преимущества масляных трансформаторов — более надежная изоляция и бóльшая способность к перегрузкам, так как масло дает значительное увеличение теплоемкости всего трансформатора. Однако, масляные трансформаторы тяжелее и сложнее по конструкции. Примером может служить трансформатор в 1 650 kVA, который, по данным Bergmann'a, при воздушном охлаждении весит всего около 8,5 t, а при масляном 10,5 t. Кроме того, масляные трансформаторы представляют некоторую опасность в отношении взрыва масла. Как уже было указано, американская практика предпочитает воздушные трансформаторы. В Европе преобладают масляные. Сторонником воздушных трансформаторов в Европе являлась фирма Bergmann'a. Результаты эксплоатации воздушных трансформаторов оказались настолько удачными, что германские ж. д. в своих электровозах последних типов начинают применять воздушные трансформаторы в значительно большем количестве, чем раньше. Соотношение мощностей трансформаторов KW_∞ и KW_h нормально держится около 0,8 ($KW_\infty = 0{,}8\, KW_h$).

4. Управление поездом при трехфазной тяге.

Основные положения. В основу рассмотрения вопроса о разгоне поезда при трехфазной тяге следует положить выражение вращающего момента многофазных асинхронных двигателей (52) и (53). Из сопоставления этих выражений видно, что на момент вращения машины в сильнейшей степени влияет первичное напряжение. Понижение его вызывает уменьшение потока и, как следствие этого, при данном токе I_2 уменьшение момента. Если процесс разгона идет при пониженном первичном напряжении, то единственный способ получения заданного момента — это увеличение рабочего тока I_2. Чем меньшее подводится напряжение, тем больше приходится перегружать машину током, что, конечно, крайне нежелательно с точки зрения как нагрева самой машины, так и перегрузки сети. Ввиду этого методы пуска при понижении первичного напряжения с помощью трансформаторов, не говоря уже о реостатах, для трехфазных двигателей крайне нежелательны, и к ним можно рекомендовать прибегать только в крайних случаях. Практика трехфазной тяги вполне подтверждает указанную точку зрения.

При пуске в ход асинхронных двигателей возникает вопрос, как при полном напряжении сети ограничить величины пусковых токов, держа их в нормальных пределах. В данном случае естественный путь — включение сопротивлений в цепь ротора. Это дает возможность при данном первичном напряжении понижать I_2, а следовательно и I_1. То же выражение (52) указывает, что сопротивление, вводимое в ротор, должно быть активным, так как при реактивном произошло бы снижение $\cos(F_2 I_2)$, а следовательно, и момента.

ВГУ УДУНТ (ДІІТ)

Для дальнейшего выяснения вопроса о разгоне поезда при трехфазной тяге целесообразно основное выражение момента вращения изобразить в форме:

$$M = \frac{m_2 I'^2_2 \frac{r'_2}{s}}{9{,}81\omega_1}. \tag{178}$$

Кроме того, для момента полезно иметь в виду выражение его через первичное напряжение. Вывод искомой формулы при допущении $I'_2 = I_1$ можно произвести следующим путем. Из рис. 95 следует:

$$\dot{U} = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}'_2 Z'_{2s} \cong \dot{I}'_2 (Z_1 + Z'_{2s}). \tag{179}$$

Выражая I'_2 через U и подставляя это значение в формулу (178), получаем:

$$M = \frac{m_2 U^2 \frac{r'_2}{s}}{9{,}81\omega_1 \left(r_1 + jx_1 + \frac{r'_2}{s} + jx'_2\right)^2} = \frac{m_2 U^2 \frac{r'_2}{s}}{9{,}81\omega_1 \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2\right]}. \tag{180}$$

Формула (180) показывает, что при данном U вращающий момент зависит от скольжения s. Для каждого двигателя есть определенное значение s, при котором получается наибольшее значение момента. Определить это s можно по общему правилу нахождения maximum'a. Для этого следует продиференцировать выражение для M по скольжению и приравнять первую производную нулю. Это приводит к уравнению:

$$\frac{d\left[s\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + s(x_1 + x_2')^2\right]}{ds'} = 0,$$

откуда

$$s = \pm \frac{r'_2}{\sqrt{r^2_1 + (x_1 + x'_2)^2}}. \tag{181}$$

Знак плюс здесь относится к двигателю, а минус — к генератору. Если желательно иметь наибольшее значение момента при другом s, то этого можно достигнуть изменением r'_2, т. е. включением в цепь ротора соответствующего сопротивления. Для достижения наибольшего момента при трогании двигателя с места, что соответствует $s = 1$, величина добавочного сопротивления в роторе R должна быть подчинена условию:

$$r'_2 + R' = \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}. \tag{182}$$

Расчет пусковых реостатов. В основу расчета кладется требование держать колебания пускового момента в заранее установленных пределах M_{max} и M_{min} при условии поддержания одних и тех же токов I_{2max} и I_{2min}, соответствующих этим моментам. По круговой диаграмме или по характеристикам прежде всего устанавливают токи I_{2max} и I_{2min}, а также скольжения s_{max} и s_{min}, которые соответствуют при нормальных условиях работы машины без включения каких бы то ни было сопротивлений в цепь ротора моментам M_{max} и M_{min}:

$$\left.\begin{aligned} M_{max} &= \frac{m_2 I^2_{2max} r_2}{9{,}81\omega_1 s_{max}} \\ M_{min} &= \frac{m_2 I^2_{2min} r_2}{9{,}81\omega_1 s_{min}} \end{aligned}\right\}. \tag{183}$$

Очевидно, для выполнения требования получать во все время разгона поезда моменты M_{max} и M_{min} при одних и тех же токах I_{2max} и I_{2min} необходимо изменять сопротивления, включаемые в ротор в соответствии с изменением скорости движения поезда, причем последняя будет характеризоваться изменением скольжения.

Для того, чтобы при различных s иметь постоянными моменты M_{max} и M_{min}, необходимо соблюдать условия:

$$\frac{I^2_{2max}(r_2 + R_1)}{s_1 = 1} = \frac{I^2_{2max}(r_2 + R_2)}{s_2} = \cdots\cdots = \frac{I^2_{2max}(r_2 + R_n)}{s_n} = \frac{I^2_{2max} r_2}{s_{max}},$$

$$\frac{I^2_{2min}(r_2 + R_1)}{s_2} = \frac{I^2_{2min}(r_2 + R_2)}{s_3} = \cdots\cdots = \frac{I^2_{2min}(r_2 + R_{n-1})}{s_n} = \frac{I^2_{2min}(r_2 + R_n)}{s_{max}} = \frac{I^2_{2min} r_2}{s_{min}}.$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Здесь s_1 — скольжение в начале работы при первой ступени реостата, s_2 — скольжение в момент перехода с первой ступени на вторую, s_3 — в момент перехода со второй на третью и т. д.

Полученные выражения говорят, что последняя ступень реостата (R_n) выключается при скольжении s_{max}, и что по достижении s_{min} процесс работы уже не будет больше подчиняться заданным колебаниям тока. Из последних уравнений можно получить следующие соотношения:

$$\left.\begin{array}{l|l} s_1 = 1 & r_2 + R_1 = \dfrac{r_2}{s_{max}} \\ s_2 = s_2 & r_2 + R_2 = \dfrac{r_2 s_2}{s_{max}} \\ s_3 = s^2_2 & r_2 + R_3 = \dfrac{r_2 s^2_2}{s_{max}} \\ \ldots\ldots\ldots & \ldots\ldots\ldots \\ s_k = s_2^{k-1} & r_2 + R_k = \dfrac{r_2 s_2{}^{k-}}{s_{max}} \\ \ldots\ldots\ldots & \ldots\ldots\ldots \\ s_n = s_2{}^{n-1} & r_2 + R_n = \dfrac{r_2 s_2{}^{n-1}}{s_{max}} \\ s_{max} = s_2^n & s_{min} = s_2{}^{n+1} \end{array}\right\} \quad (184)$$

Для окончательного установления ступеней реостатов R_1, R_2, $R_3 \ldots R_n$ при данных r_2, s_{max} и s_{min} необходимо определить только s_2 и n.

Величина s_2 определяется из первого и второго столбцов вышеприведенных выражений:

$$s_2 = \frac{s_{min}}{s_{max}}. \quad (185)$$

После этого легко находится и число ступеней n:

$$n = \frac{\lg s_{max}}{\lg s_2} \quad (186)$$

Естественно, что окончательный выбор пусковых реостатов должен быть произведен таким образом, чтобы n получилось целым числом, для чего необходимо надлежащим образом подобрать s_{max} и s_{min}, а следовательно, и соответствующие им токи $I_{2_{max}}$ и $I_{2_{min}}$.

Типы реостатов для трехфазных двигателей. Реостаты, применяемые для управления тяговыми асинхронными двигателями, в большинстве случаев выполняются по типу жидкостных. Металлические реостаты применяются значительно реже. Недостаток их в условиях трехфазной тяги заключается в том, что они обладают некоторым самоиндукционным эффектом, нежелательным с точки зрения рационального пуска, и требуют в условиях трехфазной системы значительного осложнения общей схемы управления. Водяные реостаты лишены самоиндукции и даже имеют небольшую емкость. Кроме того, они дают плавное изменение пусковых сопротивлений и легко допускают автоматизацию регулирования пуска.

В качестве электродов в жидкостных реостатах применяются обычно железные пластины. Жидкостью служит вода с примесью соды (порядка 2%). Сопротивление регулируется путем изменения уровня воды в электродных камерах. Чем выше уровень, тем меньше сопротивление. В последней стадии регулировки электроды замыкаются накоротко. Это можно получить с помощью цилиндра с поршнем, стоящим на уровне, по достижении которого вода нажимает на него, и он замыкает соответствующее реле. Часто вместо таких приспособлений берут поплавки, которые, всплывая до уровня короткого замыкания, производят тот же эффект. Вода прогоняется через электродные камеры с помощью центробежных насосов. В некото-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

рых случаях для усиления интенсивности охлаждения и уменьшения испарения воды применяется циркуляционный процесс с прогонкой ее через особые охладительные камеры Для улучшения охлаждения применяются специальные вентиляторы. Автоматизация изменения сопротивления достигается регулировкой впуска воды в электродные камеры посредством особых реле, управляемых рабочими токами. В некоторых случаях вместо таких реле, применяются реле мощности, так называемые ваттметровые. Работа таких реле зависит как от обмотки тока, так и от обмотки напряжения. Преимущество их в том, что они при пуске могут обеспечить подачу к двигателям требуемую мощность, независимо от колебания напряжения в сети.

Примером жидкостного реостата может служить реостат, применяемый на американской ж. д. Verginian Ry (рис. 173 и 174). Он имеет электродные камеры R, из коих R_1 предназначается для первого двигателя, а R_2 для второго. Водный раствор соды содержится в резервуаре B, откуда он центробежным насосом P прогоняется через промежуточную охладительную камеру D с небольшой градирней K в электродные резервуары R. Для более быстрой конденсации и постоянства концентрации раствора к нему добавляется определенная порция свежей воды, находящейся в резервуаре F с впускным вентилем L. Для наблюдения за уровнем жидкостей имеются водомерные стекла h и f. Каждая электродная камера имеет по шести электродов, соответственно шести контактным кольцам каждого из двигателей, работающих в данном случае с переключением полюсов. По достижении жидкостью уровня, при котором реостаты должны выводиться из цепи, вступает в действие поршень k, приводящий в действие реле, с помощью которого кольца ротора замыкаются накоротко. Для ослабления толчков тока при переходе на полное короткое замыкание между основными электродами на определенной высоте, близкой к короткому замыканию, помещаются металлические пластины. Назначение их — уменьшить расстояние между основными электродами и тем самым по возможности понизить к моменту короткого замыкания переходные сопротивления между ними.

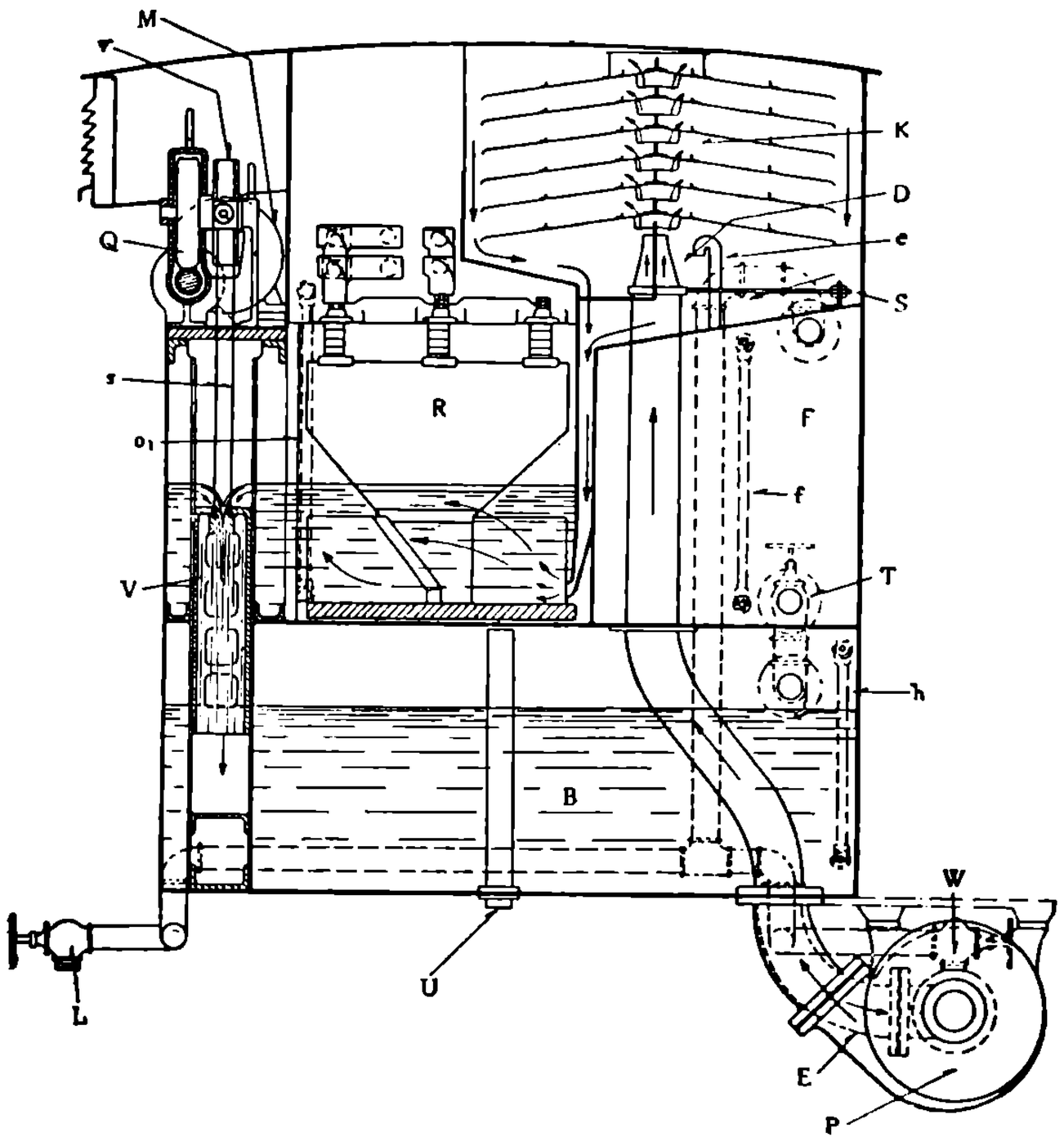


Рис. 173. Водяной реостат элеткровозов дороги V. R. R.

Выпуск жидкости из электродной камеры, а также в случае нужды регулирование ее уровня производятся регулятором V. Основной его частью является цилиндр с отверстиями, перемещающийся по высоте. В нижнем своем положении цилиндр совершенно прекращает доступ воды из R в B. В верхнем же он дает наибольший пропуск. Регулятор приводится в движение от сервомотора M, передающего движение через промежуточную червячную передачу на вал, на котором сидит шкив r, связанный с подвижной частью регулятора ремнем s. Двигатель M имеет тормоз, регулируя который можно давать перемещение или его приостанавливать. С движением двигателя M связывается вращение контактного диска p, назначение которого включать или выключать — в зависимости от положения уровня жидкости — те или другие вспомогательные цепи, заведующие движением двигателя M. Одно из

НБ УДУНТ (ДІІТ)

главных назначений диска *p* — это опускать регулятор вниз после того, как весь электродный бак освободится от жидкости. В случае нужды независимо от регулятора жидкость можно быстро выпустить из камер с помощью особых вентилей.

Жидкостные реостаты, упрощая общую схему управления, обладают, однако, большим весом. Так, например, для электровоза пенсильванских ж. д. мощностью около 3300 kW вес реостата с жидкостью определяется в 5000 kg.

Область применения пусковых трансформаторов. Как было указано, главный недостаток пусковых трансформаторов — очень большие пусковые токи и плохие $\cos\varphi$. В настоящее время пусковые трансформаторы применяются, главным образом, для двигателей с короткозамкнутыми роторами. Применение же трансформаторов для двигателей с фазными роторами имеет место только при высоких напряжениях в контактном проводе. Такие схемы, например, осуществлены на тех линиях итальянских ж. д., где применен трехфазный ток с напряжением в контактном проводе в 10000 V, причем здесь трансформатор не играет роли пускового, а только понижающего. В некоторых случаях трансформаторы приходится применять для осуществления системы Scott'a, когда необходимо перейти от одного числа фаз к другому, о чем было уже сказано при рассмотрении вопроса о переключении числа полюсов.

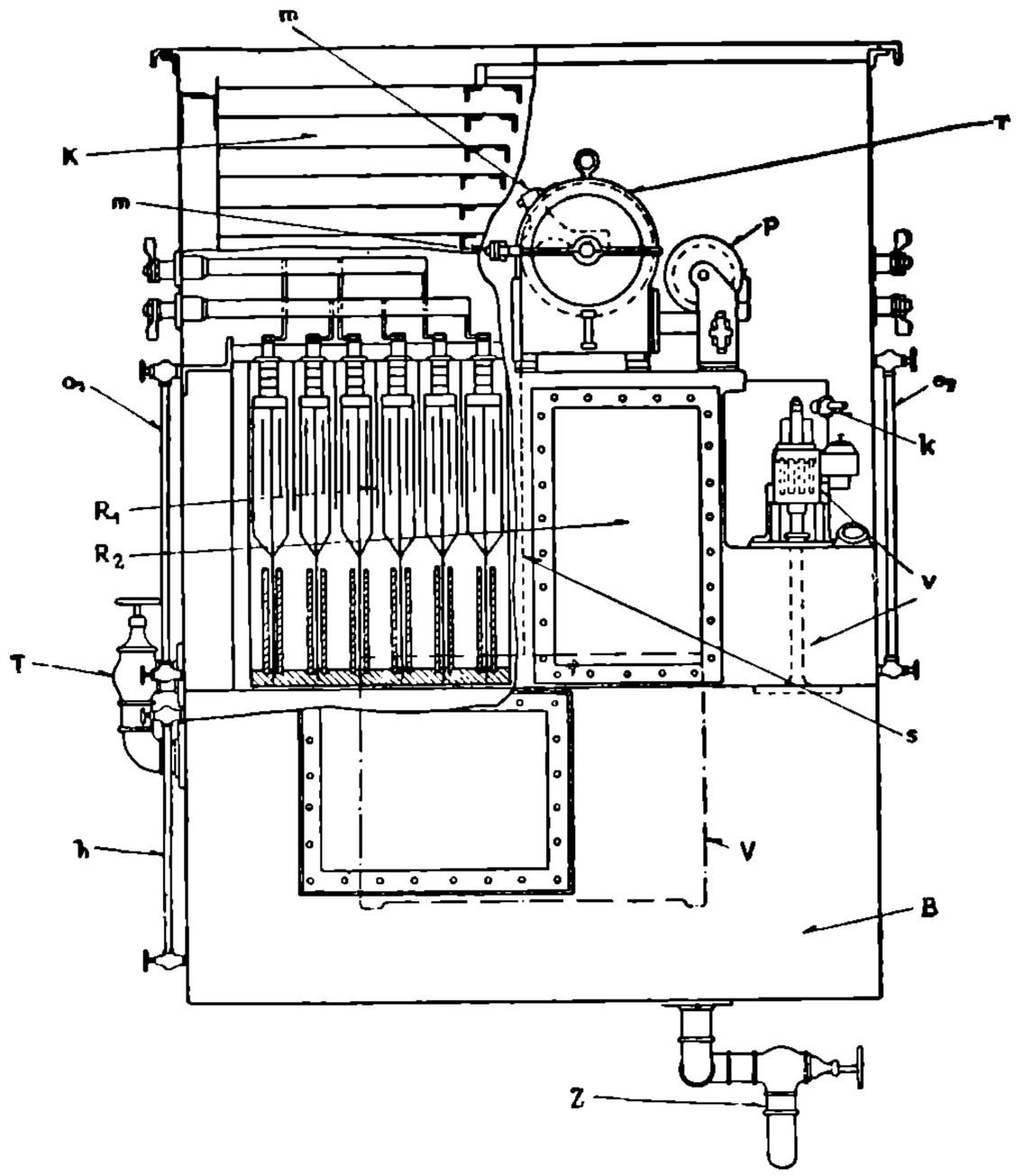


Рис. 174. Водяной реостат во второй проекции, к рис. 173.

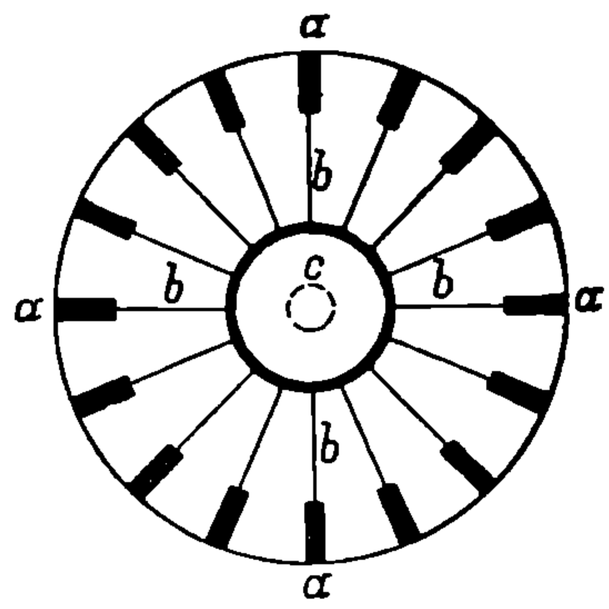


Рис. 175. Схема короткозамкнутого ротора с повышенным сопротивлением при пуске системы BBC.

При изучении вопроса о пуске в ход асинхронных двигателей следует обратить внимание на особенно тяжелые условия этого процесса у короткозамкнутых двигателей. При трансформаторном пуске, в данном случае единственно практически пригодном, неизбежны большие перегрузки как двигателей, так и сети. Интересны в этом отношении попытки уменьшать пусковые токи, искусственно увеличивая на время пуска активное сопротивление роторной обмотки. Подобная конструкция была осуществлена BBC на части симплонских электровозов (рис. 175). Здесь роторные стержни *a* соединяются с замыкающими их накоротко кольцами *c* посредством промежуточных пластин *b*, сделанных из легко нагревающегося и быстро охлаждающегося металла. Пластины выполнены в виде лопастей вентилятора. В холодном состоянии они имеют очень малое сопротивление, в нагретом же оно сильно возрастает. При пуске в ход пластины быстро разогреваются, вызывая увеличение общего сопротивления ротора. Затем по мере возрастания скорости вращения они начинают охлаждаться вследствие усиления действия вентиляции и к моменту достижения нормальной скорости поезда принимают настолько незначительную температуру, что добавочное их сопротивление мало отражается на общем сопротивлении ротора. Однако, ввиду невозможности таким способом полностью разрешить вопрос о плавном пуске, приходится и в разобранной системе

НБ УДУНТ (ДІІТ)

применять пусковые трансформаторы, но уже при гораздо более благоприятных пусковых токах, чем при чисто короткозамкнутых роторах.

Экономика управления трехфазными двигателями. При реостатном пуске в ход и разгоне поезда приходится при трехфазных двигателях считаться с большими потерями в пусковых реостатах. Здесь потери при прочих равных условиях должны получаться даже выше, чем при последовательных двигателях постоянного тока. Объясняется это тем, что для двигателей с шунтовой характеристикой, к числу которых относятся и асинхронные двигатели, скорость, при которой выключаются реостаты, получается близкой к нормальной максимальной скорости движения поезда. Причина этого лежит в незначительном изменении скорости в зависимости от нагрузки. Тогда как для последовательных двигателей соотношение установившейся скорости движения и скорости при выключении реостатов близко к двум, для шунтовых двигателей это отношение порядка 1,1. В качестве схем, применяемых при трехфазной тяге в целях экономии энергии, пользуются каскадным включением, переключением числа полюсов и комбинацией того и другого методов.

Очень большим распространением пользуется в настоящее время каскадное соединение. Роль его, по существу, аналогична последовательному включению двигателей постоянного тока. При двух одинаковых двигателях скорость каскада получается практически в два раза ниже, чем при параллельном включении. При двух одинаковых двигателях или при двух одинаковых группах каскад. дает две ступени пуска, при двух двигателях с разным числом полюсов — три ступени пуска. Однако, последняя система теперь почти совсем не применяется, так как один из двигателей, работая по большей части только в период пуска, плохо используется.

Переключение полюсов дает также возможность уменьшать расход энергии при пуске. Как уже отмечалось выше, изменяют число полюсов наиболее часто в отношении 2:1, но нередко встречаются и отношения 3:2 и 4:3. Вместо двух ступеней при двух обмотках на каждом статоре можно довести число пусковых ступеней до четырех.

В современных итальянских электровозах начинают встречаться схемы, построенные на комбинации каскада с переключением полюсов. При двух одинаковых двигателях с переключением каждого на две комбинации полюсов теоретически получается возможность иметь четыре ступени, но на практике встречаются пока преимущественно трехступенчатые схемы.

Применение каскада и переключения полюсов дает возможность разрешить до известной степени и для трехфазной тяги вопрос о получении ходовых скоростей. Такими скоростями, как и в случае постоянного тока, следует считать скорости, соответствующие всем положениям безреостатной работы двигателей. Однако, при выборе основных ходовых положений здесь необходима известная осмотрительность. Как было уже выяснено, при каскадном включении, а также и при отдельных комбинациях с полюсами использование машины может получиться мало удовлетворительным. Ввиду этого при выборе основных ходовых положений, предназначаемых для длительной езды, необходимо выбирать такие схемы включения двигателей, которые обеспечивают высокие к.п.д. и $\cos\varphi$. Особенно внимательно нужно следить за коэфициентом мощности системы, так как он в условиях трехфазной тяги опускается до очень низких значений, что является одним из существеннейших недостатков этого типа тяги.

II. АППАРАТЫ И СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЕЗДОМ.

1. Основные принципы построения систем управления.

Построение схем управления. Современные системы управления поездом должны удовлетворять целому ряду технических требований. Прежде всего они должны давать возможность осуществлять все манипуляции по включению и выключению двигателей, реостатов и трансформаторов. Должны они также позволять изменять направление движения поезда и отключать отдельные двигатели или целые их группы в случае порчи, а также осуществлять и всякого рода специальные схемы: последовательные, последовательно параллельные, параллельные, каскадные, переключения полюсов, электрического торможения и рекуперации.

Помимо главных цепей, в современных системах управления содержатся в большей или меньшей степени и различного рода цепи вспомогательные. К числу

НВ УДУНТ (ДІІТ)

последних принадлежат цепи освещения, электрического отопления, цепи для обслуживания двигателей вентиляторов, компрессоров и прочих вспомогательных агрегатов.

Всякая современная схема управления поездом должна содержать также защитные цепи и аппараты. Для недопущения опасных токов схема должна быть обязательно снабжена максимальным выключением. В большинстве случаев необходимо иметь и нулевые реле, автоматически выключающие схему при прекращении подачи тока к поезду или даже в случае чрезмерного уменьшения подводимого напряжения. Иногда ставятся и реле предельной величины рабочего напряжения.

Для предохранения от атмосферных влияний системы управления должны быть снабжены защитными отражательными катушками, разрядниками и необходимыми заземлениями.

При изучении систем управления следует различать их по способу приведения в движение главных контактов основных аппаратов, ведающих включением и выключением рабочего тока. Способов этих два: ручной и механизированный. Механизация приводов для включения и выключения токов осуществляется путем применения якорных электромагнитов или специальных небольших электродвигателей,

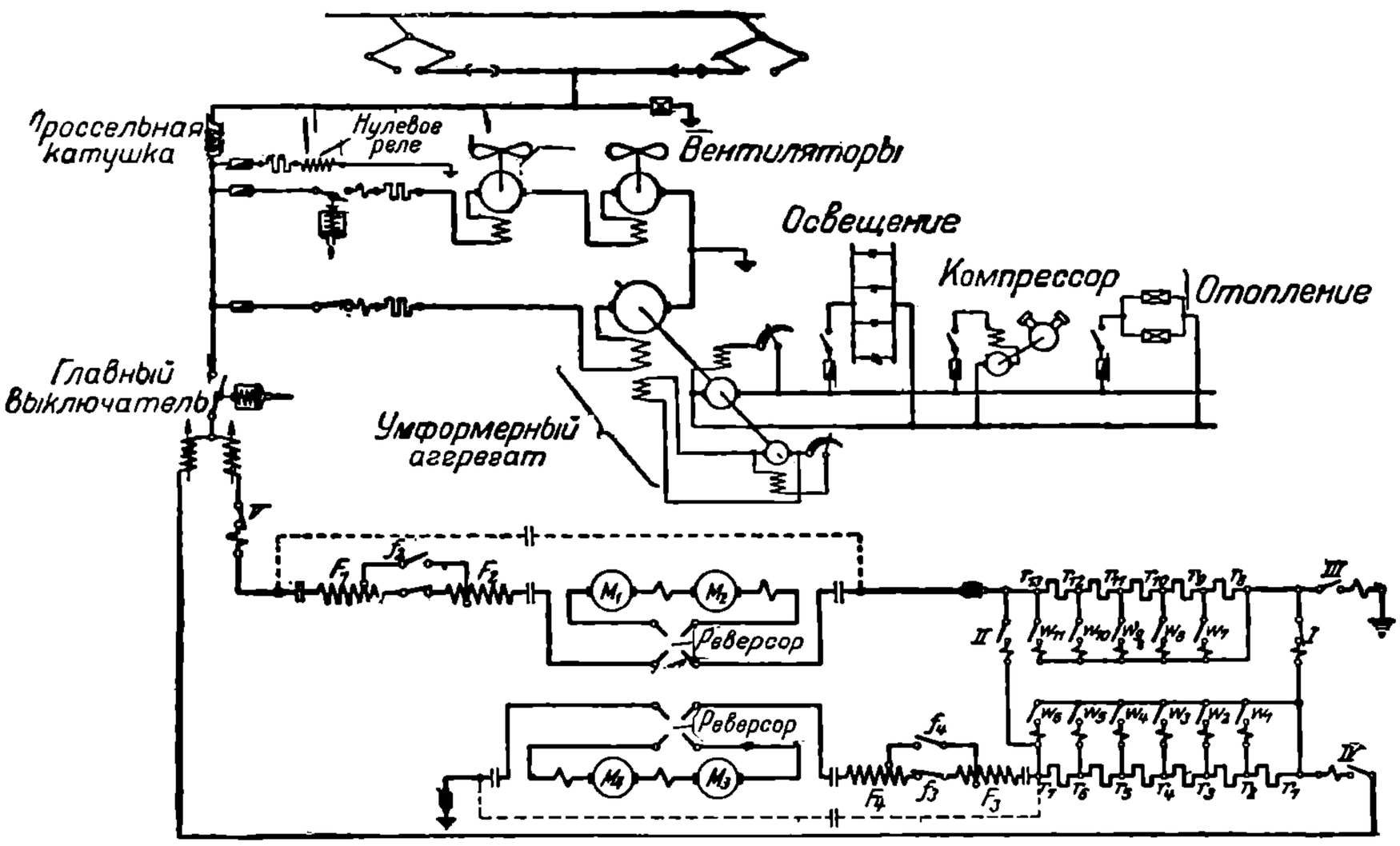


Рис. 176. Принципиальная схема управления электровоза постоянного тока.

или различного рода электропневматических устройств, приводимых в действие сжатым воздухом, который впускается в рабочие цилиндры и выпускается из них электромагнитными клапанами. Для приведения в движение механизмов, производящих передвижение главных контактов, приходится иметь, кроме главных силовых цепей, еще и цепи вспомогательные, по которым распределяются токи управления. Примером принципиальных схем управления может служить схема рис. 176.

Системы управления по схеме многих единиц Большим распространением в настоящее время пользуются системы управления по схеме многих единиц применяемые в тех случаях, когда в составе поезда имеется несколько моторных вагонов или электровозов. Сущность этих систем сводится к возможности управлять из одного места одновременно всеми тяговыми единицами поезда. Для осуществления этого приходится протянуть через весь поезд специальную электрическую магистраль, содержащую в себе такие провода, которые необходимы для производства требуемых переключений. От каждой поездной единицы к последующей нормально провода проходят с помощью штепсельных муфт.

В большинстве случаев поездные магистрали состоят только из проводов вспомогательных цепей управления, что весьма сильно упрощает выполнение данной идеи. Схемы с магистралями из силовых проводов встречаются только в редких случаях, так как проводка подобных магистралей с разъемными приспособлениями от одной поездной единицы к следующей в случае больших токов и высоких

НБ УИУНТ (ДІІТ)

напряжений встречает значительные технические трудности. Возможность управления по системе многих единиц является одним из существеннейших достоинств электрической тяги, так как оно обеспечивает возможность широко варьировать формирование поездных составов.

Принципы автоматического управления. Большим достижением современного поездного управления является широкое применение принципов автоматизации. Под автоматическими системами управления следует подразумевать такие системы, которые позволяют все операции, необходимые для производства разгона поезда, осуществлять автоматически, без участия машиниста. Последнему приходится производить тогда только по одной легкой операции в моменты начального включения и конечного выключения системы.

В некоторых случаях автоматизацию бывает рационально ограничивать пределами отдельных группировок двигателей. Так, например, при последовательно-параллельных схемах часто автоматизируются все операции в пределах каждой из группировок двигателей, но самый переход от последовательного включения к параллельному осуществляется рукой машиниста. Такие схемы групповой автоматизации позволяют задерживать работу двигателей на промежуточных ходовых положениях, в данном случае на последовательном, в течение такого времени, которое требуется частными условиями движения. Иногда системы выполняются таким образом, что они могут работать как по принципу полной автоматизации, так и по принципу автоматизации групповой.

Автоматический разгон поезда, как общее правило, производится с помощью пусковых автоматов, работающих по принципу реле минимальных токов. Как было уже выяснено в предыдущей главе, при пуске в ход ток колеблется в пределах от I_{max} до I_{min}. В соответствии с этим пусковое реле регулируется таким образом, что оно включает каждую следующую ступень управления, как только пусковой ток падает до I_{min}.

Большим преимуществом автоматического управления, помимо облегчения работы машиниста, является достижение согласования теоретического пуска с пуском практическим. Без автоматизации по целому ряду причин пусковой процесс сильно отличается от расчетного. В результате это чрезвычайно вредно отражается как на расходе энергии, так и на работе двигателей. Автоматизация пуска устраняет эти недочеты.

2. Условия работы аппаратов управления.

Явления при разрыве тока. Наибольшие затруднения, которые приходится преодолевать при конструировании аппаратов управления, вызываются работой систем в моменты разрыва цепей. При выключении токов, особенно больших, неизбежно в большинстве случаев образование вольтовых дуг. Последние, вызывая обгорание контактов, а в некоторых случаях и полное их сгорание, являются основной причиной выхода аппаратов управления из строя.

Ввиду этого, при конструировании аппаратов, ведающих включением и выключением токов, приходится прежде всего обращать внимание на борьбу по ликвидации опасных последствий от вольтовых дуг. Образование последних зависит от разнообразных факторов, важнейшими из которых являются напряжение между разрываемыми контактами и расстояние между ними. В простейшем виде закон образования вольтовой дуги, как известно, может быть представлен в виде:

$$l_к = \frac{U - \alpha}{\beta} \text{ cm}, \tag{187}$$

где $l_к$ — критическое расстояние между электродами, при котором еще может иметь место вольтова дуга, U — напряжение между ними, а величины α и β постоянные. По данным Ayrton'a можно полагать:

$$\alpha = 39 \text{ V} \text{ и } \beta = 20 \text{ V/cm}.$$

Приведенная формула не учитывает величины разрываемого тока, между тем, по опытам E. Philippi, он имеет существеннейшее значение. Как это предлагает R. Edler на основании данных Philippi, зависимость критической длины дуги от тока I можно приближенно определить выражением:

$$l^2_к = cI, \tag{188}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

где c для напряжений порядка 220 V равно около 20 cm/A и для напряжения 550 V — около 16,4 cm/A (Л. 93).

Процесс разрыва дуги сильно зависит от величины самоиндукции, имеющейся в разрываемой цепи. Наличие самоиндукции вызывает увеличение напряжения между размыкаемыми контактами, а также способствует общему возрастанию электромагнитной энергии, выделяемой при разрыве. Понятие о величине напряжения U_g, появляющегося при разрыве на контактах, можно получить на основании формулы:

$$U_g = \frac{U}{1 - \frac{L}{rt}}, \tag{189}$$

где U — напряжение, при котором разрывается цепь, L — коэфициент самоиндукции цепи в генри, r — сопротивление ее в омах и t — время разрыва в секундах. Формула (189) показывает, что с увеличением самоиндукции и уменьшением времени разрыва возрастает опасность от перенапряжения в цепи. Ввиду этого, увеличение скорости разрыва, желательное с точки зрения возможности понизить общее количество выделяемой при разрыве энергии, с точки зрения возможности опасных перенапряжений рационально только до определенного предела. С этим необходимо считаться при проектировании приспособлений для ускорения процесса разрыва.

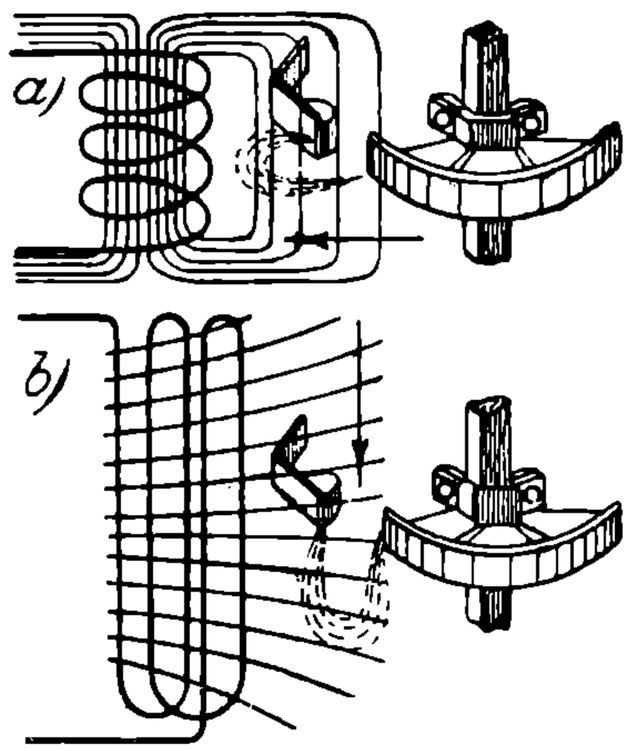


Рис. 177. Схема гашения дуги с помощью магнитного дутья.

Средства борьбы с вольтовыми дугами. При выполнении аппаратов размыкания тока основным требованием должна являться необходимость иметь расстояние между контактами в разомкнутом состоянии не меньше критической длины дуги. Ввиду того, что при высоких напряжениях эти расстояния часто получаются конструктивно трудно выполнимыми, прибегают к разделению их на несколько отдельных промежутков. Опыты Philippi показали, что практически безразлично, создавать ли требуемый воздушный промежуток в одном месте или разбивать его на несколько последовательно включенных.

Довольно распространенным способом улучшать тушение дуги является снабжение разрывающих цепь контактов рогами или рогообразными поверхностями. При такой конструкции вольтова дуга под действием потока нагретого ею воздуха, идущего от контактов к концам рогов, постепенно удлиняется и затем разрывается, перенося тяжесть разрыва на концы рогов.

В некоторых случаях считают рациональным направлять дугу с помощью того же потока нагретого воздуха на какие-либо холодные поверхности. В качестве таковых обычно используются стенки или ребра защитных гребенок, применяемых для отделения смежных рядов контактов друг от друга и выполняемых в таком случае из огнеупорного материала. Соприкосновение дуги с холодными поверхностями, как замечено, сильно способствует ее потуханию.

Наиболее радикальной мерой борьбы с вольтовыми дугами следует считать применение магнитного дутья. Основано оно на общем принципе воздействия поля на проводник с током, каковым в данном случае является вольтова дуга, представляющая собою воздушный проводник с током. Под влиянием магнитного поля, создаваемого в зоне образования вольтовых дуг, последние удлиняются и затем разрываются (рис. 177). Для усиления действия важно направить разрывающий эффект магнитного поля в ту же сторону, в которую стремится удлинить дугу и тепловой поток размыкания. Для образования такого искусственного магнитного поля применяются во всех современных высокоамперных аппаратах выключения специальные дугогасительные или, как их называют искрогасительные катушки.

В основном действие магнитного дутья сопровождается следующим эффектом. Благодаря действию магнитного поля происходит резкое изменение длины дуги. Дуга, встречая на своем пути при большой скорости охлаждающий воздух и охлаждающие поверхности, интенсивно отдает свою теплоту и понижает общую ионизацию пространства, где происходят процессы. В результате по сравнению с рабо-

НТБ УГАТУ (ДИТ)

той без магнитного дутья уменьшается время разрыва, а также и конечная длина дуги. Перенапряжения получаются выше. Несмотря на то, что дуга укорачивается, время разрыва настолько сильно падает, что перенапряжения в результате растут. Практически усиливать дутье рационально только до известного предела. Дальнейшее его увеличение, как показывают опыты, оказывает уже мало влияния. Время разрыва мало понижается, а между тем потери в дугогасительных катушках сильно возрастают.

Интенсивность действия дутья определяется напряжением магнитного поля в месте разрыва. Представление о влиянии на разрыв магнитного потока можно получить на основании ориентировочной формулы Edler'a, составленной им по опытным данным того же Philippi. Если через H обозначить в гауссах напряжения поля, то критическая длина дуги в процентном отношении к длине ее без дутья ориентировочно может быть определена соотношением:

$$p = \frac{1\,000}{H + 10}\%. \qquad (190)$$

Так, например, при $H = 25$ критическое расстояние по данным Edler'a получается равным около 25% от такового без магнитного гашения (Л. 93).

Кроме указанных средств, иногда для защиты токопроводящих контактов при разрыве применяются вспомогательные контакты размыкания. После того как главные контакты разъединены, назначение вспомогательных — принять на себя главный разрыв цепи. Делаются они из угля или какого-либо другого материала, хорошо выдерживающего эффект вольтовых дуг. Так как эти контакты работают только очень короткий промежуток времени, то большое переходное их сопротивление не имеет практического значения. В тех же целях защиты ответственных частей механизма главные размыкающие контакты часто снабжаются особыми наконечниками. Последние делаются из хорошего стойкого металла, чаще всего — из красной меди. В случае обгорания вспомогательные контакты легко можно сменять без общей замены контактных пластин.

Все приведенные выше методы борьбы с вольтовыми дугами в той или другой комбинации применяются при конструировании современных аппаратов выключения. Однако, несмотря на целый ряд опытов и большой эксплоатационный материал, вопрос о полном и всестороннем изучении процесса разрыва цепи с током нельзя считать окончательно решенным. К такому же выводу приходит и автор одной из наиболее солидных работ по дугогашению Riley, приводящий в своем труде много важных и интересных экспериментальных данных по затронутому здесь вопросу (Л. 95).

3. Управление поездом с помощью контроллеров.

Барабанные контроллеры трамвайного типа. Назначение аппаратов, называемых контроллерами — производить все необходимые операции по включению и выключению тяговых двигателей и их регулирующих приспособлений. В большинстве случаев, за исключением только специальных типов, при помощи контроллеров одновременно выполняют и функцию изменения направления движения поезда. Для этого при помощи контроллера переключаются зажимы или у якорей, или у обмоток возбуждения. На практике, дабы избежать частого перемагничивания железа машин, чаще применяют первую схему, хотя в Америке, наоборот, доминирует вторая.

Кроме указанных функций, в тех системах управления, в которых применяется способ электрического торможения поезда, о чем подробно будет говориться в последующих главах, контроллеры по большей части служат и для осуществления тормозных схем. Тогда на них лежит задача отсоединять двигатели от сети и включать их для генераторной работы на реостаты, причем одновременно с этим должны переключаться зажимы якорных или возбудительных обмоток, так как только при этом условии можно получить нормальное самовозбуждение машин.

Все необходимые переключения в контроллерах производятся с помощью вращения барабанов, отдельные элементы которых в определенной последовательности приходят в электрическое соприкосновение с пружинящими пальцами. Последние соединяются с зажимами сети, двигателей, реостатов прочими элементами главной цепи. В результате соответствующего подбора взаимного положения пальцев и элементов на барабанах совершаются все необходимые переключения.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Образцы контроллеров, применяющихся теперь, приведены на рис. 178 и 179. Как видно из рисунков, основною частью является главный распределительный барабан, который сидит на стальном валу, вращающемся в подшипниках. Вал имеет по большей части четырехгранную форму и изолируется вдоль внешней поверхности прочным изолировочным материалом. Чаще всего для этого применяют микапит или специальный тип изоляции — экскезит. Для достижения нужных переклю-

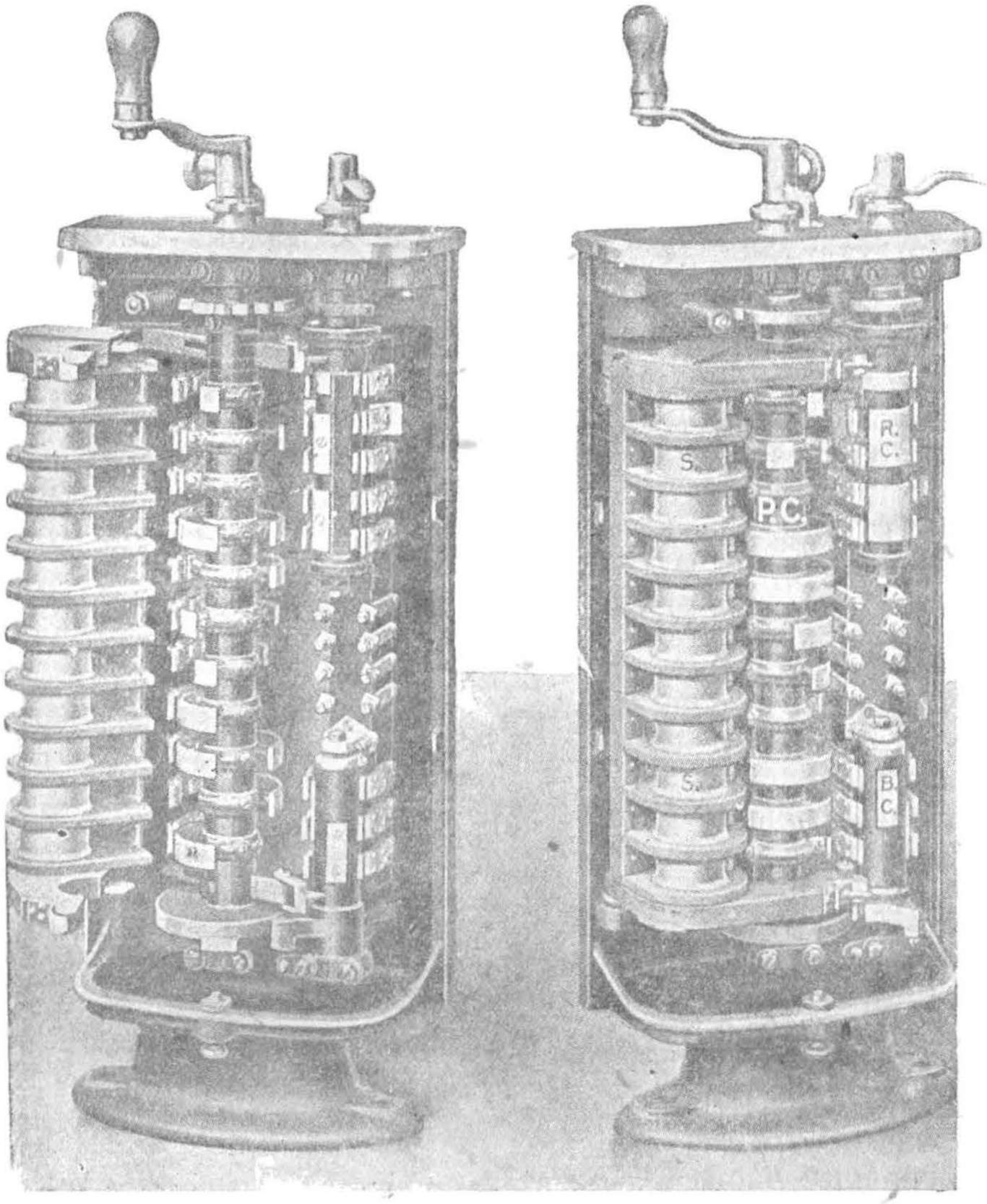


Рис. 178. Общий вид контроллера D. Kr.

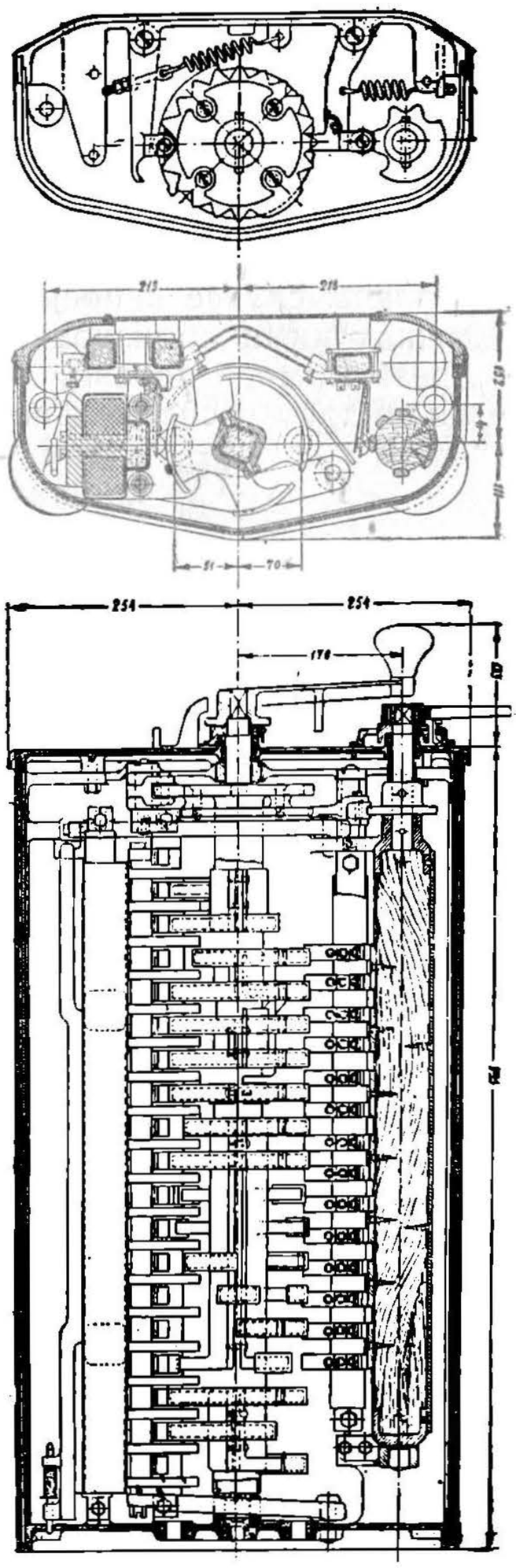


Рис. 179. Разрезы контроллера завода SSW.

чений на вал поверх изоляции надеваются в определенном порядке сектора, представляющие собою фигурные литые элементы из чугуна или латуни. К внешним цилиндрическим поверхностям секторов привинчиваются медные отрезки колец, называемые сегментами. Наиболее ответственные сегменты, проводящие длительно большие токи и требующие возможно малых переходных сопротивлений, выполняются из красной полосовой меди, менее ответственные — из тянутой желтой. Толщина внешних цилиндрических поверхностей секторов делается около 6—8 mm, а сегментов — около 6—7 mm. На каждый данный сектор помещаются, естественно, те сегменты, которые должны быть в электрическом соединении друг с другом.

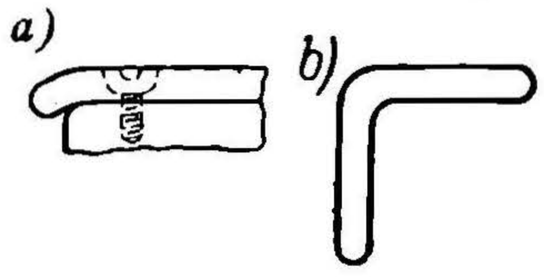


Рис. 180. Типы наконечников сегментов контроллеров.

Сегменты по мотивам, указанным выше, заканчиваются обычно наконечниками из красной меди (рис. 180). Наиболее часто применяется тип *a*. Форма *b* сложнее по выполнению, но имеет то преимущество, что дает более энергичный разрыв дуги.

НБ УПУНТ (ДІТ)

Винты для крепления сегментов и наконечников берутся или из меди, или из железа. Последние, как более прочные, предпочтительны. Толщина их по диаметру— около 5 mm.

Крепление секторов на валу производится с помощью свинчивающихся муфт или хомутиков, охватывающих вал поверх изоляции. Держится сектор на валу с помощью трения, причем внутренние поверхности хомутиков часто делают с выемками, чтобы они могли плотнее схватиться с изоляционным слоем вала. На рис. 179 видны те винты, которые свинчивают муфты секторов. В случае нужды электрические соединения между отдельными секторами образованы проводами, помещаемыми в изоляционные трубки, которые выполняются из миканита или бакелита.

Следует обратить внимание на то, что, вместо приведенной конструкции, в контроллерах старых типов еще и теперь часто встречаются деревянные фигурные барабаны, представляющие собою цилиндры, скрепляемые с валом. Сегменты в таком случае непосредственно привинчиваются к дереву. Отдельные соединения между ними производятся особыми соединительными пластинчатыми перемычками, врезаемыми в дерево, или изолированными проводами, прокладываемыми внутри цилиндров в специально сделанных в них ходах. Недостаток деревянных барабанов в том, что дерево быстро крошится и обугливается, что особенно проявляется в местах ввинчивания крепящих сегменты шурупов.

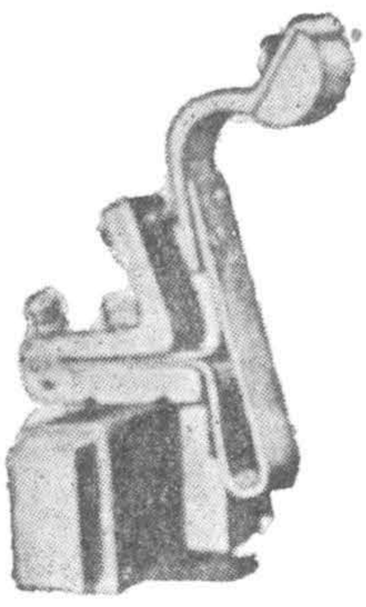


Рис. 181. Палец контроллера.

Общее представление о пальцах контроллеров можно получить на основании рис. 181. Верхняя часть пальца скрепляется с держателем помощью плоской пружины, обеспечивающей необходимое нажатие пальца на сегменты. Иногда, вместо таких плоских пружин, выполняемых чаще всего из фосфористой бронзы или стали, нажатие достигается стальными спиральными пружинами. Пальцы оканчиваются специальными контактами, которые называются сухариками. Последние держатся на винтах и могут быть в случае обгорания и сработки легко сменены. Основные части пальцев выполняются из латуни или бронзы, сухарики же — из красной меди. Пальцы крепятся на особых держателях, представляющих собою или деревянные бруски, или металлические четырехгранные стержни, покрытые слоем изоляции.

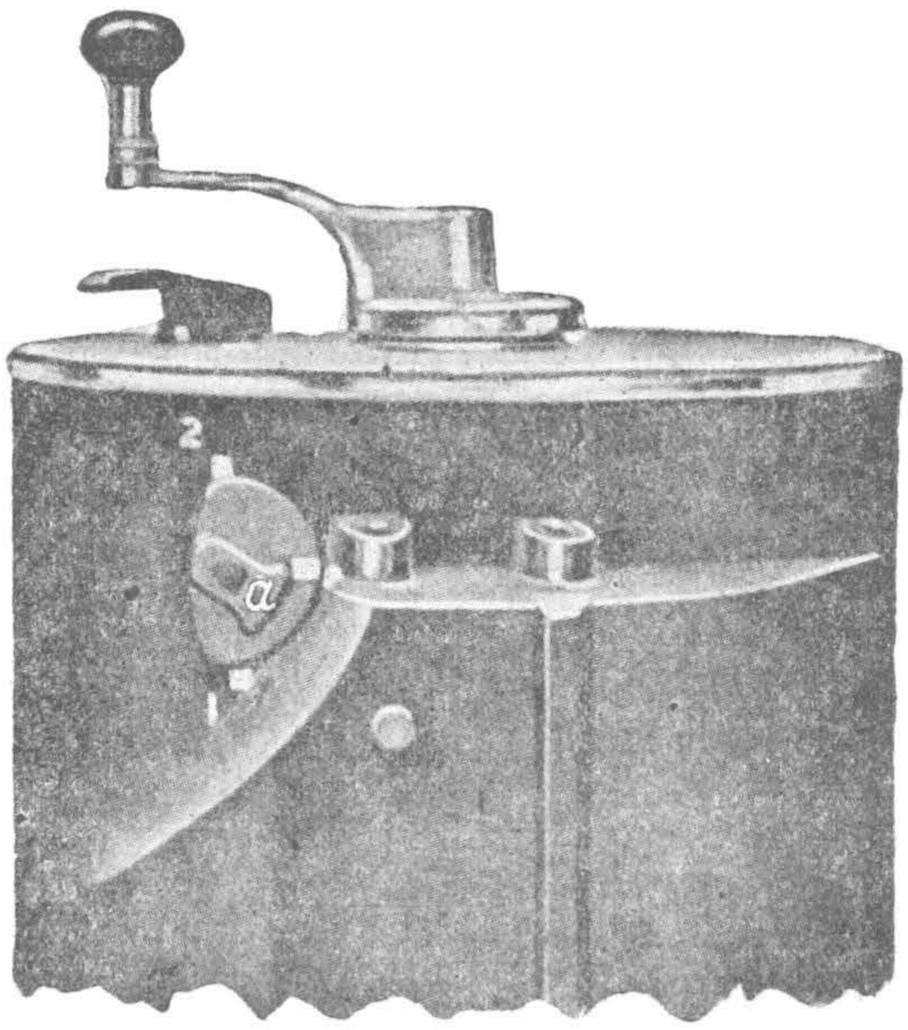


Рис. 182. Задняя сторона контроллера D. Kr.

Для изменения направления движения поезда в современных контроллерах, как общее правило, применяются специальные реверсивные валики, поворотом которых в том или другом направлении производится переключение зажимов якорных или индукторных обмоток. Выключение отдельных двигателей по большей части производится с помощью тех же реверсивных валиков. В общем случае реверсивный валик должен иметь положения на „стоп", „вперед" и „назад", причем последние два положения следует иметь как для нормального включения двигателей, так и для работы отдельных двигателей или групп в случае выключения части их. Управление реверсивным валиком производится путем его поворота, но иногда поворот комбинируется с подъемом и опусканием. Примером последнего может служить контроллер завода D. Kr (рис. 182). Здесь изменение направления движения для нормальной работы производится обычным поворотом ручки. Выключение же каждого из двух двигателей или их групп производится поднятием вала для выключения одного двигателя и опусканием для другого. С этой целью ручка реверсивного вала вставляется в показанный на задней стороне выступ *a* и путем поворота его вверх или вниз на положение 1 или 2 поднимает или опускает реверсивный барабан.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Для переключений, дающих тормозные положения, применяются две конструкции. У первой все нужные для этого сегменты располагаются на главном распределительном барабане. У второй — часть сегментов выносится на специальный тормозной валик. Последний в моменты начала торможения механически путем зубчатых секторов или кулачков сцепляется с главным валом и своим поворотом производит необходимые переключения. Тормозной валик нормально располагается под реверсивным. В конструктивном отношении предпочтительна первая система — без тормозных валиков. При ней устранены затруднения по устройству подшипников для находящихся друг под другом реверсивного и тормозного валиков, а также значительно понижается и число отдельных деталей механизма.

Остов или корпус современных контроллеров чаще всего выполняется в виде тонкостенной полуовальной отливки из чугуна. С передней стороны остов прикрывается кожухом из железного листа, прикрепляемого натяжными барашками или, что предпочтительнее, специальными пружинными затворами. Сверху и снизу к остову привинчиваются крышки из чугуна, к которым крепятся подшипники валов и планки для пальцедержателей. Вместо чугуна остов иногда выполняют в виде каркаса, материалом для которого служит уголковое и полосовое железо. При такой конструкции верхняя и нижняя крышки являются связующими звеньями для отдельных стоек каркаса. Последние обтягиваются листом железа толщиною 1,5—2 mm. С передней стороны, как и в предыдущем случае, остов закрывается кожухом. Преимущество подобных конструкций, выполняемых, например, SSW и BBC, в значительном уменьшении общего веса. Однако, на практике бо́льшее распространение имеет первый тип, дающий несколько более легкую сборку механизма.

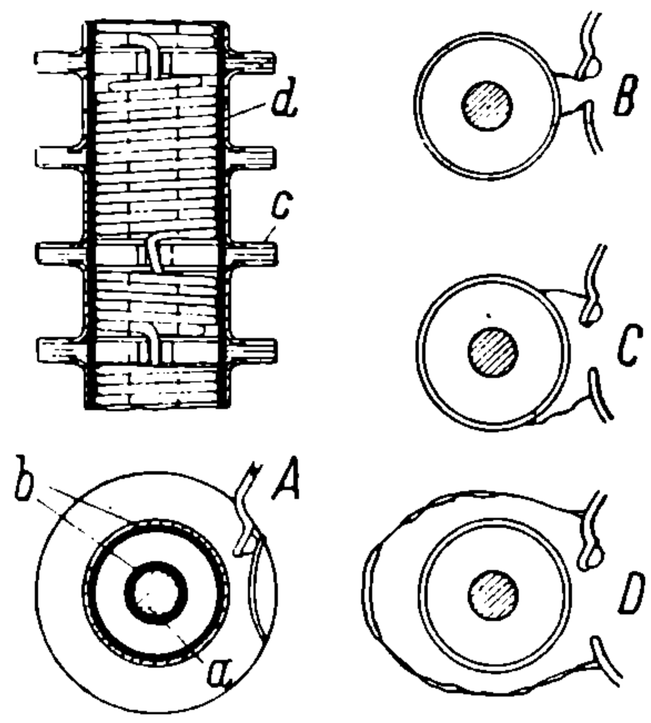


Рис. 183. Процесс дугогашения в контроллере типа D. Kr.

Много внимания в контроллерах приходится уделять искрогашению. Прежде всего обязательною принадлежностью каждого контроллера является защитная гребенка, отделяющая отдельные пальцы и сегменты друг от друга (рис. 178. Главное назначение ее — не допускать переброски дуги с места ее образования на смежные части механизма. Материалом для гребенок служит азбестин, состоящий из азбеста, цемента и алебастра при толщине слоя около 10 mm. В некоторых случаях применяют специальную композицию — искродин В целях защиты корпуса от переброски на него дуг задние стенки его обтягиваются азбестовым покрытием.

Необходимой принадлежностью каждого современного контроллера являются дугогасительные катушки. В большинстве конструкций применяется одна общая катушка, которая надевается на сердечник, оканчивающийся башмаком, идущим по всей высоте кожуха параллельно главному барабану (рис. 179). Проводящими металлическими частями для искрогасительного потока служат основной сердечник, кожух и барабан. При такой конструкции поток идет перпендикулярно оси барабана и выдувает дугу параллельно этой оси. Выдувание наиболее рационально направлять по течению теплового потока. Необходимая величина искрогасительного потока зависит от конструктивного выполнения механизма контроллера. Число витков таких катушек колеблется в широких пределах. Для трамвайных контроллеров оно берется чаще всего в пределах 15—25. Основной дефект такого устройства искрогашения — невозможность достигнуть одинаково благоприятного дутья во всех местах размыкания тока.

Для улучшения этого процесса иногда вместо одной катушки берут несколько. Из таких систем достойна внимания выполняемая D. Kr (рис. 178 и 183) и принятая за основу для русских контроллеров типа ДК-4. Для осуществления этой конструкции вокруг железного сердечника *a* наматывается обмотка с таким расчетом, чтобы образовалось несколько полюсов для дугогасительного потока. Полюса и их положение выбираются таким образом, чтобы и по величине и по направлению поле соответствовало своему назначению во всех основных местах размыкания. Обмотка с боковых поверхностей покрывается изоляционным слоем *b*. Поверх этого слоя надеваются, образуя как бы защитную гребенку, отражательные диски *c*, между которыми вставлены медные цилиндры *d*. Помимо фиксации отражательных

РБ УПУНТ (ДІІТ)

дисков назначение этих цилиндров — притягивать к себе образующуюся дугу, а затем действием магнитного дутья и теплового потока, расширяя ее, разрывать. Картину разрыва можно проследить на основании положений *B*, *C* и *D*.

При конструировании дугогасительных катушек для уменьшения потерь рационально выключать их на тех ходовых положениях, на которых производится главная езда. В случае наличия нескольких таких положений, как, например, при регулировании поля двигателей, это требование может осложнить конструкцию, вызывая необходимость в дополнительных пальцах и сегментах. Для устранения этого иногда подразделяют главную катушку на две части — основную и добавочную. Обе катушки работают при пуске и при всех остальных переходных положениях. На ходовых же ступенях остается только одна вспомогательная, с небольшим числом витков. В некоторых системах вспомогательная катушка вводится только после выключения главной и действует на пальцы, производящие переключение, связанное с ослаблением поля.

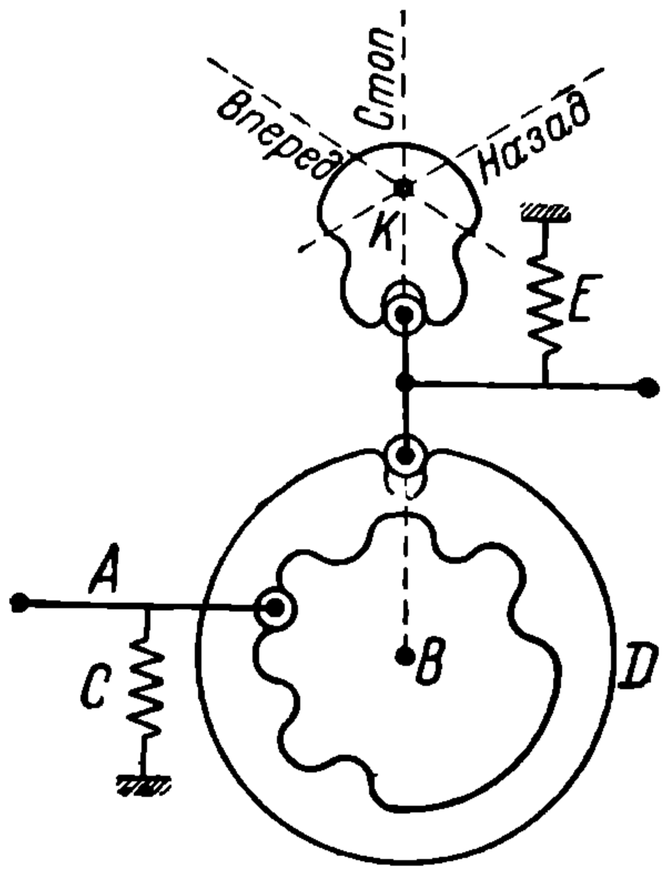


Рис. 184. Схема блокировки контроллера.

Необходимою деталью современных контроллеров является блокировочное устройство. Назначение его — допускать переключения только в определенной последовательности, соответствующей заранее установленной схеме. Требования, предъявляемые к контроллерной блокировке, таковы. В положении на „стоп" реверсивного и главного вала последний должен быть так заблокирован, чтобы его невозможно было повернуть. Поворот должен допускаться только при сдвиге реверсивного валика со „стоп". При рабочих положениях обоих валов, наоборот, должен заблокироваться реверсивный валик. Поворот его должен допускаться только после того, когда главный вал пришел на „стоп".

В современных типах рабочие положения контроллеров производятся поворотом главной ручки на „стоп" влево, тормозные же — вправо. Ввиду этого необходимо иметь приспособление, которое не допускало бы поворота ручки с последнего ходового положения на последнее тормозное. При езде на одном моторе или одной группе главный барабан должен так заблокировываться, чтобы поворот его допускался только до положения перехода с последовательного включения на параллельное.

Одновременно с блокировкой необходимо иметь в контроллерах фиксаторы отдельных положений. Они должны создавать некоторую силу, вынуждающую вращающийся барабан задерживаться на установленных положениях, дабы вожатый или машинист мог ясно ощущать правильность установки ручки.

Для осуществления блокировки и фиксации применяются комбинации защелкивающих рычагов и собачек, действующих на храповичные звезды, закрепленные на главном валу (рис. 184). Фиксация достигается рычагом *A* с роликом, скользящем по звезде *B*. Рычаг натягивается пружиной *C*. Для каждого рабочего положения контроллера на звезде имеется впадина, входя в которую рычаг защелкивает вал. На переходных же положениях ролик свободно катится по ровной периферии звезды. Для перевода вала из каждого рабочего положения в следующее необходимо затратить некоторое усилие, чтобы преодолеть действующие пружины.

Что же касается блокировки, то она осуществляется храповичными запорами. Для этой цели на главном валу крепится храповичный диск *D*. При положении реверсивного вала на „стоп" собачка, управляемая пружиной *E*, запирает главный барабан, входя во впадину диска. При повороте реверсивного барабана в положения „вперед" или „назад" собачка, приподнимаясь вверх, освобождает храповичный диск. Затем, при повороте главного вала она попадает на выступающие поверхности диска *D*, упираясь в вилку *K*, благодаря чему нельзя повернуть реверсор, пока главный барабан снова не придет на положение „стоп". Для выключения одного из двигателей или группы двигателей в случае выхода их из строя схема должна быть осложнена запором главного вала на последнем последовательном соединении. Это достигается также храповичными устройствами (рис. 185). Для этой цели на диске *D* делаются добавочные впадины или выступы, а реверсивный

НБ УГАЖТ (ДІІТ)

валик снабжается уже не вилкой, а целым зубчатым диском *K*. Комбинируя глубину впадин этого диска с конфигурацией звезды *D*, можно так отрегулировать рычаг *M* или связать с ним вспомогательный, что в результате при положении реверсивного вала для работы двух двигателей этот рычаг позволяет главному валу делать полный оборот. В случае же работы на одном двигателе поворот делается возможным только до положения перехода с последовательного на параллельное включение, что по схеме осуществляется выступом δ. Конструктивное оформление блокировки видно из рис. 179.

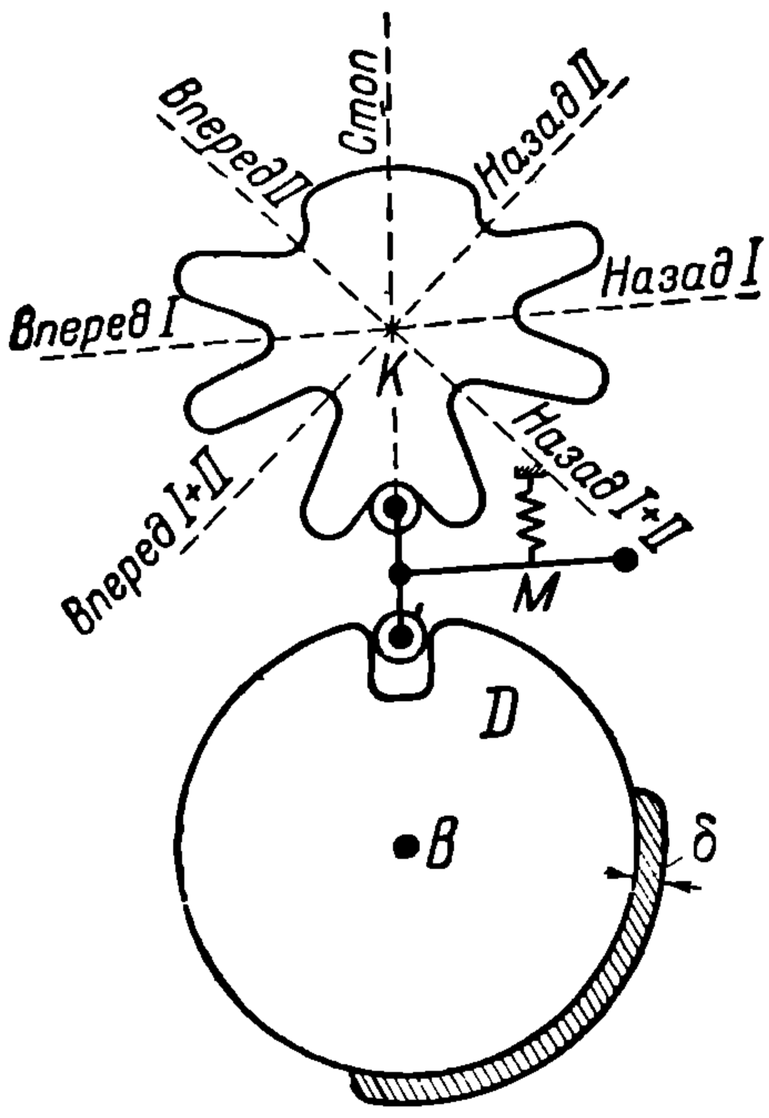


Рис. 185. Схема блокировки контроллера при работе на двух двигателях и на каждом из них отдельно.

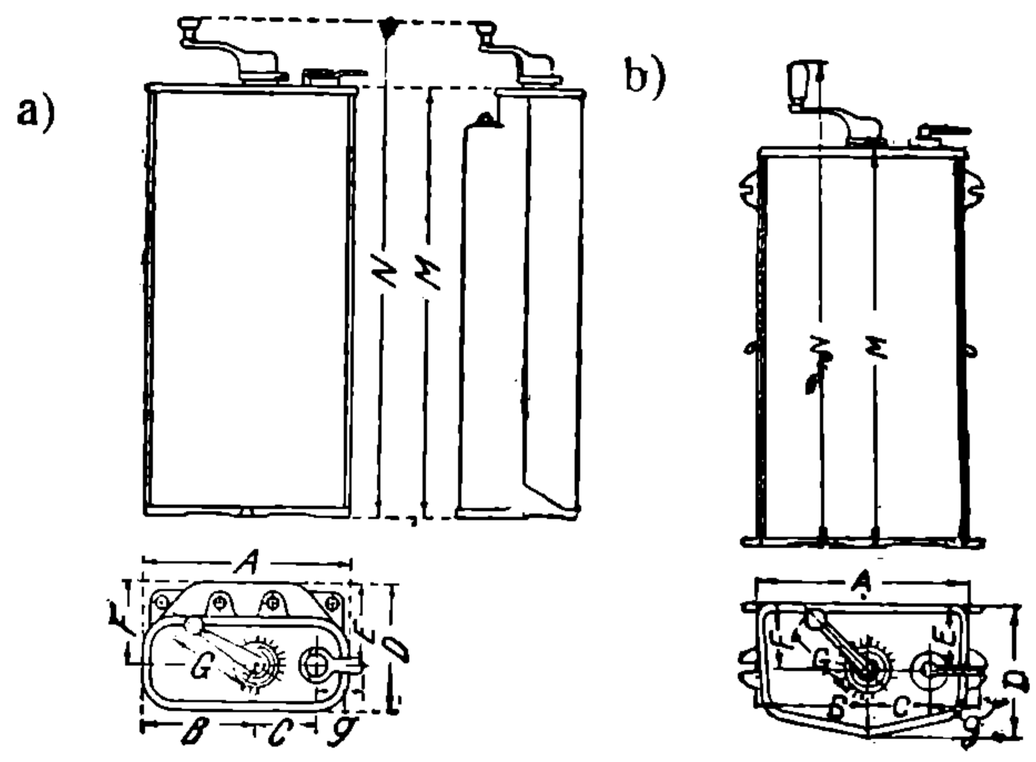


Рис. 186. Габариты контроллеров трамвайного типа.

Кроме того, в некоторых типах контроллеров, как, например, D. Kr и в нашем типе ДК-4, есть приспособление для выдержки времени при проходе отдельных положений контроллера, что препятствует вожатому слишком быстро проходить отдельные ступени и тем самым предотвращает опасные броски пускового тока. В основе идея такого механизма сводится к пружинной защелке, действующей на специальный зубчатый диск, сидящий на главном валу. Как только вожатый поставит главный барабан на новое положение, собачка защелкивает диск, входя в соответствующую впадину. Если вожатый, не прекращая давления на ручку, попытается повернуть барабан дальше, то собачка этого не допустит. Чтобы перейти на следующее положение, вожатый должен прекратить давление, после чего собачка под действием пружины выходит из впадины, и барабан можно перевести на следующее положение. Период времени, необходимый для освобождения собачки, это и есть та наименьшая выдержка, к которой вожатый, даже если бы он этого и не хотел, принуждается на каждом положении.

Представление об основных характеристиках контроллеров, применяемых в настоящее время, могут дать таблицы 32 и 33 с рис. 186.

ТАБЛИЦА 32.

Основные параметры трамвайных контроллеров.

Фирма	Тип	Напряжение	Число двигателей	Часовая мощность каждого двигателя в kW	Число положений			Приблизительный вес в kg
					Сериесного соединения	Параллельного соединения	Торможения	
Завод им. Кирова	ДК —4	550	2	40	6/1	4/1	6	182
	ДК —5	550	2	40	5/1	5/2	7	195
GEC	В —50— В	600	4	45	5	4	9	223

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ТАБЛИЦА 33

Габаритные размеры контроллеров к рис. 186 в mm.

Тип	Рис.	A	B	C	D	E	F	G	g	M	N
DK-4	186a	470	262	135	280	175	175	185	110	930	1085
DK-5	186a	500	260	140	300	150	150	195	115	925	1130
B—50—B	186b	634	355	143	324	184	121	250	152	1098	1249

Отметим, что в настоящее время для облегчения работы контроллера в трамвайных системах управления начинают применяться специальные индивидуальные выключатели или, как говорят, линейные контакторы. Они производят замыкание и размыкание главной цепи, одновременно исполняя функции максимального автомата. Этим достигается освобождение контроллера от наиболее опасных функций работы. Включением и выключением линейного контактора управляет его обмотка, в которую подается ток главной цепи через соответствующие сопротивления. Подача тока производится ручкой главного контроллера. Она так сконструирована, что с помощью добавочных контактов дает предварение работы контактора по сравнению с главным барабаном основного контроллера как в процессе включения, так и в процессе выключения главной цепи. Для максимального выключения имеется специальная обмотка, под действием которой в случае превышения нормы главным током контактор выключается (Л. 106).

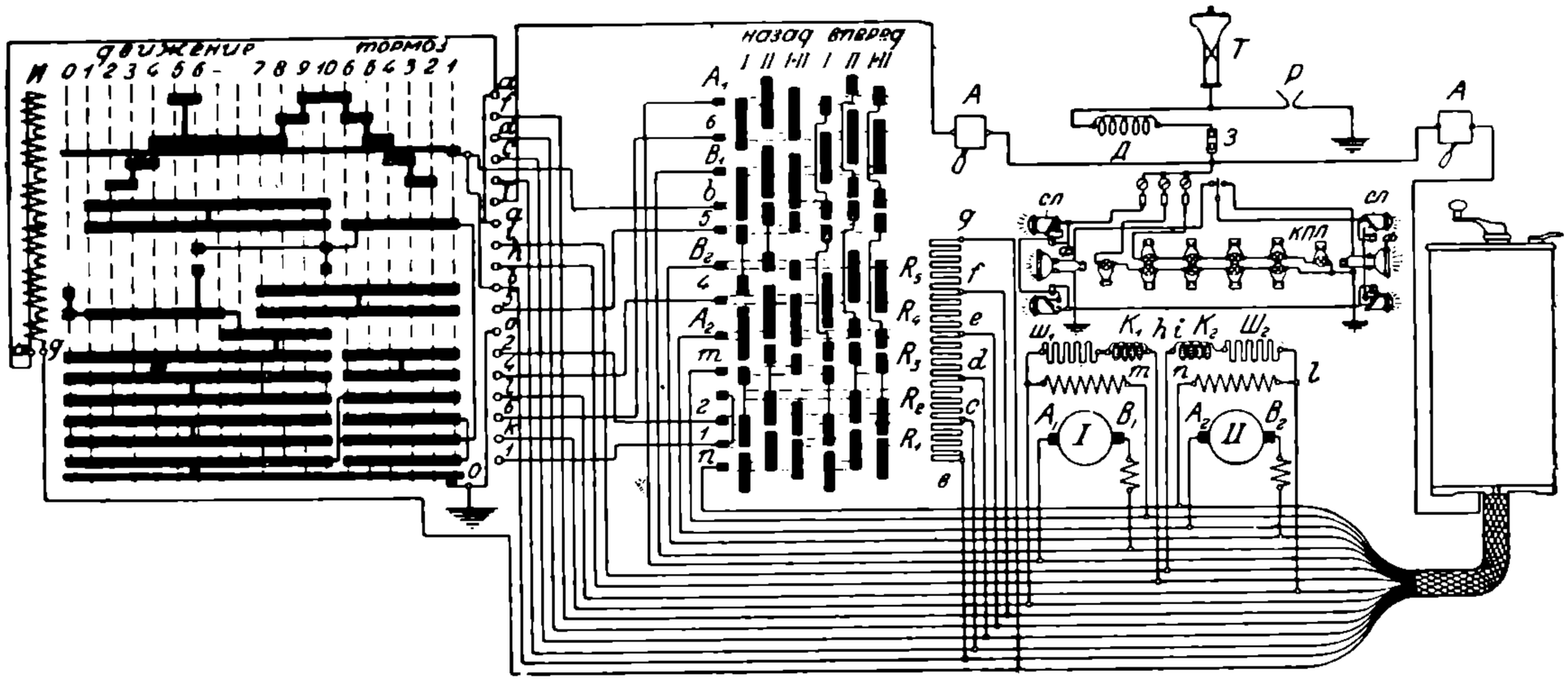


Рис. 187. Схема управления трамвайным вагоном при контроллерах типа DK-4.

В качестве образца системы управления поездом с помощью контроллера применительно к трамвайным условиям движения приведена схема на рис. 187. Схема построена для контроллера типа DK-4, в котором выключение отдельных двигателей осуществляется путем подъема и опускания реверсивного валика. Высота подъема определяется высотой пальца. Контроллер представлен в виде развертки. В каждом данном положении пальцы приходят в соприкосновение с теми сегментами, которые пересекаются соответствующей пунктирной вертикалью. Так, например, в положении 1 при работе обоих моторов вперед цепь составляется в таком порядке: $T - a - g - b - A_1 - B_1 - 6 - k - m - 2 - 5 - A_2 - B_2 - 4 - l - n - 1 - 0$.

Все схемы соединений для отдельных положений включения контроллера приведены на рис. 188, 189 и 190. На последовательном и параллельном соединении имеется по одной ступени шунтировки поля с применением комбинированных шунтов, состоящих из омических сопротивлений $Ш_1$ и $Ш_2$ и индуктивных K_1 и K_2. Буквой D на схеме обозначена дугогасительная катушка. Через r_1 и r_2 обозначены цепи шунтов.

Рис. 191 дает нормальную схему включения четырехмоторного американского вагона. В большинстве случаев, так же как и в данной схеме, американцы работают без электрического тормоза. Контроллер получается весьма простым по устройству.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Двигатели работают сначала на последовательно-параллельном соединении, а затем все четыре включаются параллельно. Выключение двигателей производится группами по два. Первая группа выключается переключателем $1 - R_7$, вторая — переключателем 2 на землю. Реверсия вращения машин достигается переключением зажимов обмоток возбуждения.

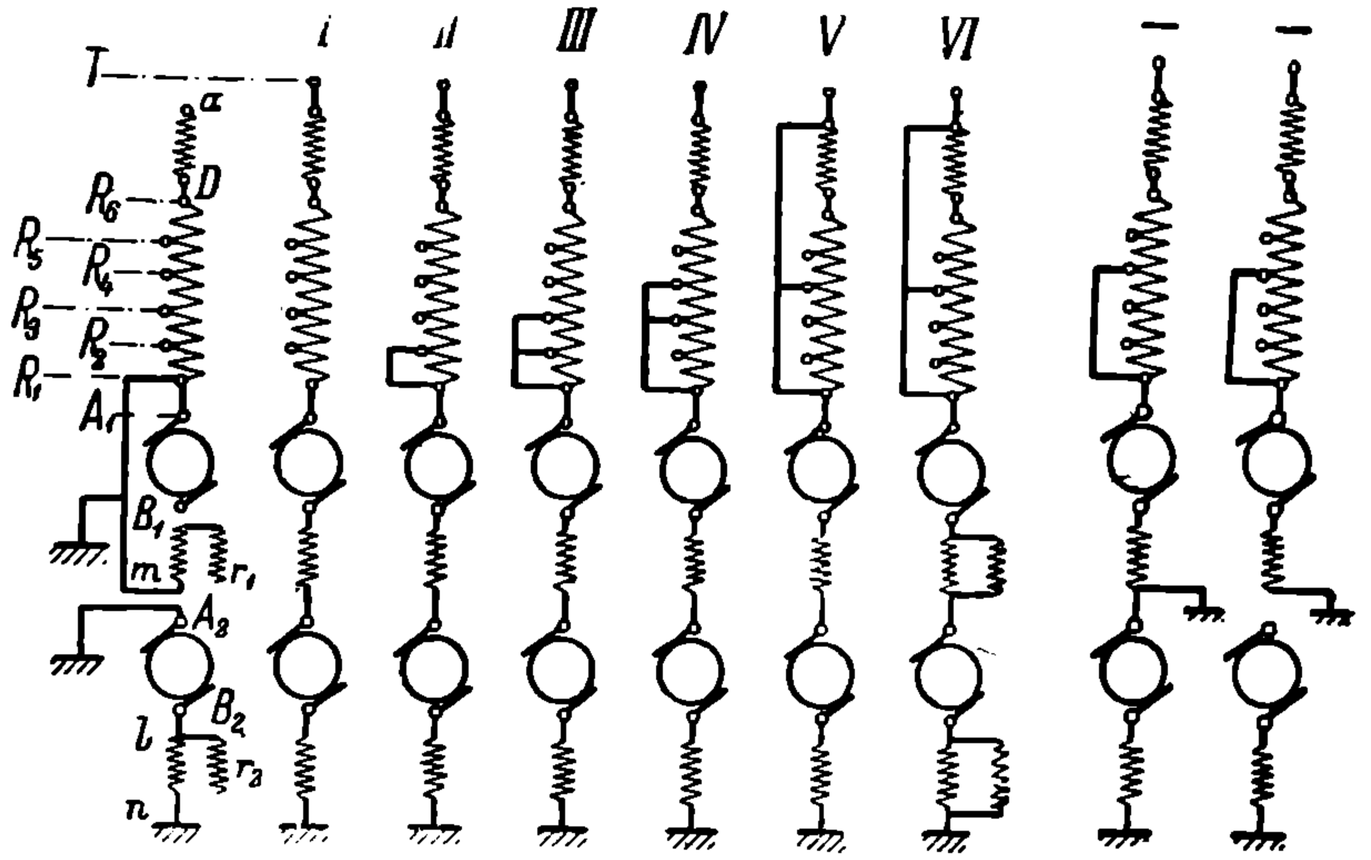


Рис. 188. Поездные положения последовательного соединения двигателей к рис. 187.

Рис. 189. Переходные положения к рис. 187.

На рис. 192 приведена схема контроллерного управления по системе Somaini, основные рабочие положения которой от первой до шестой скорости были даны на рис. 161. Схема рис. 192 в отличие от схемы рис. 161 содержит два двигателя вместо четырех. Выключение отдельных двигателей по схеме рис. 192 производится передвижением вправо или влево реверсивного вала. Из специальных аппаратов здесь следует отметить автомат E, автоматически замыкающий накоротко предохранительное сопротивление R, которое вводится, как было указано выше, для предотвращения опасных бросков тока в самый первый момент перехода на новую ступень напряжения. Автомат E действует по принципу диференциального реле с амперметровой и вольтметровой обмотками. Шунтовые сопротивления r включаются и выключаются в шунтовые обмотки f_1 и f_2 с помощью главного барабана контроллера. Компаундные обмотки на схеме показаны около R. Сопротивление R_g включается, как пусковое, в самый первый период пуска динамотора, а затем, с помощью главного контроллера, все время держится замкнутым накоротко. Механизм B служит для блокировки, позволяя вращаться главному барабану контроллера только при наличии тока в обмотке его электромагнита. Аппарат D представляет собою максимальный выключатель с кнопкой управления a.

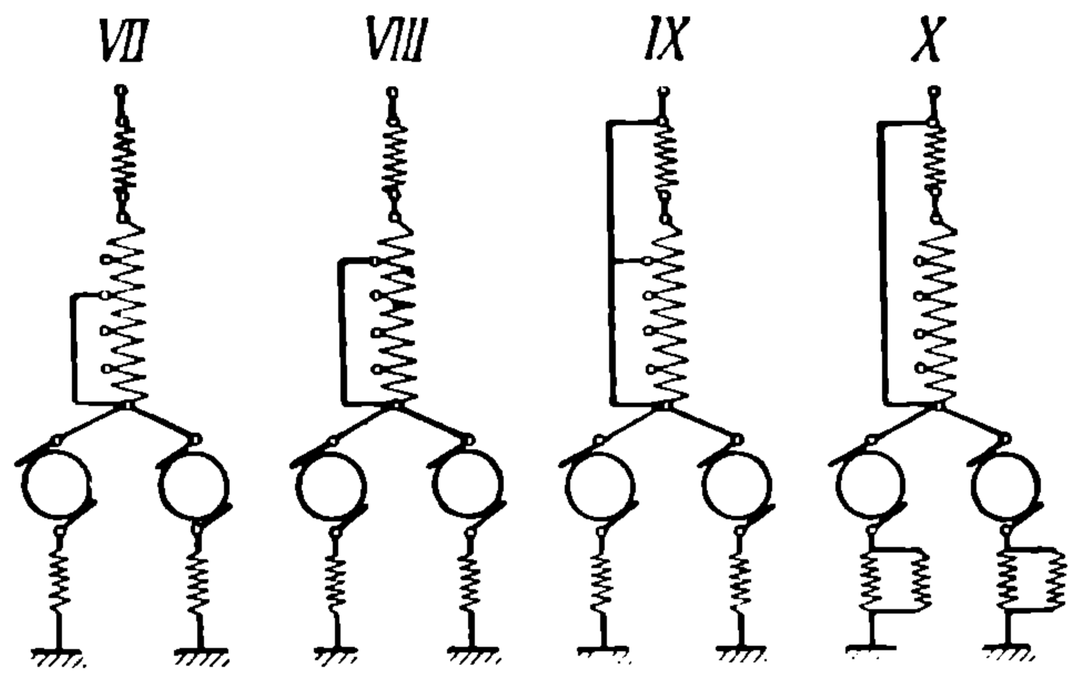


Рис. 190. Параллельное соединение двигателей к рис. 187.

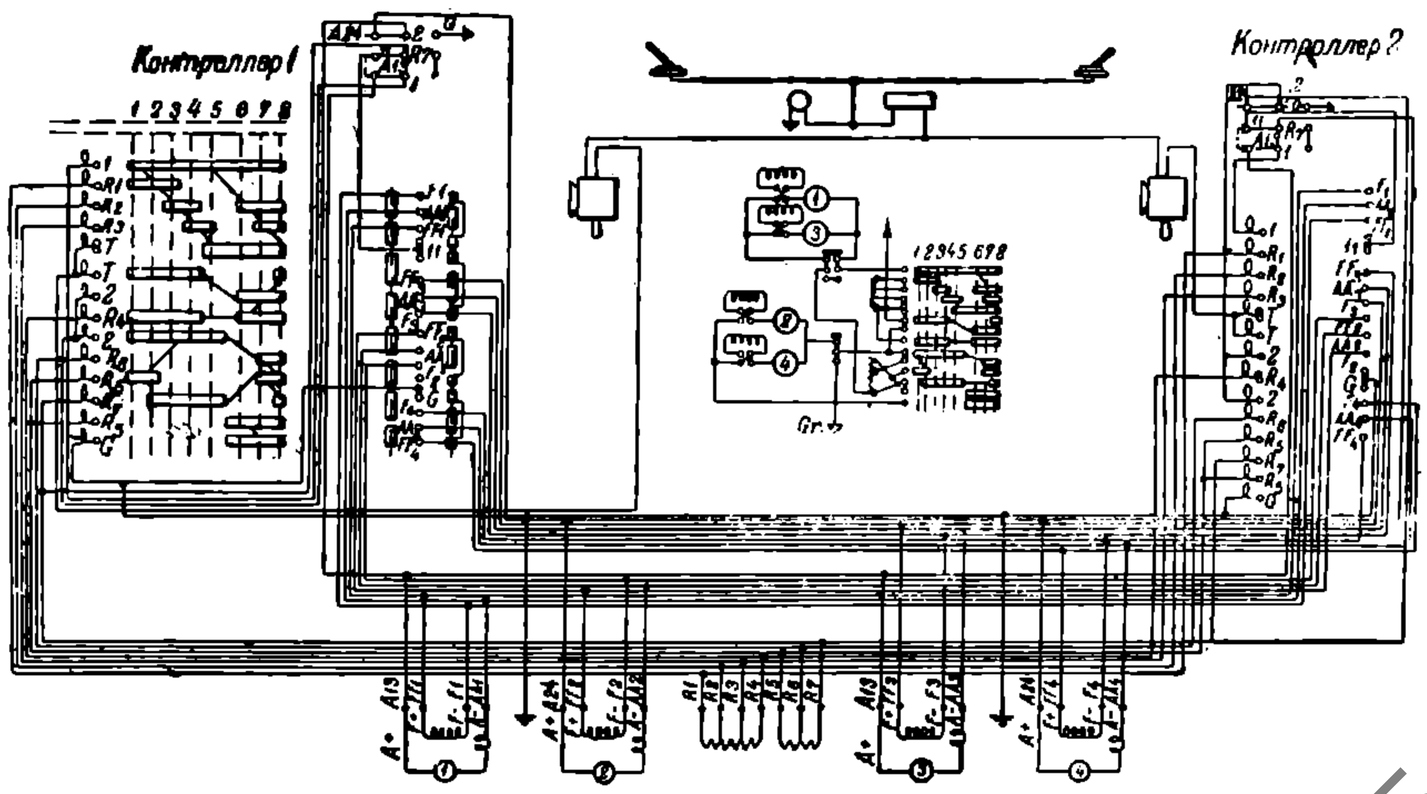


Рис. 191. Нормальная американская схема управления четырехосным моторным трамвайным вагоном.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Барабанные контроллеры для больших мощностей. Разобранные типы контроллеров пригодны, главным образом, для поездов трамвайного типа или легких пригородных поездов. Нормальный барабанный контроллер для больших

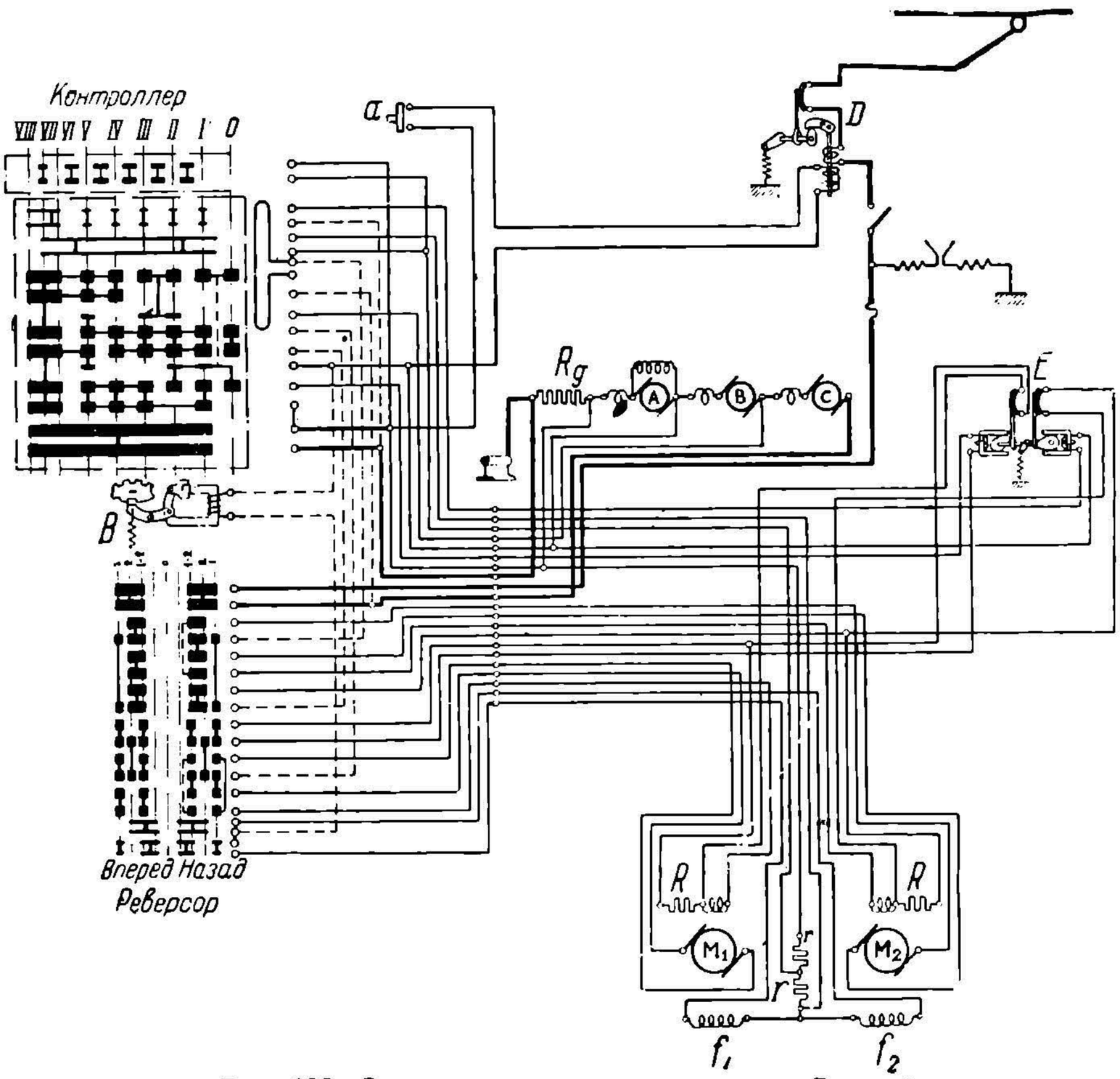


Рис. 192. Схема управления при системе Somain.

мощностей становится настолько громоздким и трудным для управления, что практически применять его не представляется возможным. Для мощных тяговых единиц, если желательно применять контроллерное управление, приходится конструировать специальные типы контроллеров с механизацией приводов. Образцом такого типа может служить контроллер завода Oerlikon'a, примененный в мощных электровозах Лебчергской ж. д., в Швейцарии (рис. 193). Приводится в движение этот контроллер с помощью храпового колеса *a* и кулачков *b*. Кулачки поднимаются и опускаются под действием электромагнитов *c*. Последние вместе с кулачками, будучи связаны с рычагом *d*, имеют колебательное движение. Для передвижения главного барабана в ту или другую сторону включается соответствующий электромагнит *c*, который опускает вниз нужный кулачок. Последний под действием одновременно опускающегося механизма *d* давит на зубец храпового колеса, и вал

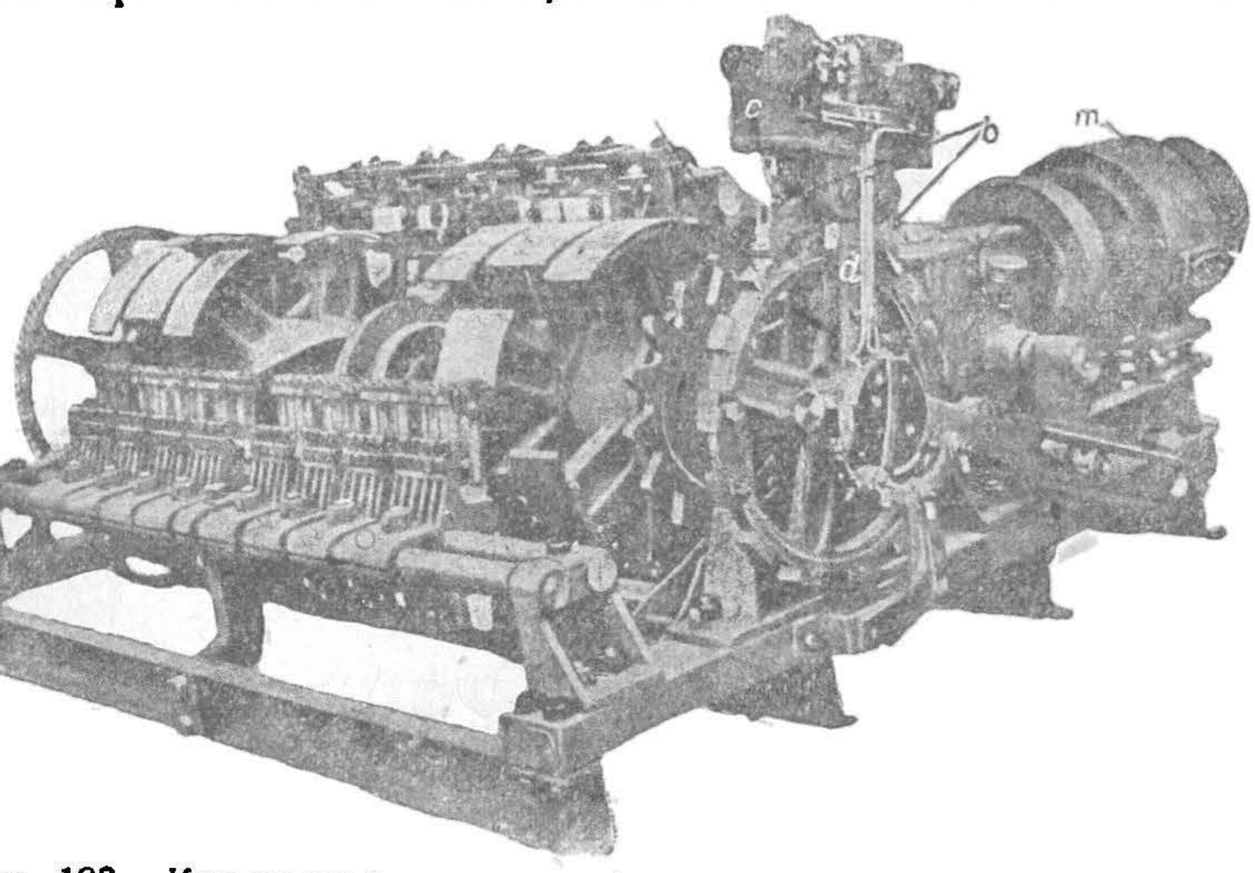


Рис. 193. Контроллер для электровозного управления системы Oerlikon'a.

НВ УДУНТ (ДІТ)

передвигается. Механизм так отрегулирован, что каждый такой поворот главного вала соответствует требуемому включению.

Рычаг *d* вместе с электромагнитами и кулачками получает колебательное движение от кривошипно-кулисного механизма, приводимого в движение через промежуточную червячную передачу двигателем *m*. Подобный контроллер может быть применен для токов до 2500—3000 А.

Барабанные контроллеры специального назначения. Барабанные реверсоры. В только что рассмотренной системе, как и в большинстве прочих систем, где приходится иметь дело с большими мощностями, реверсия движения поезда достигается путем применения отдельных барабанных реверсоров. Приведение их в движение обычно механизируется, причем передвижение главного барабана производится чаще всего с помощью электромагнитов (рис. 194). Возбуждая от вспомогательной цепи тот или другой электромагнит, можно получить перемещение главного барабана в нужную сторону. Иногда вместо электромагнитов ставят электропневматический привод. В этом случае рычаги, действующие на барабан, приводятся в движение сжатым воздухом, который давит на связанные с ними поршни. Впуск сжатого воздуха в рабочие цилиндры и выпуск его производятся с помощью небольших электромагнитных клапанов, и поэтому вся система называется электропневматической.

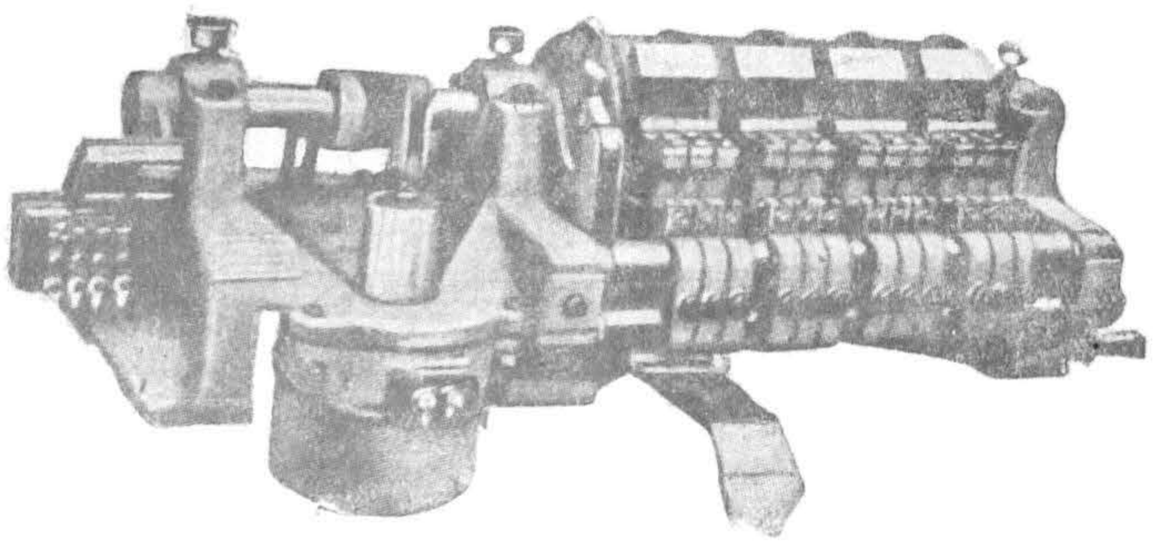


Рис. 194. Реверсор с электромагнитным приводом.

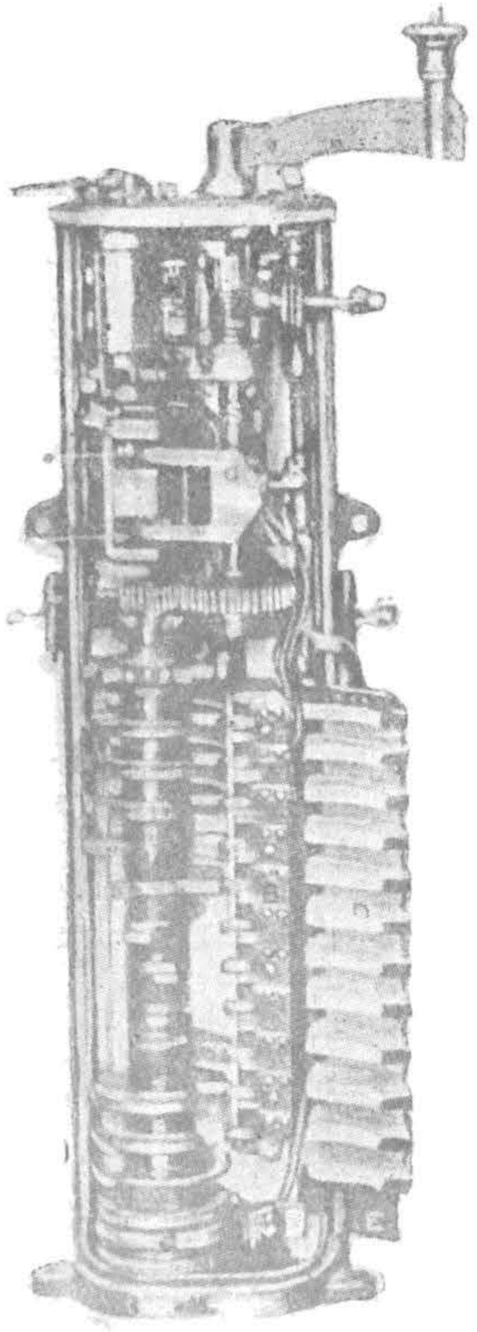


Рис. 195. Контроллер управления.

Контроллеры управления. Для приведения в действие мощных контроллеров и вообще механизированных систем необходимо производить ряд переключений во вспомогательных цепях управления. Может оказаться необходимым включать и выключать вспомогательные двигатели, различного рода электромагниты, реверсоры и прочие элементы управления. Для производства подобного рода манипуляций обычно применяются специальные небольшие барабанные контроллеры, так называемые контроллеры управления. Иногда их называют также контроллерами машиниста или майстерконтроллерами.

В основном по своей конструкции контроллеры управления не отличаются от рассмотренных контроллеров главных силовых цепей. Но конструкция их в значительной степени упрощается потому, что напряжения и токи во вспомогательных цепях нормально выбираются весьма малыми. Напряжение для питания цепей управления берется по большей части от специальных низковольтных мотор-генераторов или в случае переменного тока иногда от секций вторичных обмоток силовых трансформаторов. Напряжение, применяемое для этих целей, нормально колеблется в пределах от 30 до 120 V. Непосредственно от рабочего напряжения аппараты управления питаются значительно реже, чем от мотор-генераторов или трансформаторов. Во всяком случае, при питании от рабочего напряжения последнее не должно быть выше 750—1000 V.

Примером контроллера управления может служить тип, приведенный на рис. 195. Малая ручка рассматриваемого контроллера служит для реверсирования хода а большая — для основных переключений. Несмотря на относительно небольшие величины токов управления, контроллер снабжен дугогасительной катушкой.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Особой деталью, начинающей все чаще встречаться в современных контроллерах управления, является кнопка, называемая кнопкой безопасности На рис. 195 она показана на конце ручки контроллера. Назначение ее — выключить ток в случае какого-либо несчастья с машинистом. Принцип работы подобных приспособлений состоит в том, что цепь управления замкнута только при нажатой кнопке безопасности. Пока машинист способен работать, от него требуется одновременно с поворотом ручки давить на кнопку. В случае же

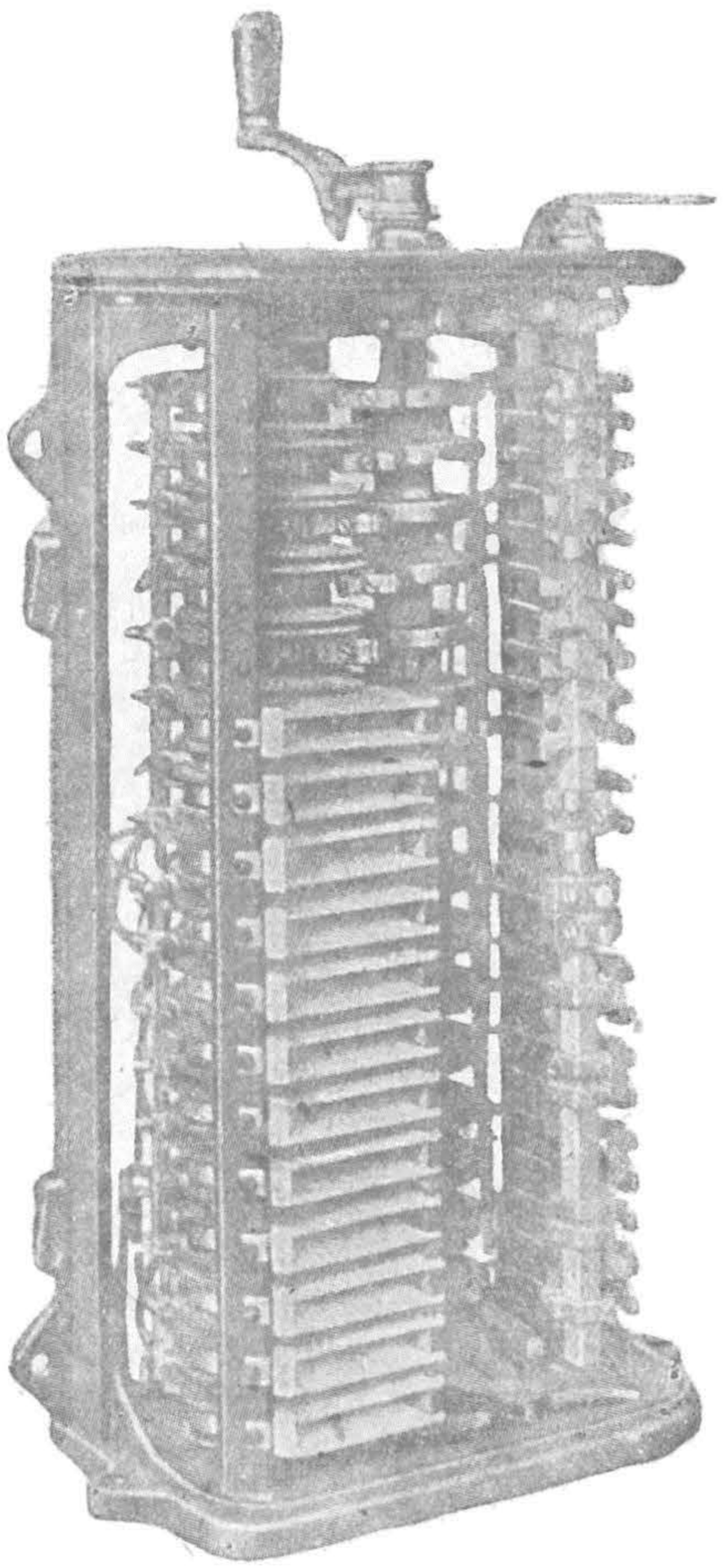


Рис. 196. Внешний вид контакторного контроллера

потери им сознания как это нужно ждать в большинстве случаев, это нажатие должно прекратиться, после чего тотчас же главная цепь размыкается, и система приходит в свое начальное, исходное положение. В большинстве случаев прекращение нажатия на кнопку вызывает и немедленное автоматическое действие поездных тормозов.

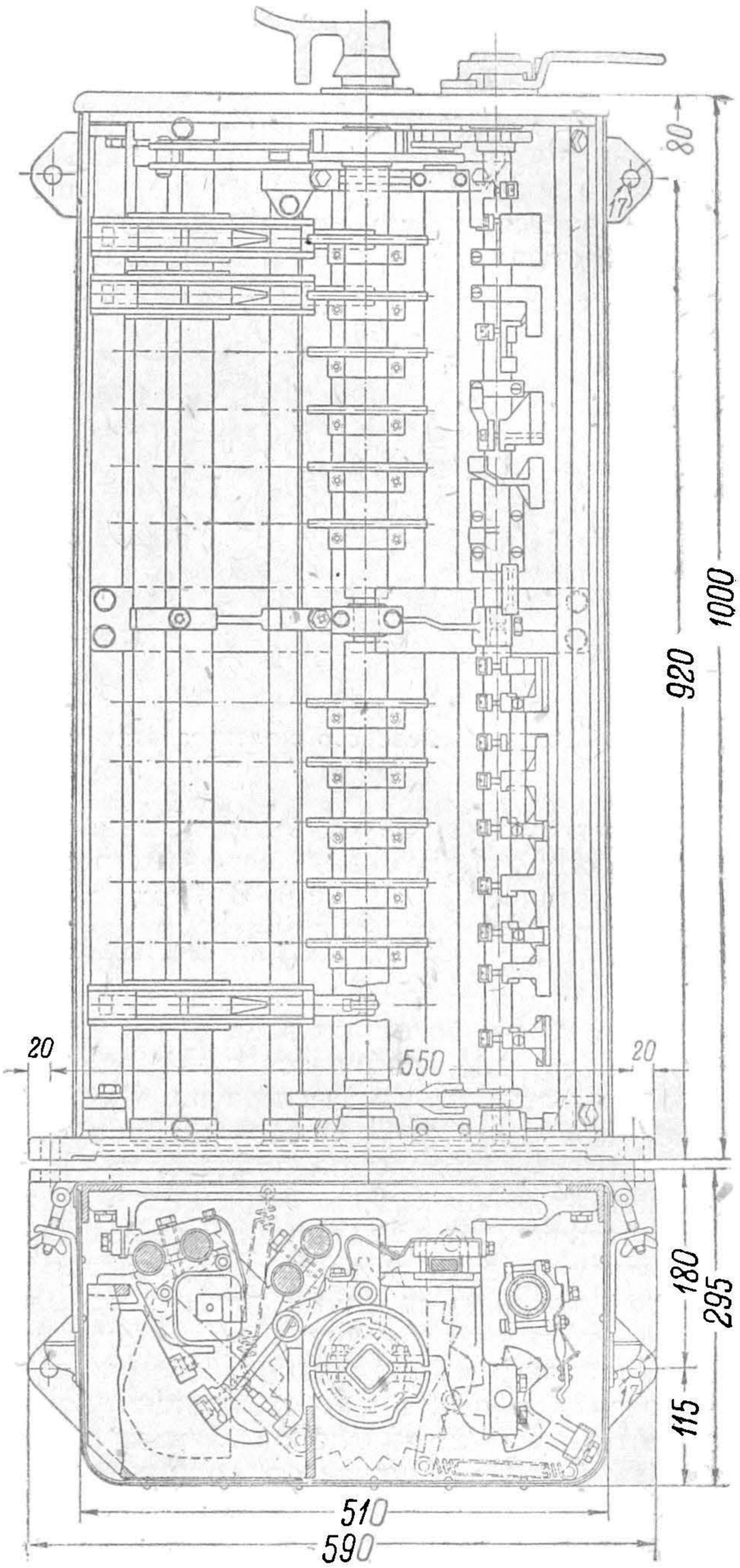


Рис. 197. Контакторный контроллер системы Bergmann'a.

Действие рассматриваемого приспособления чаще всего основывается на наличии в контроллере управления двух контактных пальцев, включенных последовательно в цепь управления. При нажатии на кнопку безопасности эти пальцы перекрываются передвижной пластиной. При прекращении же нажатия пружина, которая связана с этой пластиной и сила которой до этого преодолевалась надавливанием на нее

НВ УДУНТ (ДІІТ)

поршенька, действующего от кнопки, отводит от пальцев пластину и этим размыкает цепь управления, что в дальнейшем через соответствующие реле и вызывает выключение главной цепи.

Контроллеры ползунного типа. Вместо барабанных контроллеров имеются попытки применить контроллеры, в которых переключения в цепях двигателей достигаются передвижением ползуна. Таков, например, контроллер BBC, примененный этой фирмой в целом ряде ее электровозов. Для защиты главного контакта, передвигаемого ползуном с помощью винта, здесь применены вспомогательные выключатели. Последние выключаются и включаются автоматически с таким расчетом, чтобы принять на себя разрыв цепи, оставляя, однако, токопроводящую работу за основными контактами. Контроллеры подобного типа могут работать от руки или от механизированного привода.

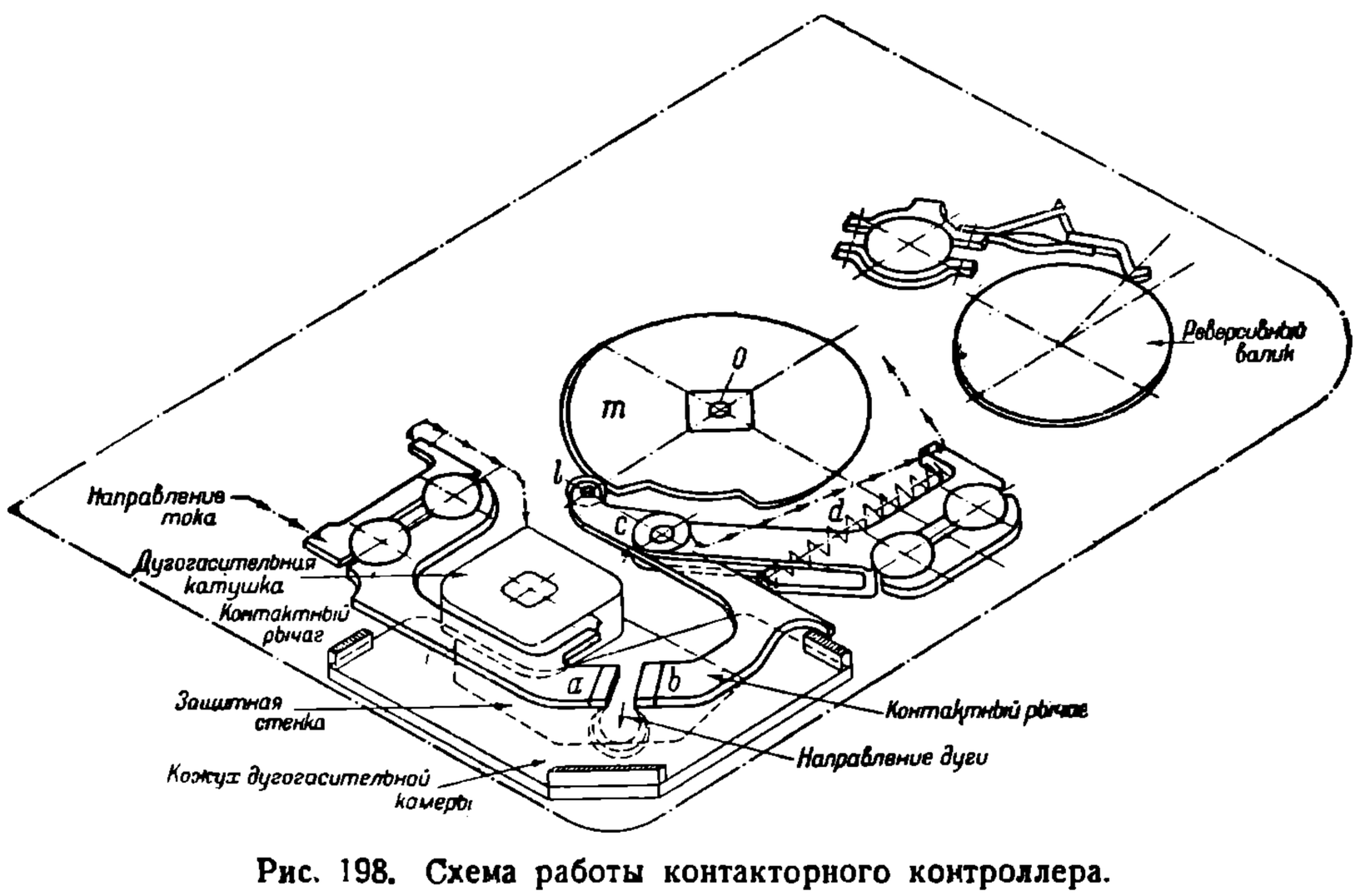


Рис. 198. Схема работы контакторного контроллера.

Контакторные контроллеры. Барабанные контроллеры имеют существенные недостатки как с механической, так и с электрической точек зрения. В механическом отношении они представляют собою механизм с большим трением, требующий для своего передвижения больших усилий. В электрическом отношении, особенно при больших токах, слабым местом их являются мало надежные контакты и в большинстве случаев недостаточно удовлетворительное дугогашение. Значительно более совершенными в настоящее время следует считать контроллеры контакторного типа (рис. 196).

В основе контакторных контроллеров, как показывают рис. 197 и 198, лежат отдельные выключатели, так называемые контакторы, состоящие из контактов *a* и *b*, рычага *c*, соединенного с подвижным контактом *b*, и пружины *d*. Управление контактами производится с помощью вала *o*, на котором насажены кулачковые секторы *m*. По поверхности последних катятся ролики *l*. В положении, взятом на рис. 198, контакты разъединены, но, как только тот или другой ролик окажется не на выступе, а во впадине соответствующего ему сектора, пружина *d* отожмет рычаг *c* и соединит контакты *a* и *b*. По проходе впадины ролик снова поднимается вверх и, преодолевая действие пружины, разъединит контакты. Конфигурация секторов и их положение подбираются так, чтобы включение и выключение отдельных контактов производилось согласно общей схеме управления. Для улучшения процесса дугогашения рассматриваемые типы контроллеров снабжаются дугогасительными катушками, действующими индивидуально на каждый контактор. В таких условиях дугогашение происходит энергично при правильном направлении магнитного потока. Изменение направления движения поезда в контакторных контроллерах производится особыми реверсивными валиками, по конструкции похожими на применяемые в контроллерах барабанного типа. Устройство блокировки и фиксаторов также основано на идее барабанных контроллеров.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Преимущество контакторных контроллеров — в более легком ходе, так как в данном случае вместо трения скольжения, происходящего в обычных конструкциях, происходит трение качения ролика. Кроме того, дугогашение здесь благодаря индивидуальным катушкам значительно более совершенно, чем у барабанных типов. В результате эксплоатация контакторных контроллеров более надежна и дешева. Осмотр их, как доказывает опыт, допустимо производить через каждые несколько недель, тогда как барабанные типы требуют регулярного осмотра и смазки через каждые пять-восемь дней.

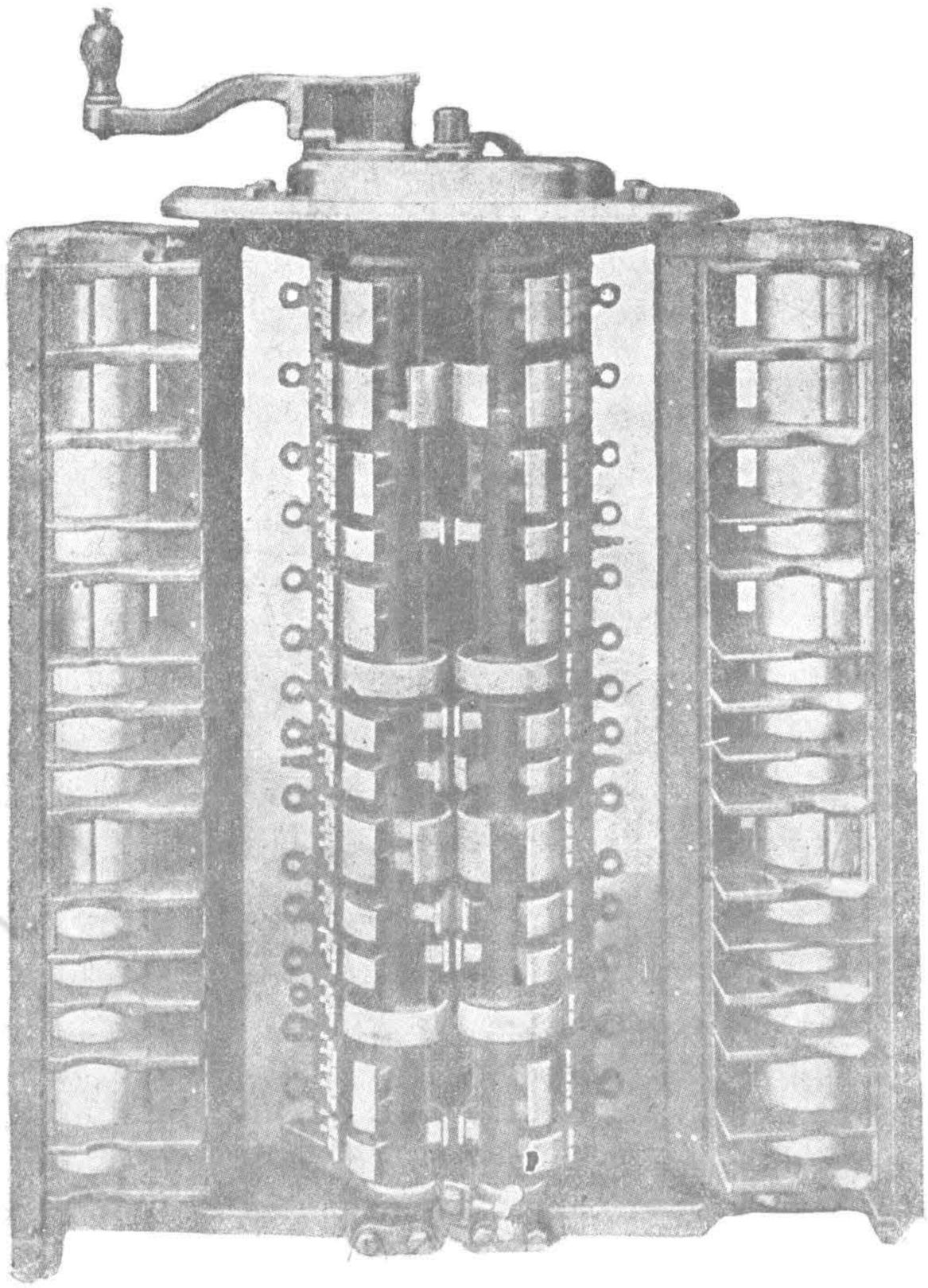


Рис. 199. Двухбарабанный контроллер.

Системы многих единиц и автоматизация при контроллерном управлении. Системы многих единиц при контроллерном управлении встречаются относительно очень редко, причем технически совершенными они могут быть только при механизированных схемах. В случае ручных приводов приходится прокладывать через весь поезд даже только при двух двигателях или двух группах их не меньше семи проводов силовой цепи. Несмотря, однако, на эти затруднения, попытки применить принцип многих единиц имеют место иногда и в трамвайной практике. Основы конструирования контроллеров при этом остаются обычными. Приходится только делать более солидными контакторные сегменты и пальцы, применяя в некоторых случаях для наиболее важных контактов по два параллельно работающих пальца.

При больших мощностях одного контроллера для осуществления указанных схем может оказаться недостаточно. В таких случаях можно обратиться к контроллерам двухбарабанного типа (рис. 199), примененных на одной из английских пригородных ж. д. Такой контроллер пригоден для двух тяговых единиц, причем каждая единица управляется отдельным барабаном. Вращение обоих барабанов, связанных зубчатым сцеплением, производится от одной общей ручки. Реверсивные валы здесь монтированы отдельно.

Автоматизация пуска при ручных контроллерах практически не может быть осуществлена. В контроллерах с механизированным приводом как система многих единиц, так и автоматизация пуска могут быть технически осуществлены вполне удовлетворительно. Однако, на практике такие схемы широкого распространения не получили.

4. Групповые контакторные системы управления.

Механические контакторы. Данные системы управления представляют собою развитие идеи контакторных контроллеров, хотя по времени они появились раньше последних. В основе их лежат механические контакторы (рис. 200 и 201), приводимые в действие от кулачкового вала. Кулачки, сидящие на таком валу, в определенном порядке нажимают на ролики *a* отдельных контакторов и производят соединения контактов. По освобождении роликов от давления кулачков пружина *b* разводит контакты. Дугогашение производится с помощью индивидуальных катушек *c*.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Электропневматический привод со связанными поршнями. Групповые контакторные системы приводятся в действие с помощью механизированных приводов. Для этих целей обычно применяются специальные электропневматические механизмы. Образец такого устройства, выполняемого фирмой GEC, приведен на рис. 202. В основе его лежит двухсторонний цилиндр 24 и 25, получающий сжатый воздух через клапаны 28 и 29. При передвижении поршней зубчатая рейка 21 поворачивает зубчатое колесо 19, наглухо закрепленное на основном валу

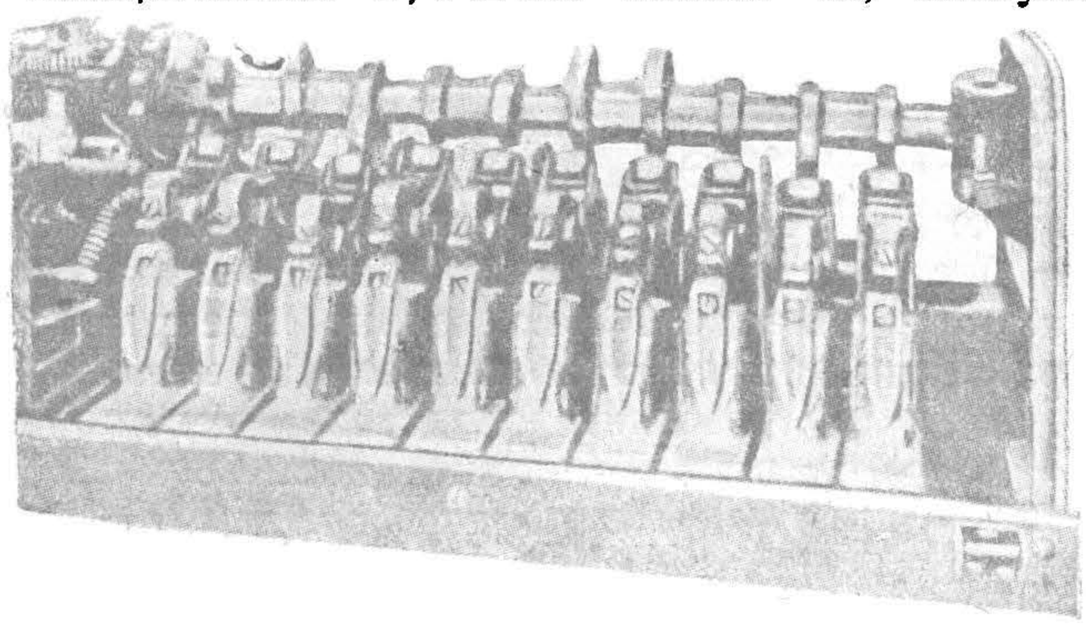


Рис. 200. Кулачковый механизм групповой контакторной системы GEC.

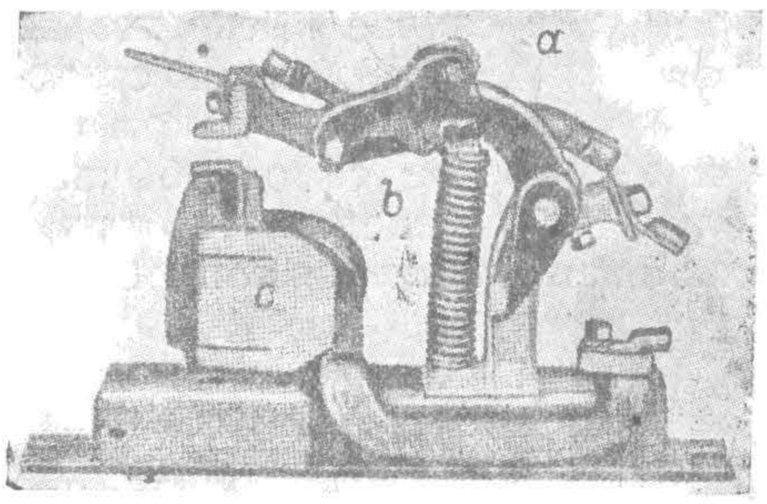


Рис. 201. Механический контактор.

механизма. На том же самом валу насажены в определенном порядке кулачковые секторы 17 В нужный момент кулачки в определенной последовательности нажимают на ролики контакторов 18, чем и достигается включение последних.

Передвижение рейки и поршней зависит от клапанов 28 и 29, из которых, в соответствии с их функциями, первый, носит название клапана впуска, а второй — выпуска.

Клапан 28 дает воздух в цилиндр 24 через отверстие 26 в том случае, если электромагнит его возбужден. В невозбужденном же состоянии он сообщает цилиндр 24 с атмосферой. Клапан 29, наоборот, открывает доступ воздуха в цилиндр 25 через канал 27 в невозбужденном состоянии и соединяет его с атмосферой в состоянии возбуждения. Передвижение рейки при нормальной работе производится вследствие большего давления на поршень 22, чем на поршень 23. В такие моменты оба клапана возбуждаются, благодаря чему производится впуск воздуха в цилиндр 24 и выпуск его из цилиндра 25. Основные моменты работы механизма таковы. В начальном положении клапаны 28 и 29 не возбуждены. Давление получается только со стороны поршня 23, и рейка становится в свое крайнее правое исходное положение. Для получения первой ступени дается ток в клапан 28, в результате чего сжатый воздух устремляется в цилиндр 24 и начинает давить на поршень 22. Последний встречает противодавление со стороны поршня 23, так как клапан 29 еще не возбужден, и цилиндр 25 не соединен еще с атмосферой. Под действием первой порции воздуха, поданной в цилиндр 24, рейка передвигается при неподвижном поршне 23 только на величину хода сжатия пружины 31, что и дает поворот вала 19, соответствующий первому положению.

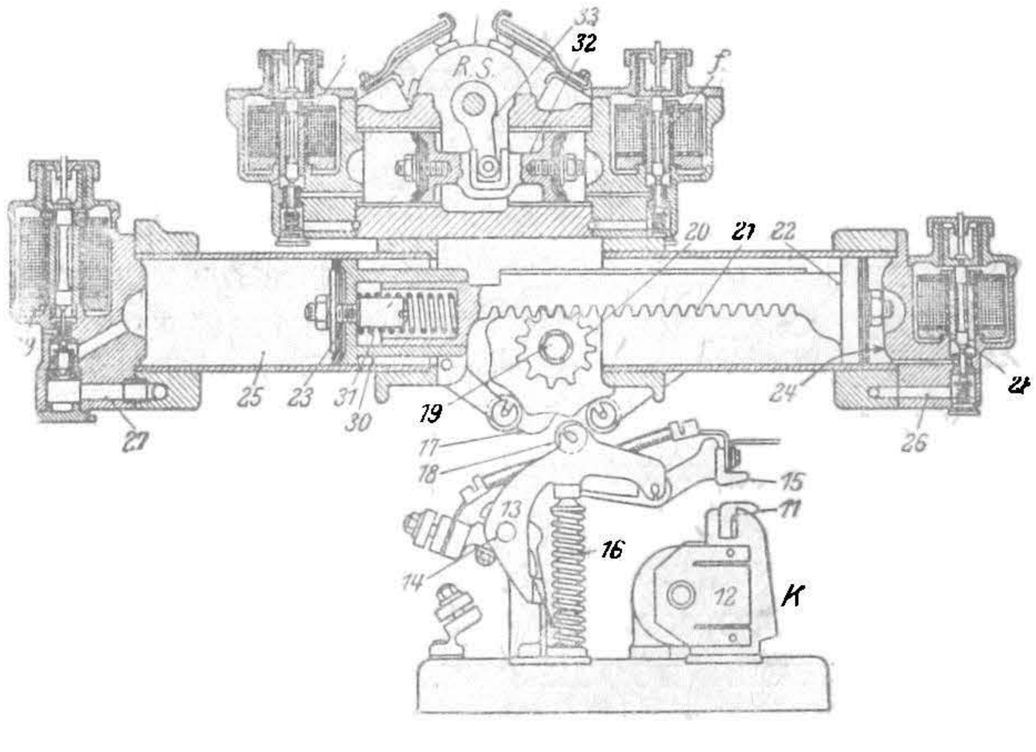


Рис. 202. Электропневматический механизм для групповой контакторной системы GEC.

Для получения второго положения дается ток в обмотку клапана 29. Часть воздуха из цилиндра 25 выпускается, и весь механизм начинает передвигаться влево вращая вал 19. Движение будет происходить до тех пор, пока не прекратится подача тока в обмотку клапана 29. В результате поступит новая порция воздуха в цилиндр 25, вследствие чего получится взаимное уравновешение давления на

НБ УДУНТ (ДІІТ)

поршни обоих цилиндров, и механизм остановится. Прекращение возбуждения клапана 29 достигается с помощью вспомогательных контактных пластин, разрывающих в нужный момент цепь клапана 29. Пластины эти сидят на вспомогательном валике, связанном зубчатым сцеплением с валом 19, и размыкают цепь, как только кулачки произвели все переключения, необходимые для второго положения. Таким же образом получаются и все дальнейшие ступени работы системы.

Для возвращения всего механизма в его начальное положение достаточно клапан 28 соединить с атмосферой, оставляя невозбужденным клапан 29. Очень часто возвращение механизма в его исходнбе положение приходится автоматизировать. Так, например, в случае прекращения подачи напряжения в зажимы рабочей цепи механизм обязательно должен становиться на „стоп". Это достигается нулевым реле напряжения, которое в таком случае автоматически разрывает цепь обоих клапанов 28 и 29. То же самое обычно имеет место и при действии кнопки безопасности в случае применения ее для кулачковых приводов. Как только прекращается надавливание на нее, в контроллере управления размыкаются специальные контактные пластины, следствием чего является размыкание цепей 28 и 29. Такой же эффект получается и при размыкании максимальных автоматов, сопровождаемом разрывом цепей 28 и 29.

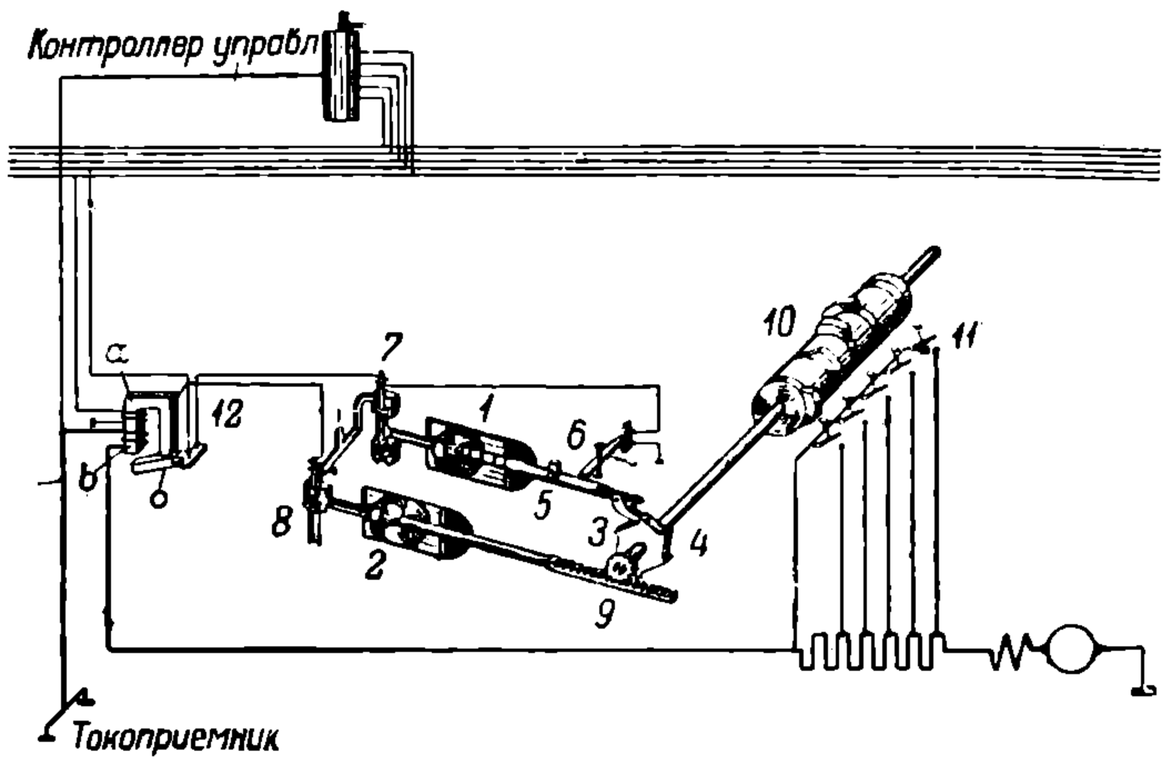


Рис. 203. Электропневматический механизм для групповой контакторной системы с независимыми цилиндрами.

В кулачковых системах управления реверсивный барабан чаще монтируется отдельно от главного механизма. В разбираемой системе они конструктивно объединены. В данном случае реверсор, обозначенный на схеме через R. S., работает от электропневматического привода. Основной частью его является контактный барабан *A*, приводимый в движение с помощью кривошипной передачи 33 от двухстороннего поршня 32. Передвижение поршня достигается путем впуска воздуха в реверсивный цилиндр через клапаны *r* и *f*. При повороте вправо или влево барабана *A* производится переключение зажимов якорных или индукторных обмоток, чем и достигается реверсия направления движения.

Кулачковый привод с независимыми цилиндрами. Разобранный тип кулачкового механизма получил очень широкое применение, особенно в американской практике. В настоящее время имеются и различные модификации этой системы. Из них следует обратить внимание на кулачковой механизм, примененный на пригородно-кольцевых ж. д. Берлина. Разработан он совместно фирмами Bergmann и Maffei-Schwarzkopf. Главное отличие его в том, что здесь для передвижения кулачкового вала применено два цилиндра (рис, 203). Цилиндр 1 служит для включения отдельных ступеней. Он получает сжатый воздух при возбуждении обмотки клапана 7 и передвигает вал кулачкового механизма с помощью собачки 3 и зубчатого колеса 4. Зубцы последнего так выполнены, что в результате каждого передвижения поршня вперед кулачковый вал поворачивается на нужную величину. После каждого такого движения вперед рабочий поршень посредством защелки 5 действует на рычажок 6, благодаря чему клапан 7 теряет возбуждение, и поршень возвращается пружиной в свое исходное положение. Для возвращения всего кулачкового механизма в положение "стоп" служит цилиндр 2, получающий сжатый воздух по прекращении тока в обмотке клапана 8. Возвратное движение механизма производится реечным зацеплением 9, причем поршень цилиндра 1 отводится в такое положение, что собачка 3 не препятствует этому движению.

Таким образом, в данной системе, как и в предыдущей, для выключения всего механизма и возвращения его в исходное положение достаточно прервать цепи 7 и 8. Этим методом и пользуются как для нормального выключения системы от руки машиниста, так и независимого от него. В последнем случае цепи могут выключаться через кнопку безопасности, а также и через максимальные и потенциальные реле.

НБ УИИНТ (ДІІТ)

Фиксаторы кулачковых приводов. При конструировании кулачковых механизмов необходимо обеспечивать для каждого поворота основного вала правильное положение кулачков по отношению к отдельным контакторам. Никаких сложных фиксаторов кулачковые механизмы в большинстве случаев не имеют. Достижение правильного положения вала получается путем соответствующего подбора и регулировки отдельных частей основного механизма с добавлением фиксаторов, напоминающих указанные выше типы, применяемые в нормальных контроллерах. Находят себе применение иногда и специальные фиксирующие приспособления, как, например, в механизме ВВС (рис. 204). В данной конструкции фиксатором является двуплечий рычаг *k*. В положении, представленном на рис. 204, механизм находится в покое. Обмотка *s* клапана впуска *q* находится под током, а обмотка *t* клапана выпуска без тока. Для производства движения обмотка *t* возбуждается;

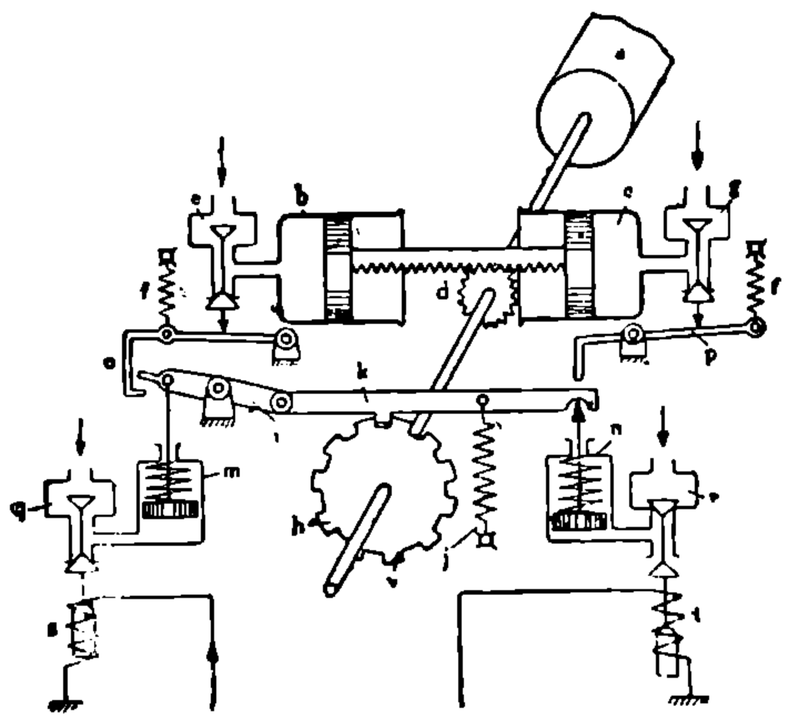


Рис. 204. Электропневматический привод для групповой контакторной системы ВВС.

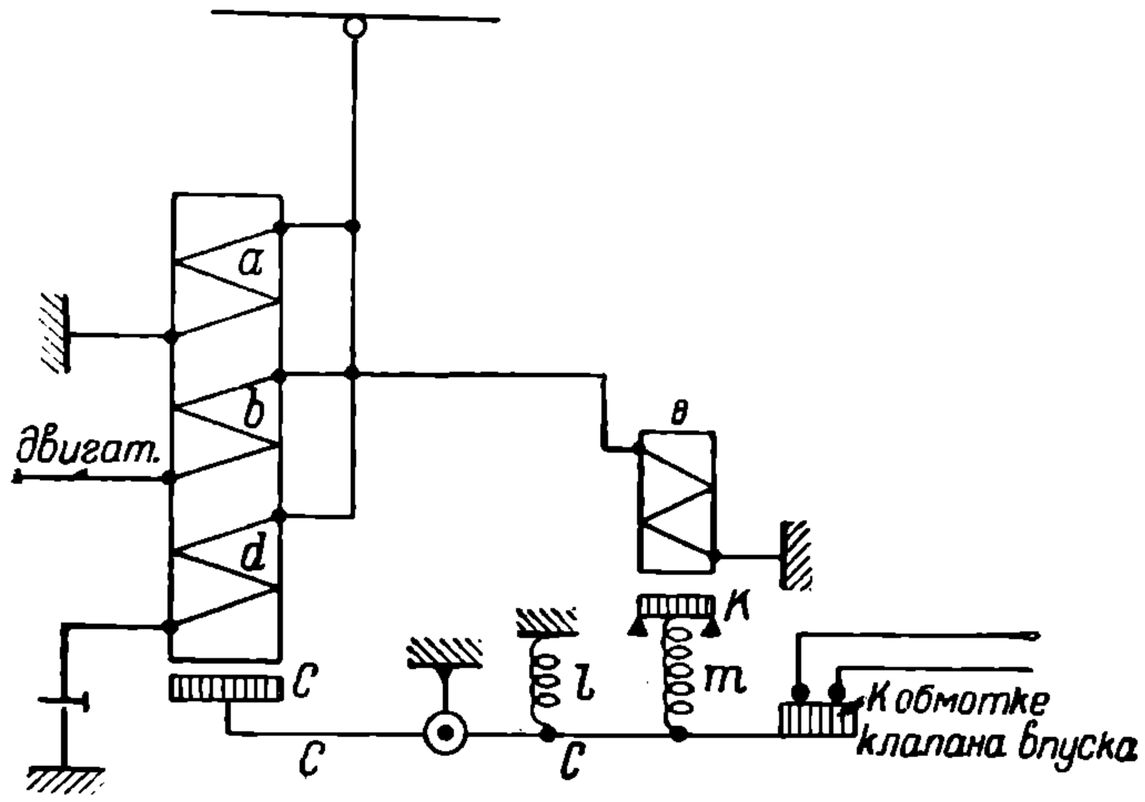


Рис. 205. Схема пускового реле пригородных ж. д. Берлина.

в цилиндр *n* проникает воздух; рычаг *k* поднимается, освобождая главный вал от защелки, и одновременно через рычажок *p* сообщает цилиндр *c* с атмосферой. Давление в цилиндре *b* преодолевает давление в *c*, и главный барабан *a* перемещается. Как только он передвинут в требуемое положение, через связанные с ними вспомогательные контакты выключается ток в обмотке *t*, после чего восстанавливается положение равновесия с одновременным защелкиванием. Для возвращения механизма на „стоп" достаточно разомкнуть цепь обмотки *s*, в результате чего за счет разрежения в цилиндре *m* и взаимодействия рычагов *k* и *o* воздух из цилиндра *b* выпускается, и механизм передвигается под действием давления в цилиндре *c*.

Схемы управления при кулачковых приводах. В случае применения кулачковых механизмов очень удобно осуществлять принцип автоматического управления поездом. Общий принцип такой автоматизации можно видеть из уже приведенного на рис. 203. Пусковой автомат 12 содержит две обмотки *a* и *b*. Первая — вспомогательная, для уравновешения подвижной части аппарата, а вторая — основная. При уменьшении пускового тока до I_{min} имеет место картина, изображенная на рис. 203. В этом положении механизм находится в состоянии движения, включая следующую ступень реостатов. В тот момент, когда данная ступень будет включена и получится ток I_{max}, контактная пластина *c* притягивается к противоположному концу магнита, и цепь рабочего клапана 7 размыкается. При таком положении цилиндр 1 сообщается с атмосферой, и механизм приходит в состояние покоя. Следующий этап работы начинается, когда ток снова падает до I_{min}.

В некоторых случаях пусковые автоматы осложняются добавочными деталями. Примером могут служить последние типы берлинских пригородно-кольцевых дорог (рис. 205). Здесь реле, помимо нормальных функций, приспособлено к тому, чтобы обеспечивать постоянный пусковой ток в цепи как при последовательном, так и при параллельном включении групп двигателей. Благодаря этому при переходе с последовательного на параллельное включение в цепи каждого двигателя ток

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

должен понизиться в два раза. Задача реле — осуществить переход на параллельную работу в такой момент работы двигателей, когда включенные параллельно цепи двигателей не требуют слишком большого увеличения тока от сети.

В приведенной схеме обмотки *a* и *b* выполняют те же функции, что и на рис. 203. Обмотка же *d* предназначена для переходного положения. Она включается от вспомогательных контактов на последней последовательной ступени. Действие ее таково, что она задерживает в притянутом положении пластину *c*, пока ток не упадет до величины близкой к $0{,}5I_{min}$ При таком положении токи сети для последовательного и параллельного соединения будут одного порядка. Кроме того, приведенная схема дает возможность вариировать ускорения. На указанных дорогах в черте города было признано рациональным применять ускорение 0,5 m/sec², а за городом при больших пролетах между станциями всего только 0,3 m/sec².

Управление автоматизируется как для первого, так и для второго ускорения. Осуществляется это с помощью электромагнита *e*. Для перехода на бо́льшее ускорение возбуждается его обмотка. Вследствие притяжения якоря *k* натяжение пружины *m*, производящей совместно с основной пружиной *l* отрыв якорного рычага *c* от магнита, возрастает. Благодаря этому, ток, при котором это происходит, увеличивается с I_{min}, нужного для 0,3 m/sec², до I_{min}, необходимого для 0,5 m/sec². Результатом увеличения I_{min} является и последующее возрастание I_{max}. Общий вид реле берлинских дорог можно видеть из рис. 206.

Образец схемы соединений при кулачковом групповом механизме приведен на рис. 207 В данном случае управление всеми механизмами производится от напряжения сети. Система автоматизирована. Как следует из схемы включения (рис. 208), в главную цепь двигателей, помимо их обмоток, включены сопротивления, линейные контактные выключатели *B*, обмотка пускового автомата *S*, и обмотки для реле перегрузки IV и V. Все необходимые манипуляции по переключению в главной цепи выполняются кулачковым барабаном VIII.

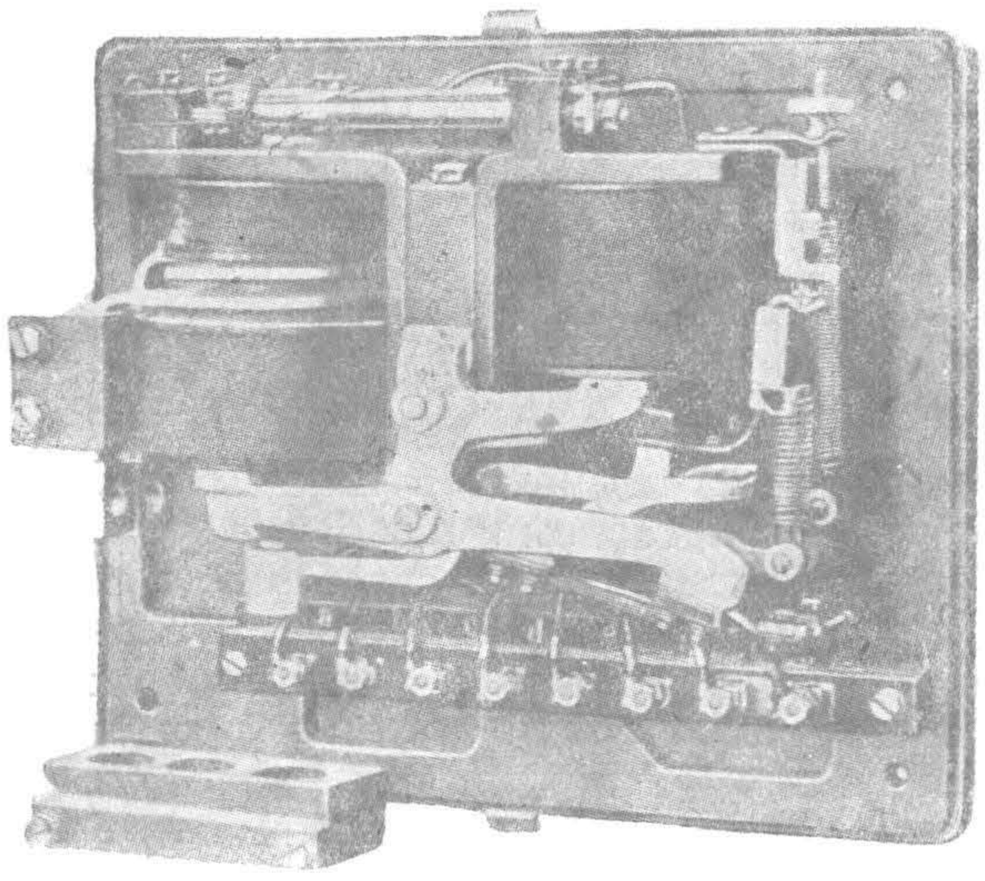


Рис. 206 Общий вид пускового реле берлинских ж. д.

В качестве механизма, приводящего в движение кулачковый вал, здесь применен электропневматический привод по типу рис. 202, но только без пружины 31. Благодаря этому, первое положение осуществляется при действии не только клапана впуска, но и клапана выпуска. Обмоткой управления для клапана впуска является обмотка XXI, а для клапана выпуска XXII. Все необходимые операции по включению этих клапанов производятся совместным действием распределительного валика IX, перемещающегося вместе с главным барабаном VIII, и пускового автомата XVI.

Общее управление осуществляется контроллером машиниста XV Основной барабан его *a* ведает производством главных операций. Он имеет три положения: первое — подготовительное, второе — для автоматического осуществления всех положений последовательного включения двигателей и третье — для осуществления того же при параллельном их включении. Кроме этого, контроллер управления имеет реверсивный барабан *b*. Последний дает ток или в обмотку XXIII или в обмотку XXIV привода реверсора. Последний передвигает главный реверсивный вал VI, переключающий направление тока в обмотках возбуждения двигателей, а одновременно перемещает и распределительный валик XI. Назначение последнего — производить блокировку путем включения или выключения с помощью вспомогательных обмоток тех реле и выключателей, без включения которых нельзя замкнуть главную цепь.

Помимо рассмотренных валиков, в распоряжении машиниста имеется еще валик *c*. Назначение его — приостанавливать автоматизацию и производить от руки усиление или уменьшение пусковых ускорений, на которые отрегулирован автомат.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

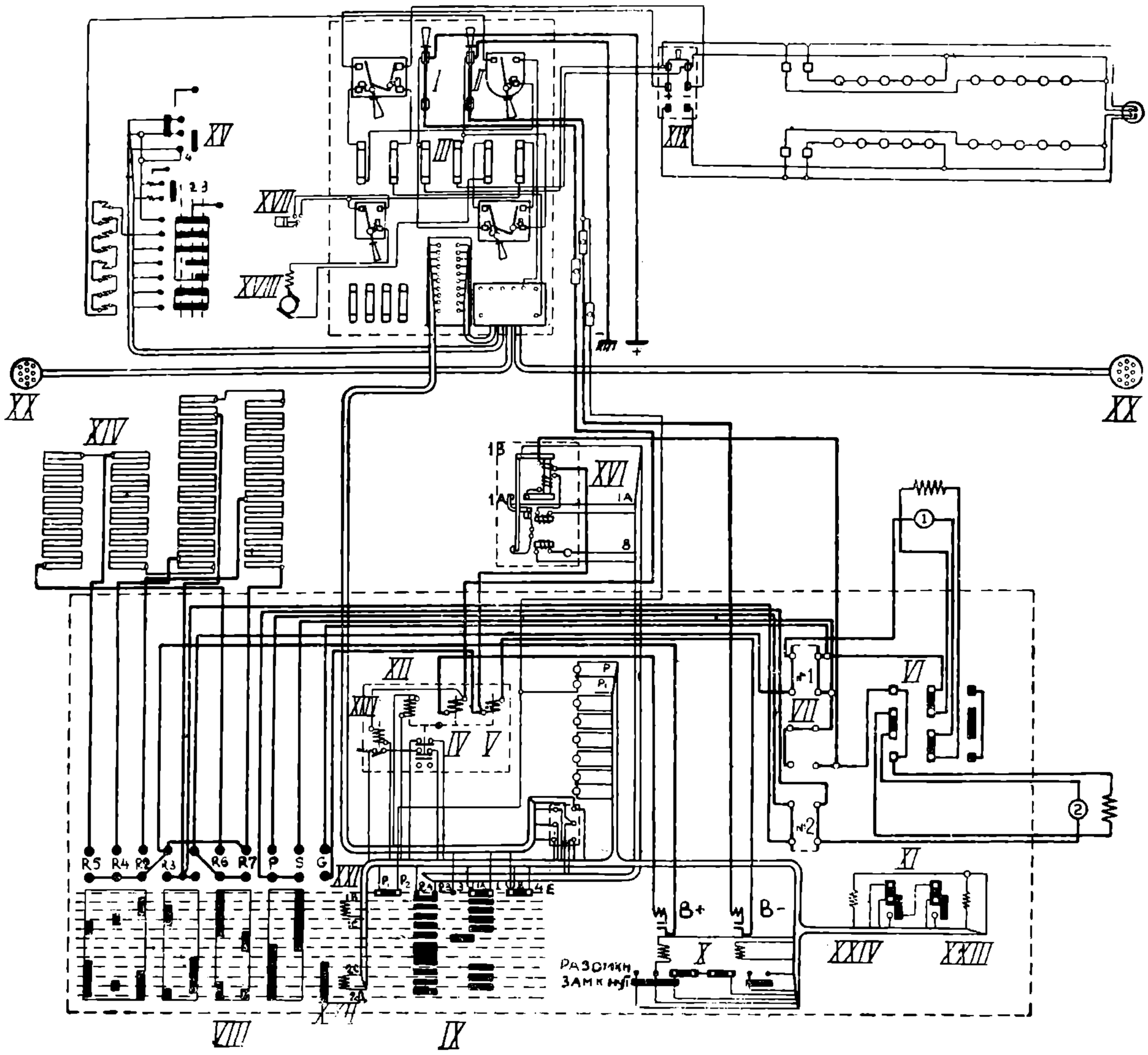


Рис. 207. Общая схема группового автоматического управления при электропневматическом приводе.

Обозначения.

I—Главный разъединитель.
II—То же.
III—Предохранители.
IV и V—Обмотки реле перегрузки.
VII—Переключатель для включения отдельных групп двигателей.
VIII—Кулачковый барабан главной цепи.
IX—Распределительный барабан в цепи управления.
B+ и B—Главные линейные контакторы.
X—Барабан для включения блокирующих контактов.
XI—Барабан для включения обмоток, управляющих реверсором.
XII—Обмотка для включения реле перегрузки.
XIII—Обмотка реле напряжения.
XIV—Реостаты.
XV—Контроллер управления.
XVI—Пусковой автомат.
XVII—Компрессор.
XVIII—Его двигатель.
XIX—Цепь освещения.
XX—Штепсельная коробка для магистрали многих единиц.
XXI—Обмотка клапана впуска.
XXII—Обмотка клапана выпуска.
XXIII и XXIV—Обмотки клапанов реверсора.

Важное значение в системах управления имеют автоматические выключатели. В разбираемой системе для большей надежности работы с точки зрения дугогашения взяты два выключателя $B+$ и $B-$, защищающие схему в ее начале и конце. Включение автоматов производится с помощью обмоток $LB+$ и $LB-$, при разрыве тока в которых автоматы тотчас выключаются. Автоматизация действия выключателей достигается с помощью реле перегрузки, имеющей три обмотки IV, V и XII. Первые две являются последовательно включенными в главную цепь, а третья работает от цепи управления. Включение реле перегрузки производится обмоткой XII через контроллер управления (рис. 208) и сопровождается оно замыканием контактов Р. П. Автоматизация выключения достигается путем воздействия на реле обмоток IV и V, включенных диференциально с обмоткой XII. При опасных токах

НВ УДУНТ (ДІІТ)

действие обмотки XII преодолевается, и реле выключается, размыкая контакты Р.П. Кроме того, на линейные выключатели действует также реле нулевого напряжения XIII, разрывающее Р.Н. (рис. 207 и 208).

Включение и выключение автоматов $B+$ и $B-$ сопровождается перемещением валика X, предназначаемого для блокировочных контактов $L+$ и $L-$

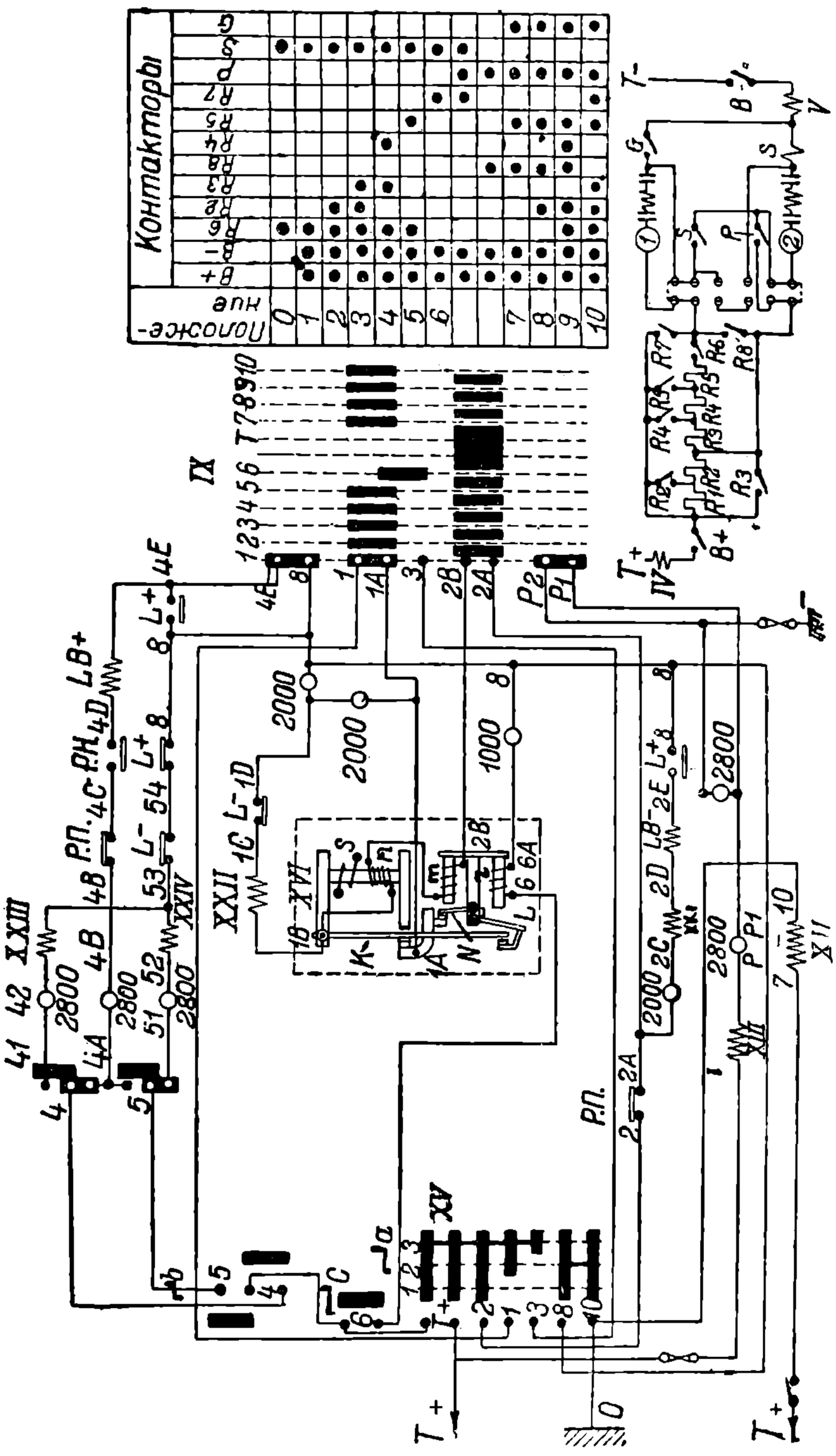


Рис. 208. Цепь управления к рис. 207.

Работа системы начинается с поворота ручки реверсора b, и установки ручки a контроллера управления на положение 1. При таком включении (рис. 208), прежде всего подается ток в обмотки реле перегрузки и напряжения. Образуется цепь T—4—41—42—53—54——8—10—0. Реверсор поворачивается в данном случае на положение вперед, и в следующий момент связанный с ним распределительный валик устанавливает соединения, представленные на рис. 208. В этом положении получается цепь: T—4—4A—4B—4C—4D—4F——8—10—0. Обмотка $LB+$ получает ток, главный контактор включается, что влечет за собою включение блокирующих контактов $L+$ между точками 4E—8 и выключение $L+$ между точками 54—8. Вслед за этим устанавливается вторая цепь: T—2—2A—2C——2D—2E—8—10—0. Это вызывает включение второго автомата $LB-$ и обмотки клапана впуска XXI, в результате чего главная цепь оказывается замкнутой и электропневматический привод подготовленным к работе.

После этого ручка контроллера управления передвигается на положение второе. Получается цепь: T—1—1A—1B—1C—1D——8—10—0. Возбуждается клапан выпуска XXII, из соединенного с ним цилиндра выходит воздух, и главный кулачковый барабан начинает передвигаться в положение 2. Вместе с главным барабаном передвигается и валик IX. Последний в промежуточном положении между 1 и 2 размыкает предыдущую цепь и замыкает проходную цепь: T—2—2A—2B—1B—1C——1D—8—10—0. Это вызывает притяжение якоря K пускового автомата к наконечникам его магнитов, причем электрическое соединение между K и магнитами, а также и рычажками L и N в этом положении не имеет места. В таком положении якорь задерживается главной обмоткой S, независимо от того, есть ли ток в обмотке n,

НБ УДУНТ (ДІІТ)

до тех пор, пока главный ток не упадет до I_{min}. По прохождении промежуточного положения и достижения положения 2, кулачковый механизм останавливается, так как обе цепи, проводящие ток через обмотку выпуска XXII, разрываются, одна — по причине притяжения якоря *K*, а другая из-за разрыва контакта 2*A*—2*B*. Это происходит до того момента, когда главный ток уменьшится до I_{min}. После этого якорь *K* отскакивает и замыкает снова цепь клапана выпуска XXII. Дальше механизм приходит в движение, и картина повторяется до тех пор, пока не получается последнее последовательное положение 6. На этой ступени механизм останавливается и может задерживаться столько времени, сколько необходимо. Движение вала возобновляется, когда ручка контроллера управления ставится на следующее положение 3. Последняя операция через контакты 3—1A валика IX замыкает цепь для обмотки клапана XXII и вызывает дальнейшее передвижение вала в таком же порядке вплоть до последнего параллельнаго положения 10.

В случае необходимости изменить ускорение, на которое отрегулирован пусковой автомат, машинист действует на валик *c*. Получается цепь: *T*—6—6*A*—8—10—0. Это влечет за собой притяжение рычага *L*, замыкающего цепь: *T*—1—1*A*—*N*—*L*—*K*—1*B*——1*C*—1*D*—8—10—0. Как только эта цепь составилась и ток прошел через XXII, механизм перемещается на следующее положение независимо от величины тока в главной цепи. При движении механизма на переходных положениях ток в обмотке *m* вызывает притяжение рычага *N*, который в дальнейшем удерживается в притянутом состоянии до тех пор, пока имеется ток в обмотке *r*. После притяжения рычага *N*, как только при вращении барабан IX разомкнет контакторы 2*A*—2*B*, механизм останавливается. Для дальнейшего его передвижения машинист должен повернуть в обратном направлении валик *c*, разомкнуть цепь обмотки *r* и снова включить *c*. Оперируя валиком *c*, управляющий поездом может по желанию ускорять или замедлять процесс включения отдельных ступеней и этим влиять на ускорение поезда.

Разобранная схема управления может быть применена и в случаях систем многих единиц. Для осуществления ее имеются штепсельные муфты XX, с помощью которых все магистрали отдельных вагонов гибким кабелем со штепселями соединяются в одну общую поездную магистраль. Нетрудно видеть, что при наличии этой магистрали достаточно оперировать с контроллером управления в каком-либо одном вагоне, чтобы во всех вагонах совершались одни и те же соединения.

Нужно указать, что рассмотренная система управления поездом в отношении основных принципов работы близка к групповой системе, выполняемой з. им. Кирова, для пригородных железных дорог СССР. Наиболее важным отличием последней служит то, что в ней первое положение является не только подготовительным к автоматизации, но и ездовым маневровым при включении полного пускового сопротивления. Кроме того, в системе дорог СССР больше пусковых ступеней, применена шунтировка, несколько иначе расположены автоматы, вспомогательные цепи питаются от мотор-генератора, а также имеются и другие непринципиальные отличия.

Кулачковый привод с электрическим сервомотором. Разобранные системы кулачковых групповых механизмов базируются на применении электропневматических приводов. Другим вариантом разрешения вопроса о приводе может служить применение для передвижения механизма электрических двигателей, носящих название сервомоторов. Идея их применения возникла уже давно. Образцом может служить система Bergmann'a, имеющая в настоящее время применение на части вагонов берлинского метрополитена и берлинских пригородных ж. д. Эта система может выполняться и для простого управления и для автоматического. На рис. 209 приведена схема управления с автоматизацией пуска. Поворот кулачкового вала *M* производится с помощью электродвигателя *I*. При нажатии кнопки *B* контроллера управления *A* двигатель начинает вращаться и через зубчатую передачу *a* передает вращение валу *b*. На последнем насажены цилиндр *d* и фасонный барабан *c*. Цилиндр *d* вращается вместе с валом *b* и может передвигаться одновременно в осевом направлении. Пружина *g* прижимает цилиндр *d* к барабану *c*. Последний может свободно вращаться на валу *b*, но аксиального перемещения не имеет. На торце барабана *c*, обращенного к цилиндру *d*, имеется специальный вырез, в который входит ролик *f*, укрепленный на торцевой части цилиндра *d*. Благодаря этому, барабан *c* может вращаться вместе с валом *b*. Если нажатием кнопки *B* контроллера управления подвести ток к катушке *K*, то последняя, втягивая свой сердечник посредством рычага *i*, повернет вал *p*. При этом храповик *k*

НТБ УГУНТ (ДІІТ)

входит в вырез *l* барабана *c*, который вследствие этого перестает вращаться. Но так как цилиндр *d* продолжает свое вращение вместе с валом *b*, то ролик *f* начинает катиться по вырезу в торце барабана *c* и отжимает цилиндр *d* в направлении, указанном стрелкой *m*. При дальнейшем повороте и сдвинутом положении цилиндра *d*, штифт *n* зацепляет вырез мальтийского креста *o* и поворачивает его

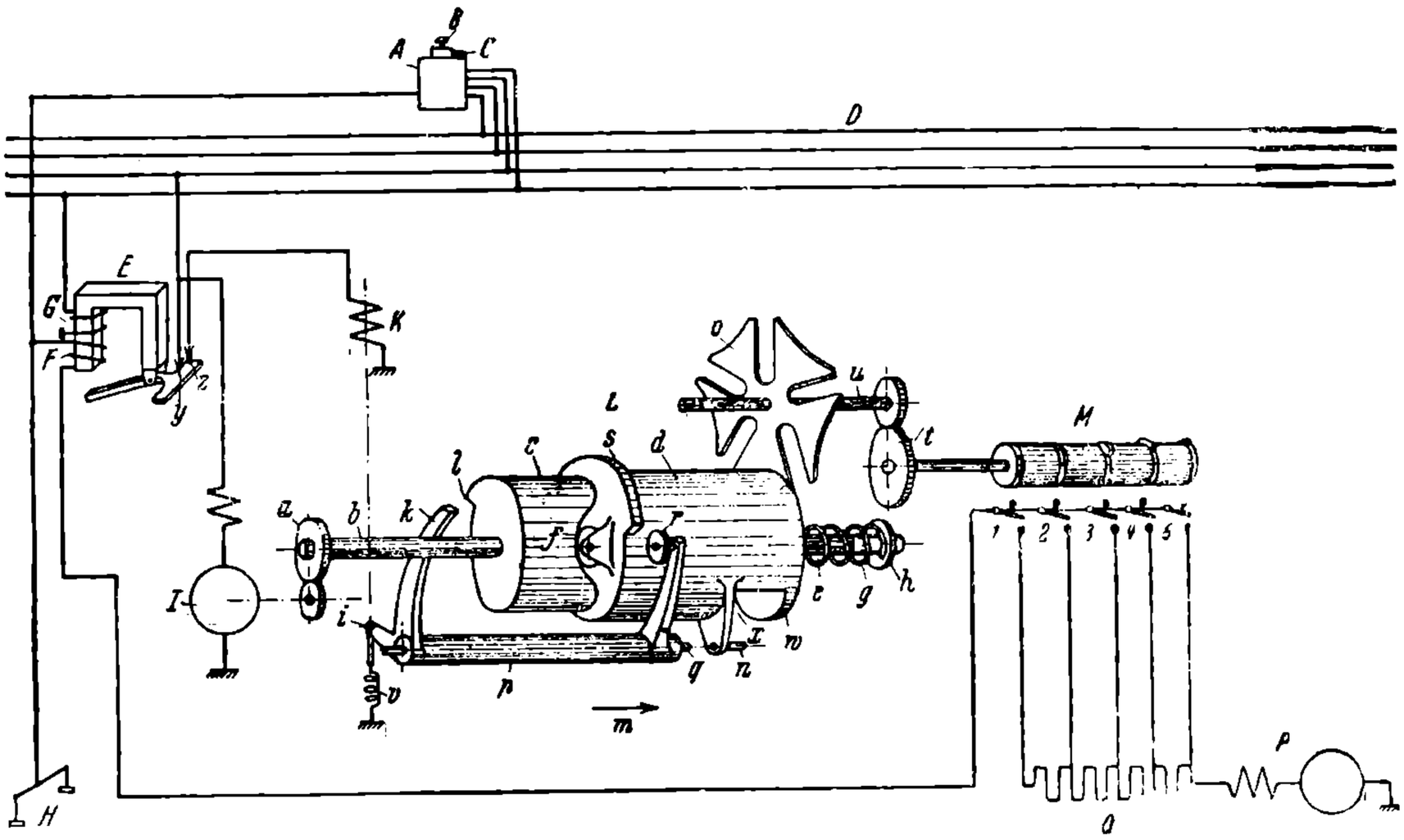


Рис. 209. Схема группового управления с электрическим приводом.

на один зубец, а следовательно, через передачу *t* и связанный с ним кулачковый вал групповых контакторов. Контактор 1 замыкается, и через тяговый двигатель *P* проходит ток — поезд начинает двигаться. Ток двигателя, проходя по катушке *F* пускового реле *E*, притягивает якорь; контакты *y* и *z* размыкаются. Цепь катушки *K* разрывается, и пружина *v* отводит палец храповика *k* от *l*. Ролик *f* снова попадает в вырез барабана *c*, цилиндр *d* сдвигается вдоль оси вала в прежнее положение. Барабан *c* начинает вращаться вместе с цилиндром *d*. Как только ток в двигателе падает до величин I_{min}, контакты *y* и *z* снова замыкаются, катушка *K* возбуждается, и процесс повторяется снова.

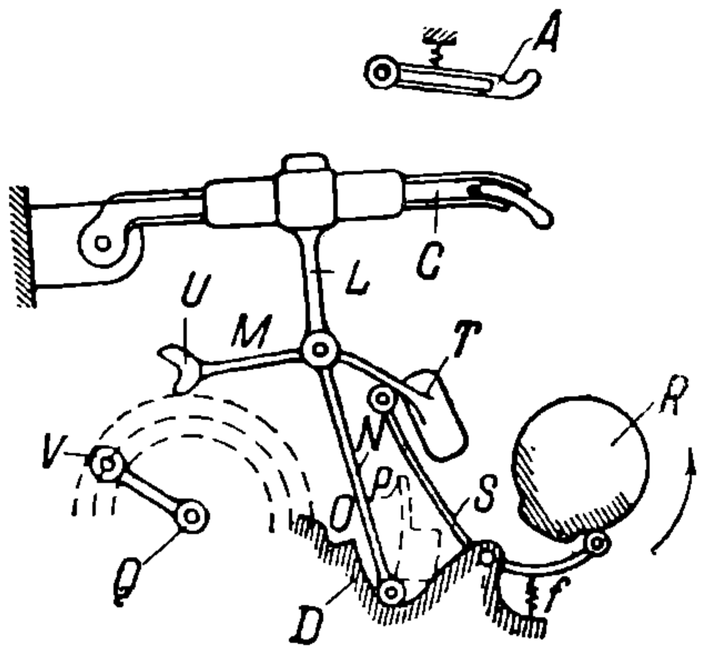


Рис. 210. Схема кулачково-рычажного привода при разомкнутом положении контактов.

Для того, чтобы обеспечить поворот кулачкового вала на одну ступень до конца, сделано следующее приспособление. На валу *p* защелки сидит рычаг *q*, на конце которого имеется ролик *r*. Как только цилиндр *d* сдвигается по направлению стрелки *m* в крайнее положение, специальный кулачок *s* цилиндра *d* попадает в плоскость ролика *r*. Поэтому храповик *k* остается в соприкосновении с барабаном *c*, пока цилиндр *d* не сделал полного оборота, т. е. пока кулачковый вал групповых контакторов не повернулся до конца в следующую позицию (Л. 122).

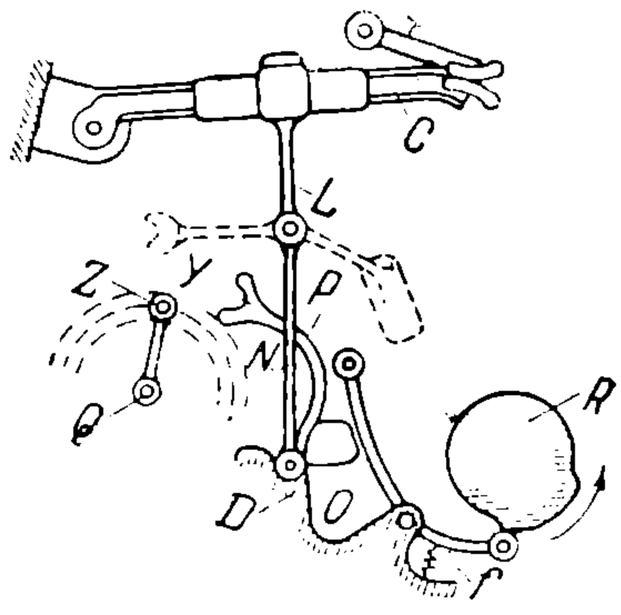


Рис. 211. Схема кулачково-рычажного привода при замкнутых контактах.

Рычажно-кулачковая групповая система контакторного управления (*JCM*). Идея данного устройства, начинающего получать применение во Франции, видна из рис. 210 и 211. В основе его лежит приведение в движение подвижного контакта *C* контактора с помощью рычажной системы *LMNP*, кулачкового вала *R* и качающихся рычагов *V* и *Z*, сидящих на валу *Q*. Для включения контактора прежде

НТБ УГУНТ (ДІІТ)

всего дается определенный поворот валу *R*. Последний своим выступом нажимает на ролик рычага *S*, заставляя его с роликом противоположной стороны опустить книзу вилку *U*. В следующий момент по этой вилке ударяет качающийся рычаг *V*, и механизм, поднимаясь вверх, дает соединение контактов. Рис. 210 представляет контактор в разомкнутом положении, а рис. 211 в замкнутом. Для выключения контактора используются новые части механизма, рычаги *P* и *Z*. В нужный момент вал *R* поворачивается и опускает ролик рычага *S* вниз. Противоположный ролик под действием пружины *f* наклоняет вилку *Y*, получающую в следующий момент удар со стороны рычага *Z*. В результате рычажная система отбрасывает вниз, и контакты размыкаются.

Выключение тока производится двумя парами контактов — главными, выключающимися в первую очередь, и вспомогательными, легко заменимыми, принимающими на себя последнюю стадию разрыва; на приведенной схеме эти контакты объединены в один общий, дабы упростить схему. Токопроводящие части контактора отделяются от рычажной системы с помощью стержня, покрытого бакелитовой изоляцией. Для магнитного дутья имеется дугогасительная катушка. Она включена параллельно главным контактам и начинает работать только после их разъединения, создавая магнитное поле для вспомогательных контактов.

Приведение в движение валика *Q*, идущего вдоль всех контакторов, производится с помощью электромагнита, включаемого и выключаемого или от руки или автоматически. При перемещении вал *Q* с помощью собачек захватывает в нужные моменты храповые колеса, сидящие на валиках *R*, причем каждому контактору соответствует свой такой валик. Передвижение валиков *R* в дальнейшем вызывает те операции, о которых было уже сказано. В некоторых случаях допустимо одним и тем же валиком путем посадки нужного количества кулачков обслужить до трех отдельных контакторов.

Главное преимущество системы *JCM* в ее легкости. Ее привод должен быть рассчитан на приведение в движение только одного или двух контакторов. Как только каждый данный контактор оказывается включенным или выключенным, он становится независимым от привода. При нормальных же кулачковых приводах все включенные контакторы своими роликами сильно давят на кулачки, и тогда необходимы большие усилия для вращения вала (Л. 111).

Все рассмотренные выше групповые кулачковые системы управления работают с механическими контакторами, контакты в которых осуществляются путем механических давлений. Кроме этих систем, иногда применяются групповые системы с пневматическими контакторами. Осуществление контактов в последних производится с помощью действия сжатого воздуха. В пневматической части они близки по конструкции к приводимым ниже электропневматическим контакторам. В групповых пневматических системах кулачковый вал производит только легкие операции по приведению в движение вентилей, впускающих и выпускающих сжатый воздух, приводящий в действие главные контакты.

5. Системы управления поездом с индивидуальными контакторами.

Электромагнитные контакторы. Характерною особенностью рассматриваемых систем управления является применение для каждого отдельного выключателя независимого привода. В качестве такого привода для электромагнитных контакторов служит электромагнит с передвижным якорем, при помощи которого производятся через промежуточную рычажную систему включение и выключение тока (рис. 212). Включение контакторов достигается путем возбуждения электромагнитов, а выключение—с помощью спиральных пружин. На приведенной схеме контактом главной цепи является *H*. Кроме него, в большинстве конструкций современных контакторов имеются еще и вспомогательные *V*. Назначение последних—выполнять функции блокировки, т. е. предотвращать неправильные включение и выключение отдельных контакторов. Вспомогательные контакты находятся в цепи управления. Они включаются и выключаются с таким расчетом, чтобы замыкание каждого последующего контактора могло быть произведено только в том случае если выключены требуемые по схеме предыдущие.

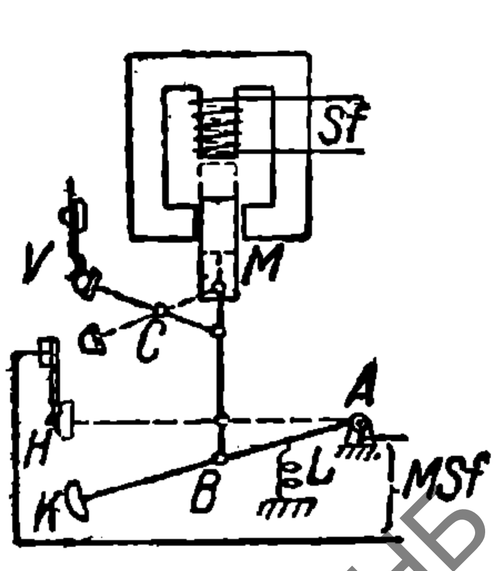


Рис. 212. Схема электромагнитного контактора.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

На рис. 213 приведен электромагнитный контактор постоянного тока системы SSW, пригодный для тока до 300 А и напряжения до 1500 V. Подвижной контакт 1 приводится в движение через рычаг 2 электромагнитом 3. В рычаг 2 вставлен промежуточный изолировочный участок 4, выполняемый из бакелита. Поворот рычага происходит около оси 5. Включение контактора производится путем возбуждения электромагнита 3, выключение же — с помощью пружин 6, расположенных по обе стороны электромагнита. Контакты помещаются в дугогасительной камере 7. Магнитное дутье получается с помощью катушки 8. На рис. 214 приведен контактор постоянного тока GEC для напряжения в 3000 V.

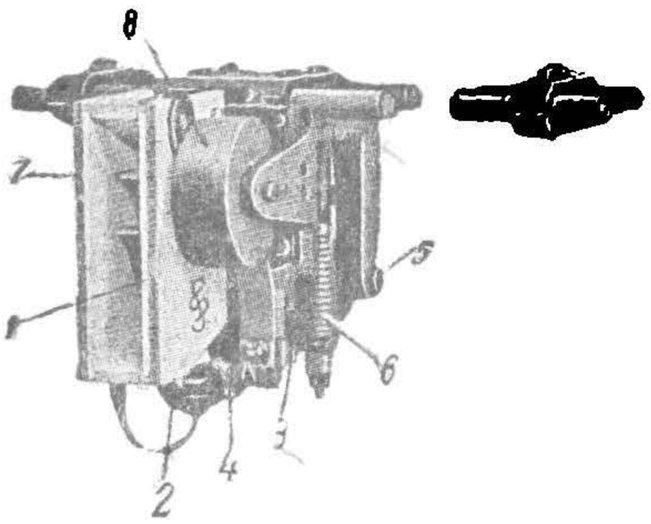


Рис. 213. Общий вид электромагнитного контактора постоянного тока до напряжения 1500 V системы SSW.

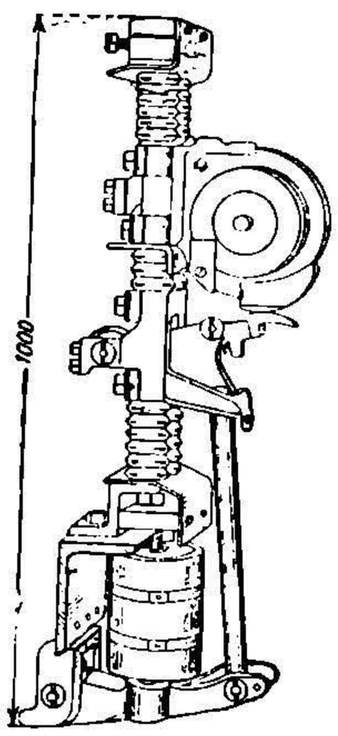


Рис. 214. Общий вид электромагнитного контактора постоянного тока на 3000 V системы GEC.

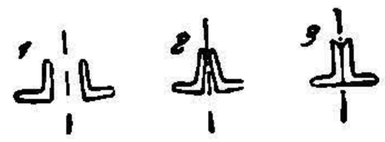


Рис. 215. Схема образования контакта при накатывании.

В современных контакторах, особенно при больших токах, принято производить замыкание и размыкание контактных поверхностей путем постепенного их накатывания друг на друга или скатывания (рис. 215). Это дает возможность значительно улучшить процесс работы контактора в наиболее ответственные ее периоды. При такой конструкции, в первый момент замыкания, благодаря большому удельному давлению достигается плотное соприкосновение контактных поверхностей. При размыкании же разрыв тока переносится на концы контактных наконечников, где дугогашение идет более энергично, особенно если имеются специальные оконечные рога (рис. 216).

Питание электромагнитов может быть или от постоянного, или от переменного тока. В последнем случае имеют место значительные осложнения. Прежде всего при переменном токе получаются очень сильные колебания тока в обмотках электромагнитов, зависящие от положения их якорей. В начальный момент включения, когда якорь далеко отстоит от сердечника электромагнита и междужелезное пространство велико, получается резкое увеличение тока, вызываемое соответствующим понижением общей самоиндукции системы. Отношение тока начального к конечному, когда якорь находится в наиболее близком расстоянии от полюса сердечника, доходит до 5 и даже до 10. Такое возрастание токов тяжело отзывается на всех аппаратах и особенно на блокирующих контактах цепи управления. При питании постоянным током сила тяжения зависит только от величины междужелезного пространства, и поэтому она изменяется значительно меньше.

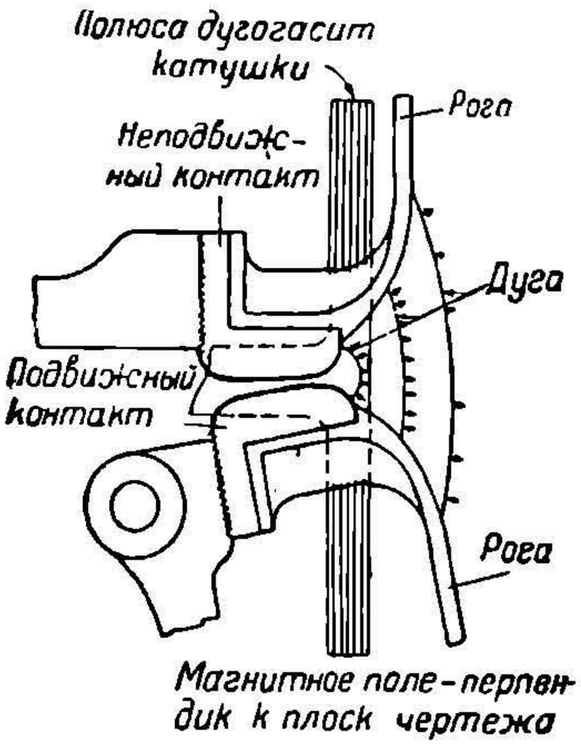
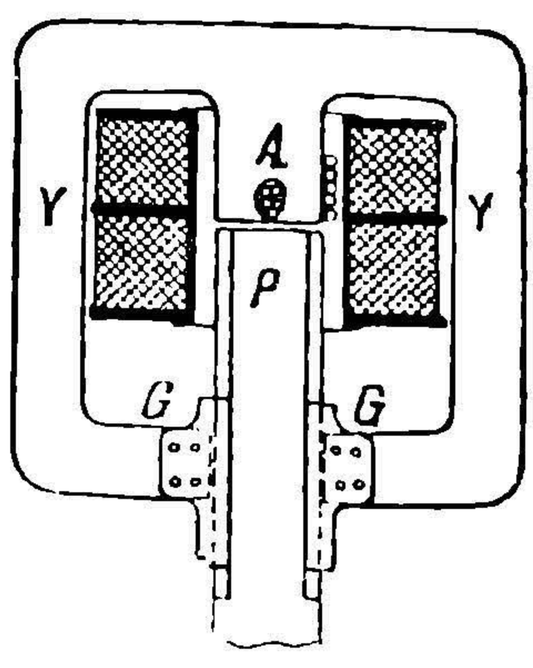


Рис. 216. Схема разрыва дуги в контакторе.



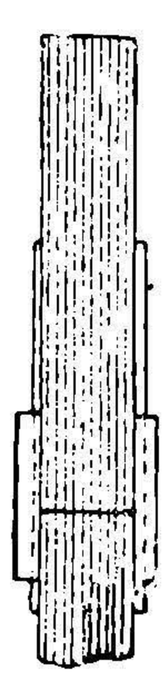


Рис. 217. Схема контактора при питании обмоток электромагнитов однофазным током.

Другим существенным недостатком возбуждения переменным током является пульсирующий характер силы тяжения магнита. Пульсация эта происходит с двойной частотой по сравнению с частотой сети. В результате в определен-

НВ УДУНТ (ДІІТ)

ные моменты, регулярно повторяющиеся, сила тяжения резко понижается. Это вредно отзывается на плотности соприкосновения контактов, а иногда может вызвать и полное его нарушение. Для ослабления этого действия прибегают к искусственному созданию вспомогательного поля, сдвинутого по фазе относительно основного (рис. 217). Как видно из схемы, на часть сердечника наложена короткозамкнутая обмотка *A*, выполняемая с большим активным сопротивлением. Благодаря этому поток, пронизывающий эту часть сердечника, сдвигается во времени по отношению к полю, получающемуся в его неохватываемой витками части. Естественно, что при двух сдвинутых по фазе полях эффект пульсации силы тяжения сглаживается.

В целях борьбы с изменением силы тяжения в современных типах контакторов часто практикуется применение специальных многочленных рычажных передач, предложенных впервые фирмой AEG. На рис. 218 приведена такая система в выполнении фирмы BBC. В подобных конструкциях соотношения между усилиями, развиваемыми непосредственно якорем магнита, и силами, реализующимися в виде контактных давлений, непрерывно меняются в зависимости от положения якоря. Механизм работает с переменным передаточным числом. При уменьшении передаточного числа уменьшается давление на контактах, но увеличивается их скорость передвижения. При увеличении передаточного числа картина получается обратной. Длины отдельных плеч рычагов подбираются таким образом, что в начальной стадии включения контактора передаточное число делается наименьшим, а в конце, когда процесс включения завершается, наибольшим (рис. 219). Благодаря этому, в начальные моменты включения и конечные моменты выключения достигается быстрота действия подвижных контактов. Кроме того, при накатывании контактов друг на друга по мере увеличения поверхности соприкосновения растет непрерывно и общее давление, достигающее наибольшей величины к моменту окончания процесса включения. При высоких конечных давлениях колебания силы тяжения, вызываемые ее пульсацией, а также и возможным понижением напряжения в цепи управления, не представляют большой опасности. Механизм может быть так отрегулирован, что контактные давления даже в периоды наименьших своих значений не будут спускаться ниже норм, обеспечивающих надежный контакт.

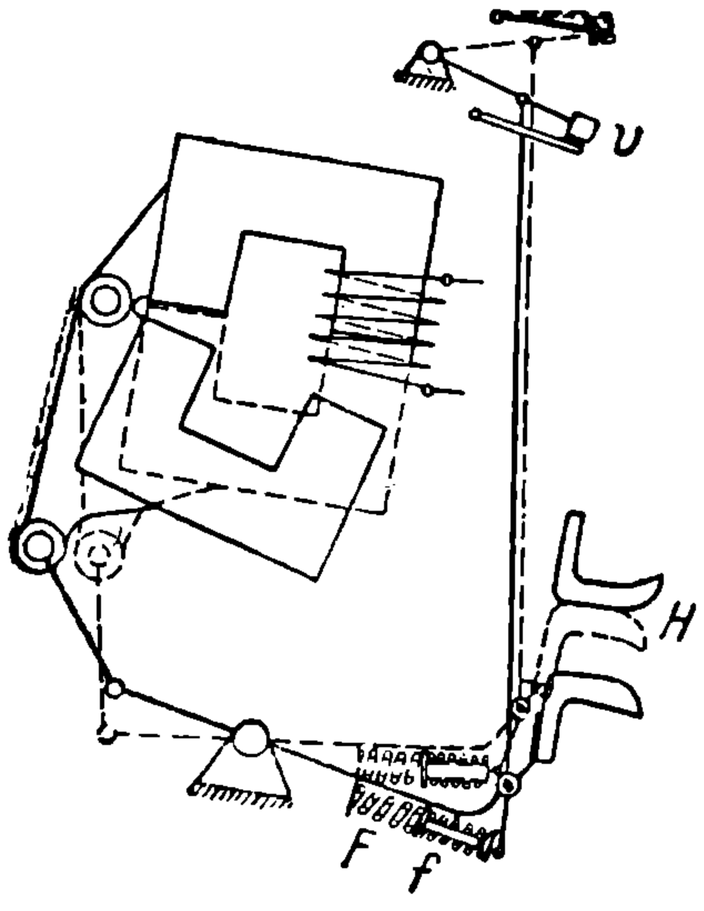


Рис 218. Картина включения электромагнитного контактора с коленчатым рычагом системы BBC.

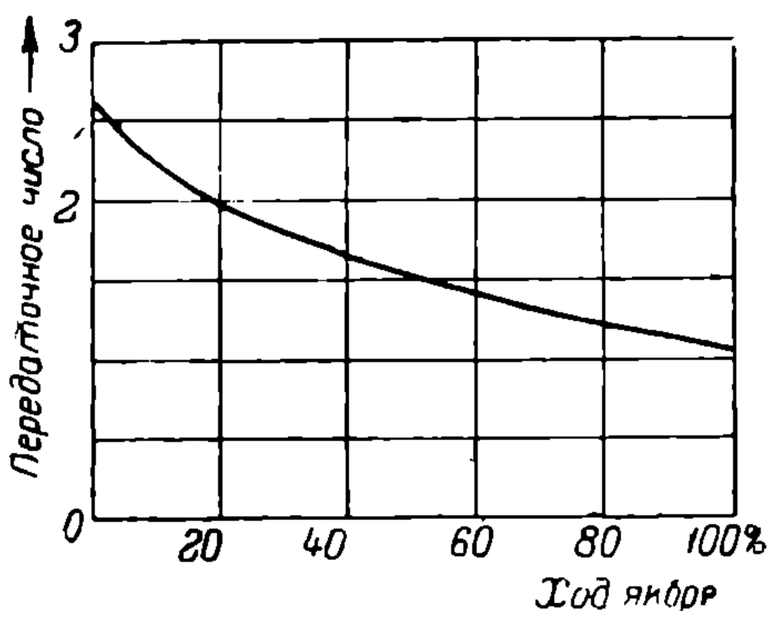


Рис. 219. Диаграмма зависимости передаточного числа от хода якоря электромагнита в контакторе BBC.

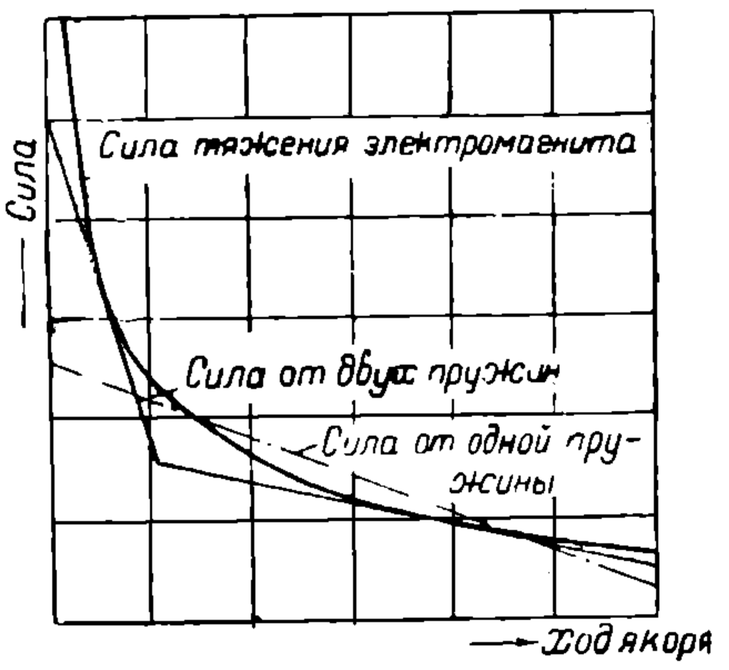


Рис. 220. Диаграмма усилий от электромагнита и от пружин в контакторе BBC.

Работа контакторов может быть значительно улучшена путем применения специальных пружин *F* и *f*, связывающих подвижной контакт с рычагом. Назначение их — обеспечивать правильное и эластичное соприкосновение контактных поверхностей. Давления на контакты в данном случае будут определяться силой сопротивления или, иначе говоря, силой напряжения пружин. Ввиду изменения силы тяжения электромагнита в зависимости от хода его якоря по кривой, пружины рационально выполнять в виде двух отдельных пружин разной жесткости. В первой стадии включения работает преимущественно пружина меньшей жесткости, а во второй стадии когда силы тяжения начинают быстро расти, принимает на себя главную работу пружина более жесткая. При таком условии в процессе переме-

НБ УГМНТ (ДІТ)

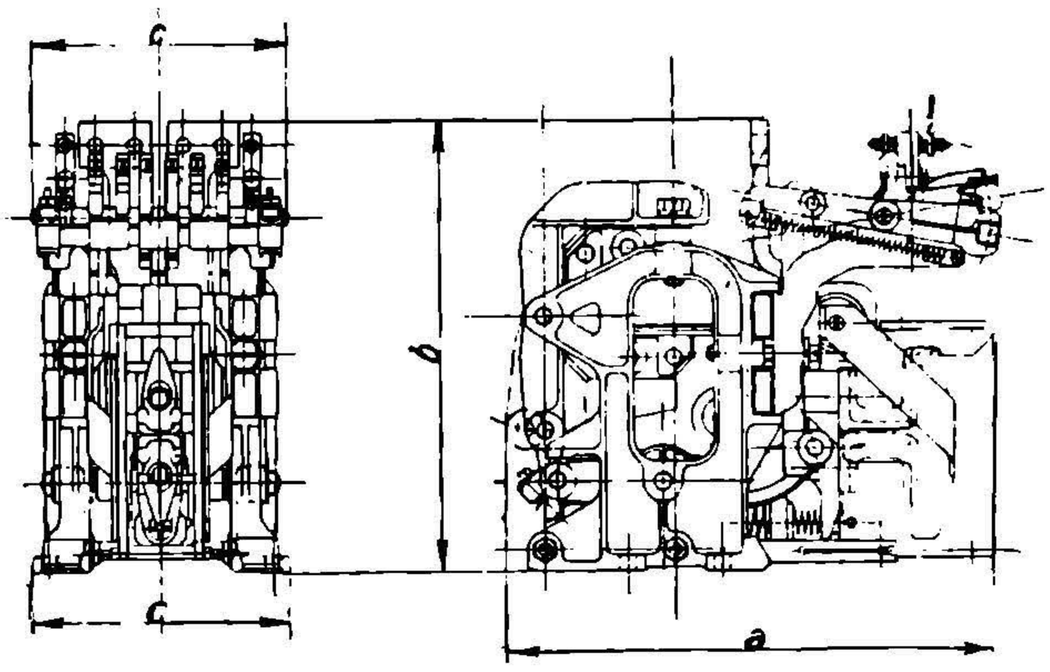


Рис. 221. Габариты электромагнитных контакторов SSW и AEG

щения системы можно получить соответствие между силами электромагнита и силами давления, передающимися от пружин на контакты (рис. 220). Как видно из рис. 220, при соответствующем подборе пружин силу электромагнита при всех положениях его якоря удается почти полностью использовать и передавать на контакты. Правильный подбор пружин обеспечивает, помимо надежности контакта, и меньшие сотрясения механизма контактора как при его включении, так и выключении. Удельные давления контактных поверхностей в электромагнитных контакторах берутся около 1,5 kg/cm². Общие же давления при больших токах доходят до 80—100 kg. Основные данные электромагнитных контакторов AEG и SSW приведены на рис 221 и в табл. 34.

ТАБЛИЦА 34.

Основные параметры электромагнитных контакторов.

Тип	Измерения в mm			Вес в kg	Длительный ток	Напряжение	Число блокировочных контактов		Допустимое падение напряжения в цепи управления
	a	*b*	*c*				Выключ.	Включ.	
E.L.S. 11	300	265	150	18	300	до 1000	2	2	10%—35%
E.L.S. 12	365	356	220	36	750	до 1000	3	3	
E.L.S. 14	440	400	250	45	1250	до 1000	3	3	
E.L.S. 15	510	410	250	66	1600	до 1000	3	3	

Электропневматические контакторы. Схема этого типа контакторов изображена на рис. 222. Контактное давление здесь осуществляется с помощью сжатого воздуха, приводящего в движение поршень. Выключение же производится пружиной, находящейся в цилиндре. Впуск и выпуск сжатого воздуха осуществляется электромагнитным клапаном. В положении, приведенном на схеме, рабочий цилиндр *K* через отверстие *A* сообщается с атмосферой. Для включения контактора возбуждается электромагнит *M*. Рычажная система поднимается вверх. Отверстие *A* закры-

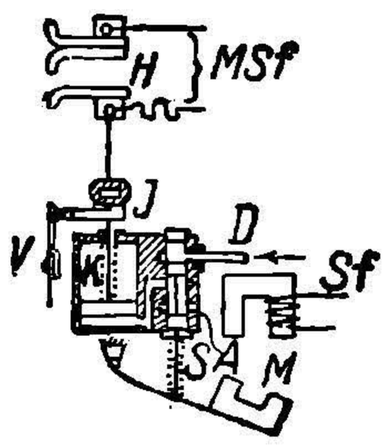


Рис. 222. Схема электропневматического контактора.

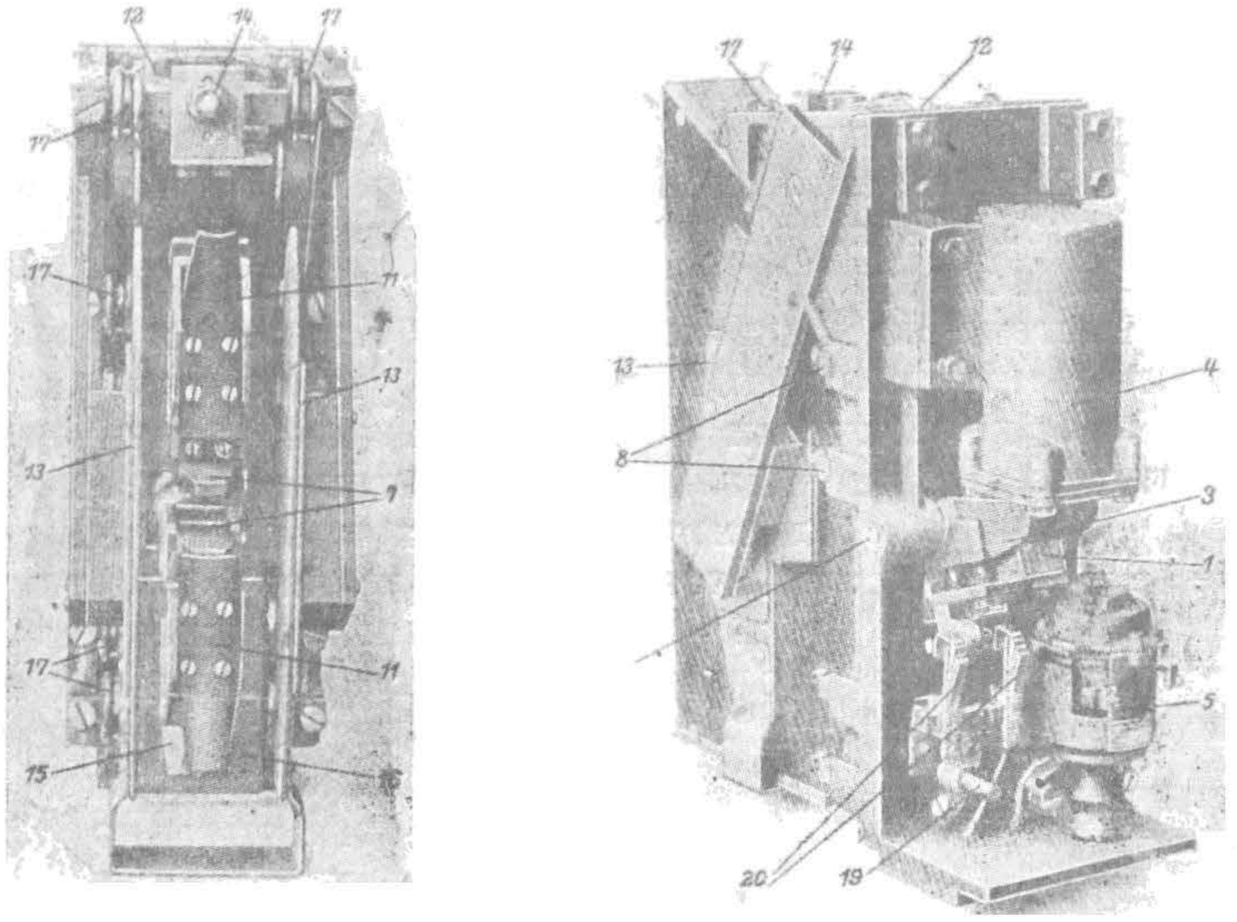


Рис. 223. Общий вид электропневматического контактора SSW.

НБ УДУНТ (ДІТ)

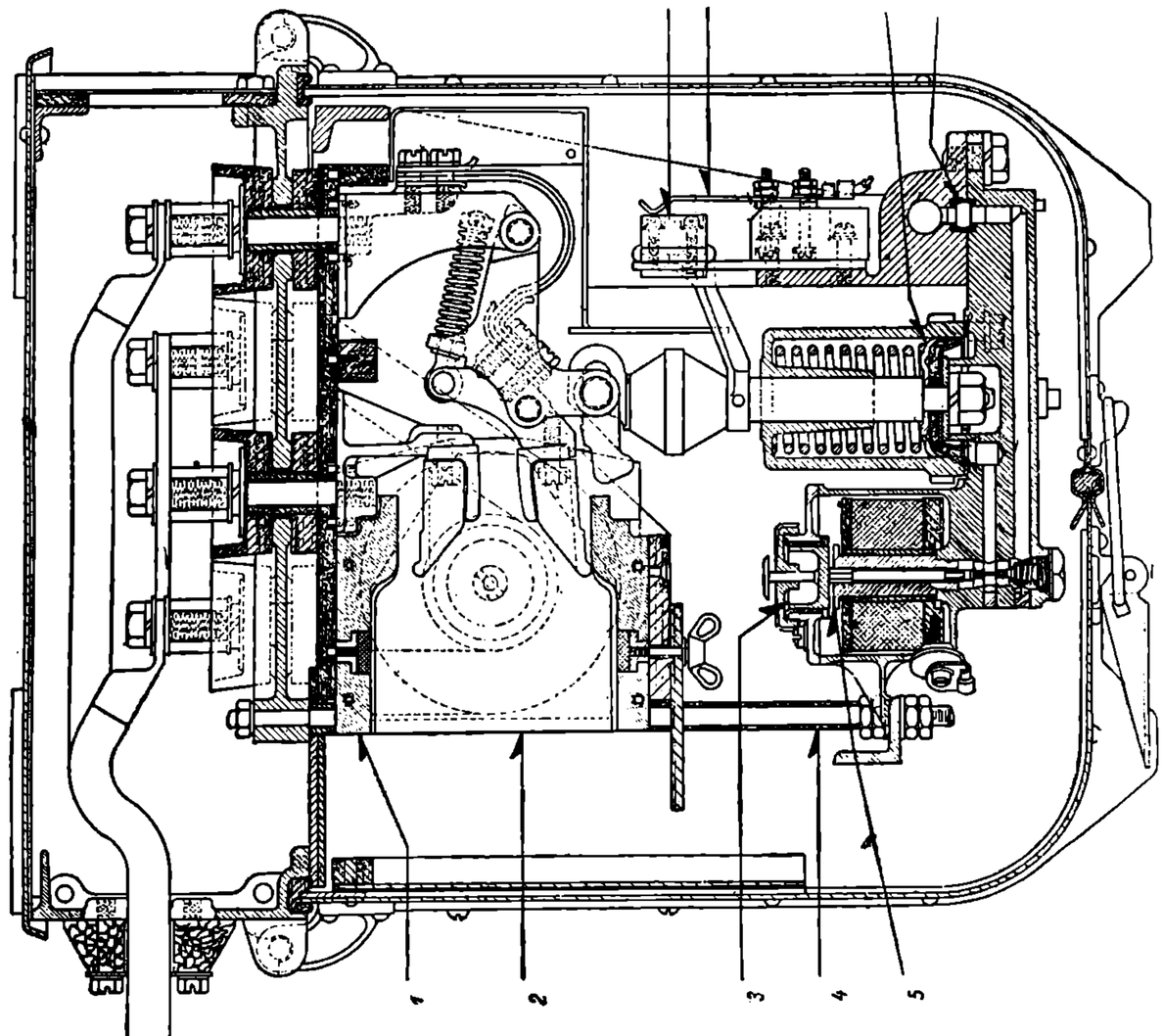


Рис. 225. Электропневматический контактор системы Вестингауза.

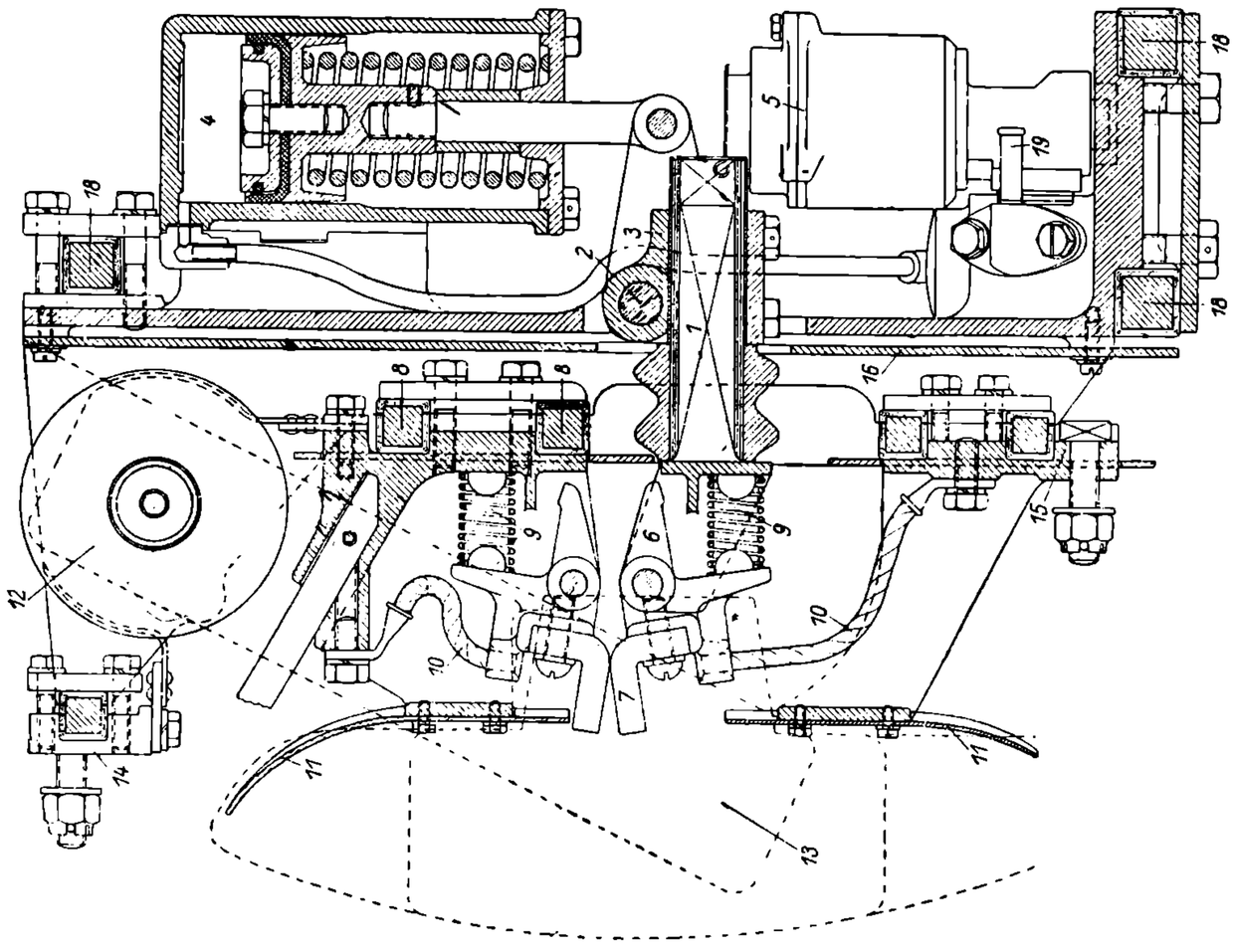


Рис. 224. Разрез электропневматического контактора к рис. 223.

вается, и вслед за этим через отверстие *D* начинает поступать в рабочий цилиндр сжатый воздух. Давление воздуха берется чаще всего в пределах 5—6 атм.

Общий вид и разрез электропневматического контактора системы SSW даны на рис. 223 и 224. Подвижной контакт 7 приводится в движение поршнем цилиндра 4 через промежуточную рычажную передачу, вращающуюся около точки 2. Основной передаточный рычаг 1 представляет собою изоляторный стержень, в который впрессован держатель подвижного контакта. Последний может поворачиваться около оси, закрепленной в щеках держателя. Для эластичного осуществления контакта и правильного накатывания контактных поверхностей применены пружины 9. Впуск и выпуск сжатого воздуха производится электрическим клапаном 5. Подвод воздуха осуществляется через трубку 19. Зажимы главной цепи 14 и 15 соединяются с контактами гибкими кабелями 10. Части контактора, находящиеся под напряжением, отделяются от остальных частей изолирующей пластиной 16 и роликовыми изоляторами 17. Для дугогашения применены роговые поверхности 11 и дугогасительная катушка 12. В целях достижения правильного направления магнитного поля сердечник катушки снабжен специальными железными пластинами 13. Подвешивается весь контактор на четырехгранных стержнях 18 с промежуточной изоляцией. Для блокировки служат контакты 20.

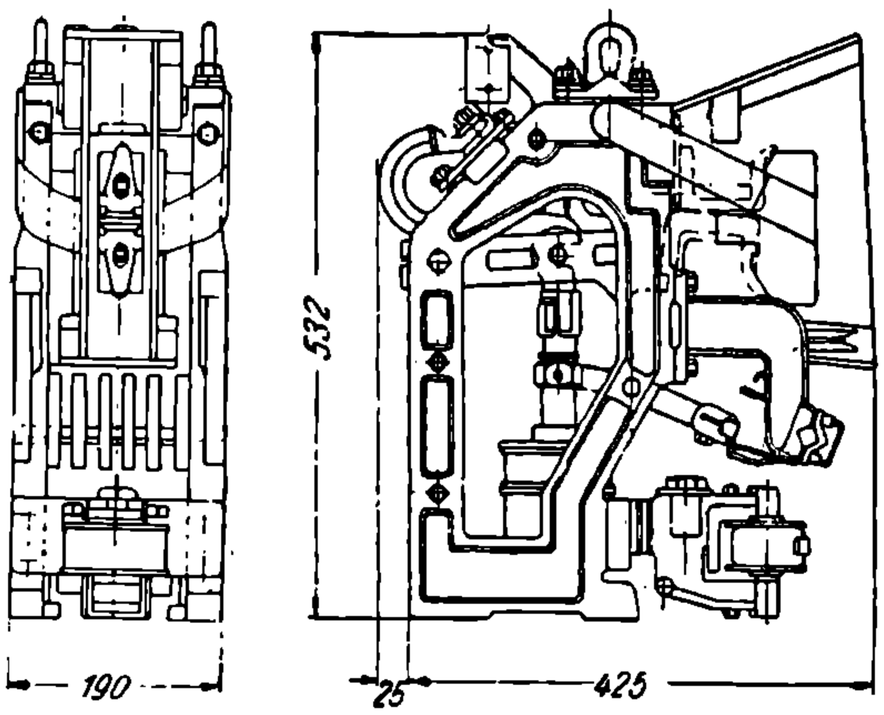


Рис. 226. Габариты электропневматического контактора SSW и AEG на 1700 А.

Несколько иной тип электропневматического контактора представлен на рис. 225. Система эта выполняется фирмой Вестингауз. В основе ее, как и вообще в этих системах, лежат рабочий цилиндр 8 и электрический клапан 5, сжатый воздух к которому попадает через вентиль 9. Части 6 и 7 служат для осуществления блокировочных контактов.

Электропневматические контакторы имеют существенные преимущества перед электромагнитными. Контактное давление, осуществляющееся с помощью сжатого воздуха, обеспечивает непрерывный плотный контакт. Электрический клапан в данном случае играет только роль вспомогательную. Ввиду этого, питание его обмоток от переменного тока, а также и возможность понижений напряжения в цепи управления не вызывают особых осложнений.

Расход энергии на управление также значительно ниже при электропневматических контакторах, чем при электромагнитных. Так, например, для контакторов средних размеров электромагнитных систем требуется на единицу около 40—100 W а у электропневматических всего только 15—25 W, что имеет значение, так как в больших электровозах средняя мощность для цепей управления при электромагнитных контакторах определяется довольно значительной величиной, порядка 2 kW.

В отношении механической конструкции электропневматические контакторы также имеют большие преимущества. Они не имеют таких тяжелых подвижных частей, как электромагнитные. Всякого рода ударные эффекты и сотрясения при них получаются значительно менее интенсивными. В отношении габаритов и весов преимущества также на их стороне. На рис. 226 видны габариты электропневматического контактора SSW и AEG на 1700 А длительного тока. Вес его — около 48 kg, тогда как равнозначущий ему электромагнитный весит около 66 kg.

Блокировка в схемах с индивидуальными контакторами. При включении аппаратов и отдельных контакторов необходимо принимать ряд предупредительных мер во избежание неправильных соединений. У контроллерных и групповых контакторных систем особой блокировки для главных контактов не требуется, так как правильная последовательность их включения и выключения гарантируется соответствующей конфигурацией барабанов и кулачковых валов. Как уже было выяснено в разобранных схемах, блокировка в таких случаях касается, главным образом, реверсора и различного рода защитных реле.

В ином положении находятся индивидуальные контакторные системы. У них по причинам неисправности правильная последовательность включения отдельных контакторов может оказаться нарушенной. Может случиться, что последующие

НБ УИИНТ (ДІІТ)

контакторы будут включаться тогда, когда предыдущие вопреки схеме выключены не будут. Возможна картина и обратная. Для устранения таких явлений системы с индивидуальными контакторами снабжаются специальными блокировочными приспособлениями. Наиболее часто блокировка осуществляется путем применения вспомогательных электрических цепей. Для указанных целей и служат вспомогательные контакты, о которых упоминалось при разборе конструкции контакторов.

Примером такой блокировки может служить рис. 227, где взят случай однофазной системы с трансформатором *T* и предохранительной катушкой *D*. Схема блокировки в целях предотвращения коротких замыканий секций трансформатора построена на принципе недопущения одновременного включения контакторов 1, 3, 5 или 2, 5, 6. Действительно, включить цепь управления контактора 1 можно только тогда, когда выключены контакторы 3 и 5. Если бы хотя один из них остался включенным и, благодаря этому, соответствующий соленоидный сердечник втянутым, то цепь питания обмотки соленоида контактора 1 получилась бы разомкнутой. Такая же самая картина получается и в отношении комбинаций включения всех прочих контакторов. Данная схема может быть еще осложнена требованием

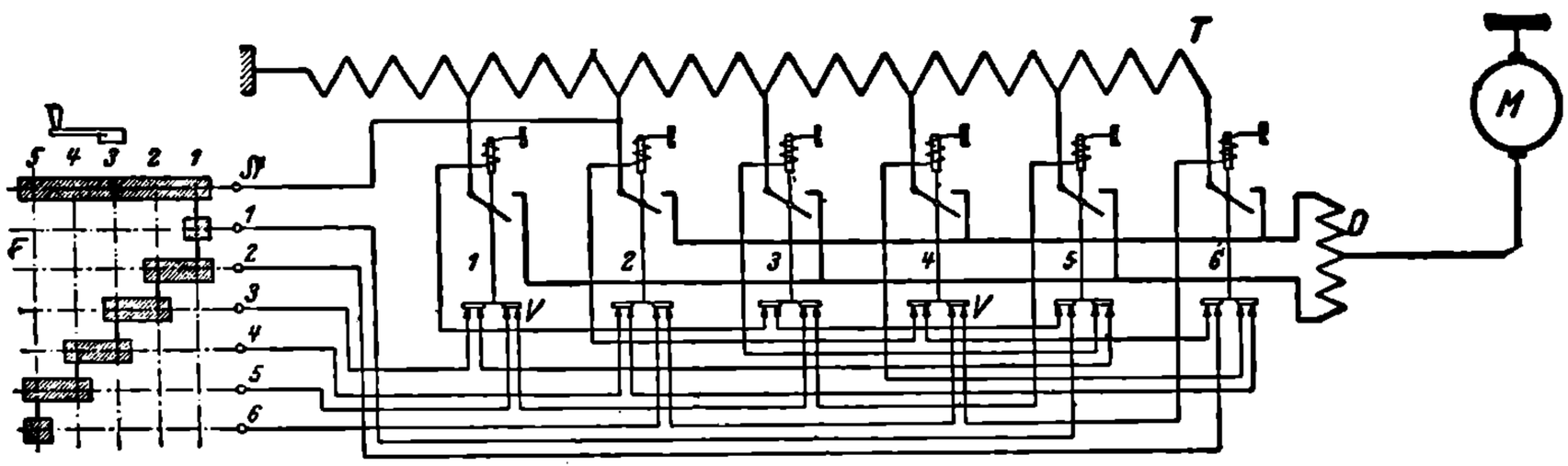


Рис. 227. Схема блокировки при индивидуальных контакторах.

соблюдения обязательной последовательности в нумерном порядке включения контакторов. Можно было бы заблокировать контакт 1 по отношению к контактам 3, 4, 5 и 6, контакт 2 по отношению к 4, 5 и 6, контакт 3 по отношению к 1, 5 и 6 и т. д. Такая блокировка была бы гарантией не только от короткого замыкания отдельных секций трансформатора, но и от возможности преждевременного подвода повышенных напряжений к зажимам двигателя. Осуществление поставленной задачи потребовало бы соответствующего увеличения блокировочных контактов и их цепей. На практике встречаются схемы как первого, так и второго рода.

Вместо блокировки, основанной на применении электрических вспомогательных цепей, иногда, главным образом, в старых конструкциях применяются блокировочные приспособления механического типа. Идея их заключается в установлении связи между отдельными контакторами с помощью систем рычагов. В подобных конструкциях перемещения подвижных контактов взаимно блокирующихся контакторов связываются друг с другом рычагами. В нужные моменты блокирующиеся контакторы друг друга запирают или отпирают, чем и достигается задаваемая последовательность их включения. Механическая блокировка ввиду своей громоздкости теперь применяется относительно редко. Встречается она, главным образом, в старых конструкциях.

Схемы соединений при индивидуальных контакторных системах постоянного тока. Примером такой схемы может служить приведенная на рис. 228. Она построена для электромагнитных контакторов с питанием их обмоток непосредственно от сети. Так как изготовление электромагнитов отдельных контакторов на напряжения выше 100—150 V представляет большие трудности, то в подобных схемах применяется включение по несколько контакторных обмоток последовательно. Помимо этого, приходится иметь также и предохранительные сопротивления, включаемые последовательно в отдельные участки цепей, как и в разобранной выше кулачковой системе. Схема построена для четырехмоторного вагона, причем двигатели сначала включаются последовательно-параллельно, а затем все параллельно.

На схеме положения „V“ соответствуют „вперед“, — „O“ „стоп“ и — „R“ „назад“.

Среди особых аппаратов в рассматриваемой схеме следует обратить внимание на реле управления 16. Система работает только в том случае, если оно включено,

НВ УДУНТ (ДІІТ)

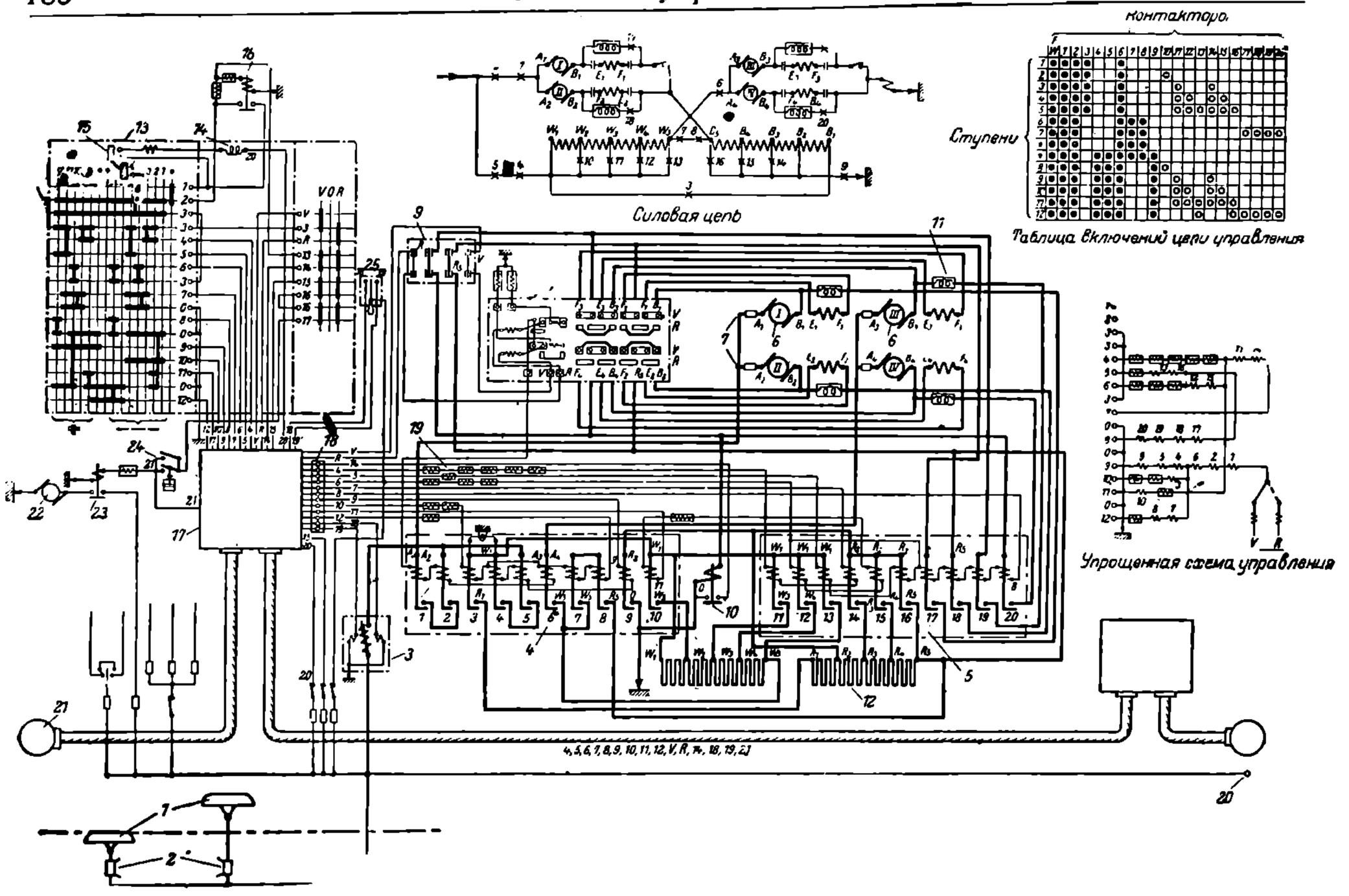


Рис. 228. Схема управления SSW с индивидуальными электромагнитными контакторами при питании цепи управления от сети.

Обозначения.

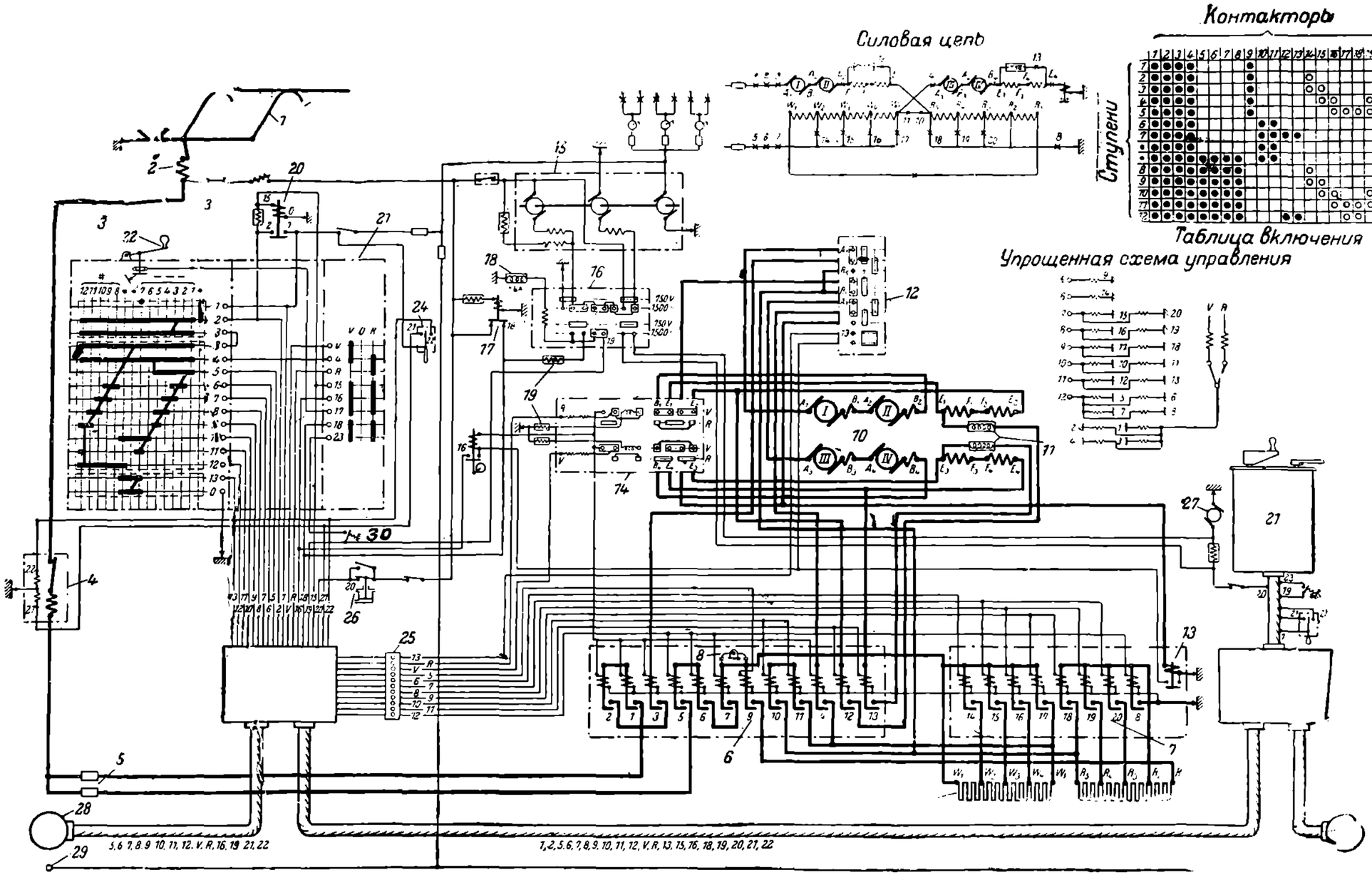
1—Токоприемник.
2—Предохранитель.
3—Максимальный выключатель.
4—Контакторы для последовательно-параллельного включения.
5—Контакторы для включения сопротивлений.
6—Тяговые двигатели.
7—Предохранители.
8—Реверсор.
9—Отключатель двигателей.
10—Реле перегрузки.
11—Индуктивные шунты.
12—Пусковые сопротивления.
13—Контроллер управления.
14—Дугогасительная катушка.
15—Контакт кнопки безопасности.
16—Реле управления.
17—Коммутационный ящик.
18—Зажимы для осуществления управления по системе многих единиц.
19—Сопротивления цепи управления.
20—Выключатели для питания цепи управления от рабочего провода.
21—Цепь для включения компрессора.
22—Двигатель компрессора.
23—Контактор для включения компрессора.
24—Автоматический выключатель компрессорной цепи управления
25—Переключатель для включения выключения автомата 3.

а для этого должен проходить ток через его обмотку. Последовательно с последней включен контакт безопасности 15.

Пуск в ход вагона начинается с поворота реверсивного валика, например, „вперед", и включения рубильников вспомогательных цепей 20 и 25, чем приводится в рабочее положение максимальный выключатель 3. Вслед за этим контроллер управления 13 ставится на подготовительное положение, обозначенное звездочкой. Составляется цепь 20—15—1—2— обмотка 16—земля. Реле 16 включается. Контроллер передвигается на положение 1. Предыдущая цепь разрывается, но одновременно составляется новая: 20—1—16—2—3—V—контакторы (1—2—6—3)—10—земля. Реверсор 8 поворачивается на положение „вперед". Составляется главная цепь при последовательном включении обеих групп двигателей с введением полного пускового сопротивления. Второе положение, а также и все дальнейшие достигаются по такому же принципу, и их легко проследить по тому же рис. 228, руководствуясь упрощенными схемами и контакторной таблицей.

Следует указать, что главная блокировка системы построена на связи реле перегрузки 10 и реле управления 16. При недопустимой силе тока реле 10 передвижением своего якорного сердечника замыкает блокировочные контакты, в результате чего обмотка 16 оказывается накоротко шунтированной через землю. Это влечет за собою выключение реле 16 и, как следствие, выключение всех контакторов главной цепи. Также размыкается главная цепь и в случае разъединения контакта безопасности 15.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)



Обозначения.

1—Токоприемник.
2—Разъединитель.
3—Предохранитель.
4—Максимальный выключатель.
5—Предохранители
6—Контакторы для последовательно - параллельного включения двигателей.
7—Контакторы для пусковых сопротивлений.
8—Механическая блокировка.
9—Пусковые сопротивления.
10—Тяговые двигатели.
11—Индуктивные шунты.
12—Отключатель двигателей.
13—Реле перегрузки.
14—Реверсор.
15—Умформер для цепи управления.
16—Переключатель напряжения.
17—Реле напряжения.
18 Индуктивное предохранительное сопротивление.
19—Вспомогательные сопротивления цепи управления.
20—Реле тока управления
21—Контроллер управления.
22—Ручка контроллера с механизмом кнопки бдзо асности.
23—Коммутационный ящик.
24—Включатель максимального выключателя.
25—Отключатель магистрали управления многих единиц от данного вагона.
26—Автомат для включения и выключения компрессора.
27—Двигатель компрессора.
28—Штепсельная коробка для соединения магистрали многих единиц.
29—Штепсельная коробка для проводов освещения.
30—Кнопка для переключения с 1500 V на 750 V.

Рис. 229. Схема управления с индивидуальными электромагнитными контакторами на напряжения 750 V и 1500 V фирмы SSW

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Видоизменение разобранной схемы применительно к питанию цепей управления от мотор-генераторов приведено на рис. 229. Отличие данной схемы от предыдущей состоит с принципиальной точки зрения только в деталях. Блокировочные контакты реле перегрузки 13 связаны здесь с реле управления 20 не непосредственно, а с помощью промежуточного реле. При действии реле перегрузки включенные контакторы шунтируются сначала обмоткой реле 16, а затем с помощью этого же реле коротко шунтируется через землю и обмотка реле управления 20. После этого вся система выключается. Схема эта несколько отличается от предыдущей и в отношении действия кнопки безопасности. Реле управления здесь выключается под действием этой кнопки не путем разрыва цепи управления, а путем шунтирования его обмотки коротким замыканием на землю. Как видно из схемы, при прекращении давления на ручку контроллера, она отпружинивает и соединяет провод 17 с землей. Выключатель отдельных групп двигателей 12 выполнен на приведенной схеме не в виде отдельных переключательных рубильников, а в виде специального барабана.

Приведенная схема заслуживает особого внимания из-за устройства, позволяющего работать при напряжениях в 750 и 1500 V. При напряжении в 750 V двигатели работают при половинном напряжении, что влечет за собой соответствующее понижение скорости поезда. При 1500 V двигатели получают нормальное напряжение и развивают полную скорость движения. Подобные схемы применяются довольно часто на пригородных дорогах, имеющих въезд в город. В черте города берется напряжение пониженное, а за городом повышенное. При таких условиях работы между участками различных напряжений приходится иметь переходные участки без тока, которые поезда должны проходить по инерции. На этих участках аппараты управления должны приводиться каждый раз в свое исходное положение, так как в противном случае при переходе с низкого напряжения на высокое могут возникать недопустимые броски тока.

При работе на два напряжения приходится применять и особое мотор-генераторное оборудование. В данном случае мотор-генератор имеет два двигателя, которые с помощью переключателя 16 при напряжении в 750 V включаются параллельно, а при 1500 V — последовательно. Переключатель 16 занимает свое основное положение при 1500 V. В этом положении он фиксируется специальной пружиной. Для перевода же на 750 V необходимо возбудить его обмотку с последовательно включенным сопротивлением 18. Это может сделать машинист от руки нажатием кнопки 30 через реле 17. При напряжении в 1500 V это реле держится в разомкнутом положении, при напряжении же в 750 V оно опускается и дает ток в обмотку переключателя сначала через кнопку 30, а затем при переходе переключателя на положение 750 V непосредственно через контактные пластины его барабана, который уже передвинулся, как только по обмотке цепи 18 прошел ток через кнопку 30. Сопротивление 18 делают индуктивным, чтобы в самый первый момент подведения напряжения к системе действия реле 17 надежно опережало действие обмотки переключателя 16. Это опережение важно иметь в моменты включения напряжения 1500 V, так как без него реле 17 могло бы разомкнуть свои контакты после того, как обмотка переключателя 16 уже получила бы ток от 1500 V.

Образец схемы индивидуально-контакторного управления с автоматизацией пуска приведен на рис. 230. Система построена на включении основных контактов, координированном с включением контактов блокирующих. Обмотки главных контакторов обозначены римскими цифрами, а блокировочные контакты — буквами. Питание цепи управления осуществляется с помощью динамотора *ДМ*, представляющего собою здесь машину с двумя коллекторами и двумя самостоятельными обмотками. Преимущества динамоторов были уже изложены при изучении схемы Somalni.

В основе рассматриваемой системы управления лежит пусковое минимальное реле *ПМР*, имеющее две обмотки 1*A*—*A* и 1*A*—*B*, связанные с блокировочными контактами 1*d* и 1*c*. Реверсор здесь снабжен электропневматическими приводами. Впуск воздуха для движения „вперед“ осуществляется обмоткой клапана впуска *F*, а „назад“ — обмоткой *R*. При первом положении контроллера замыкается цепь 4—*F*——41—53—*E*. Реверсор устанавливается на положение „вперед“, причем связанные с его движением блокировочный контакт 41 размыкается, а 42 замыкается. Образуется цепь: 4—*F*—43—I—II—*E*. Ток управления проходит через обмотки I и II, что влечет за собою введение в цепь контакторов 1 и 2. Включение контактора 1

НБ УДУНТ (ДІІТ)

вызывает замыкание блокировочных контактов. Получается цепь: 3—*e*—*f*—VII—*i*—*i*$_1$—*k*—*l*—*m*—*n*—*E*. После этого все необходимые соединения для осуществления первого поездного положения, которое может быть использовано и как маневровое, выполнены. Поезд приходит в движение.

Для осуществления следующих ступеней ручка контроллера управления переводится в положение 2. Дальше управление автоматизируется. При замкнутом блокировочном контакте 1*a*, связанном с уже включенным контактором 7, составляется цепь: 1—1*a*—1*A*—1*c*—1*D*—*D*—*a*—III—*l*—*m*—*n*—*E*. Ток управления проходит по обмотке пускового реле *A*, что вызывает размыкание блокировочного контакта 1*a*. Прохождение же тока по обмотке III ведет за собою включение контактора 3. Это сопровождается размыканием блокировочных контактов *k* и *a* и замыканием *o* и *t*.

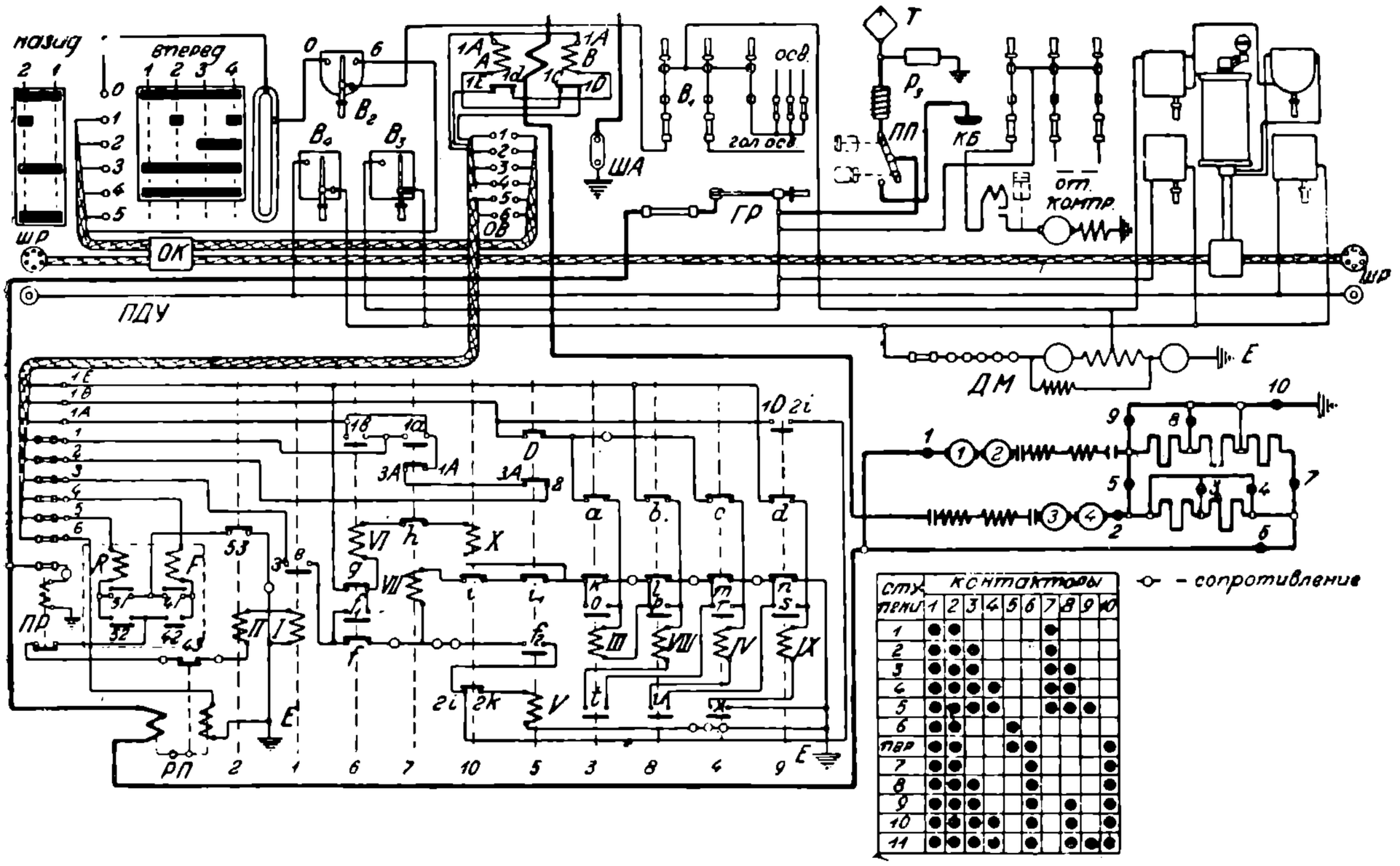


Рис. 230. Схема автоматического управления с индивидуальными электропневматическими контакторами.

Обмотка III вводится через *o* в цепь обмотки VII. Получается вторая реостатная ступень пуска. В этот момент ток в обмотке *A* пускового реле прекращается, но 1*d* удерживается в разомкнутом положении пусковым током, проходящим по главной его обмотке. Контакт 1*d* замыкается только тогда, когда пусковой ток падает до I_{min}, после чего образуется цепь 1—1*A*—*B*—1*d*—1*E*—*b*—VIII—*t*—*m*—*n*—*E*. Обмотка VIII включает контактор 8, что дает третью реостатную ступень пуска. После включения контактора 8 связанный с ним блокировочный контакт *p* переводит обмотку VIII в цепь уже находящихся там VII и III.

В этот период блокировочный контакт 1*c*, несмотря на размыкание обмотки *B*, вызванное разъединением *b*, удерживается в разомкнутом положении током главной обмотки. Как только этот ток падает до I_{min}, пусковое реле тем же способом включает контактор 4. Таким же образом картина повторяется и дальше, пока не будут включены все ступени последовательного соединения двигателей.

При переводе контроллера управления на положение 3 осуществляется переходное положение с последовательного соединения двигателей на параллельное. Положение же 4 автоматизирует работу системы при параллельном соединении. При желании контроллер можно поставить сразу в положение 4, и тогда система будет автоматизирована с начала до конца.

В качестве второго примера автоматической системы управления поездом может служить схема фирмы MV, примененная на Северных ж. д. московского узла. Здесь введен еще ряд усовершенствований (рис. 231, 232 и 233). Управление в данном случае устроено для автоматического и ручного пуска, что зависит от положения

НБ УИИНТ (ДІІТ)

главной ручки контроллера управления. Последний имеет три барабана, расположенные один над другим. Верхний барабан-реверсор — служит для изменения направления движения. Средний, так называемый предохранительный, выполняет функции кнопки безопасности. Нижний является, главным образом, выполняющим все основные операции по пуску и регулированию движения.

Система управления имеет четыре положения: маневровое, последовательное, параллельное и параллельное с ослаблением поля. На рис. 231 и 232 показаны схемы управления в четырех главных положениях со всеми действующими и блокировочными контактами. Катушки электромагнитных клапанов контакторов силовой цепи указаны спиральками. Блокировочные контакты, обозначенные „вкл.", замыкаются, когда контактор, к которому они относятся, включен, а контакты, обозначенные „откл.", замыкаются, когда контактор, к которому они относятся, выключен. Таким образом, контакт $LS1_{вкл.}$ замкнут только тогда, когда контактор $LS1$ включен.

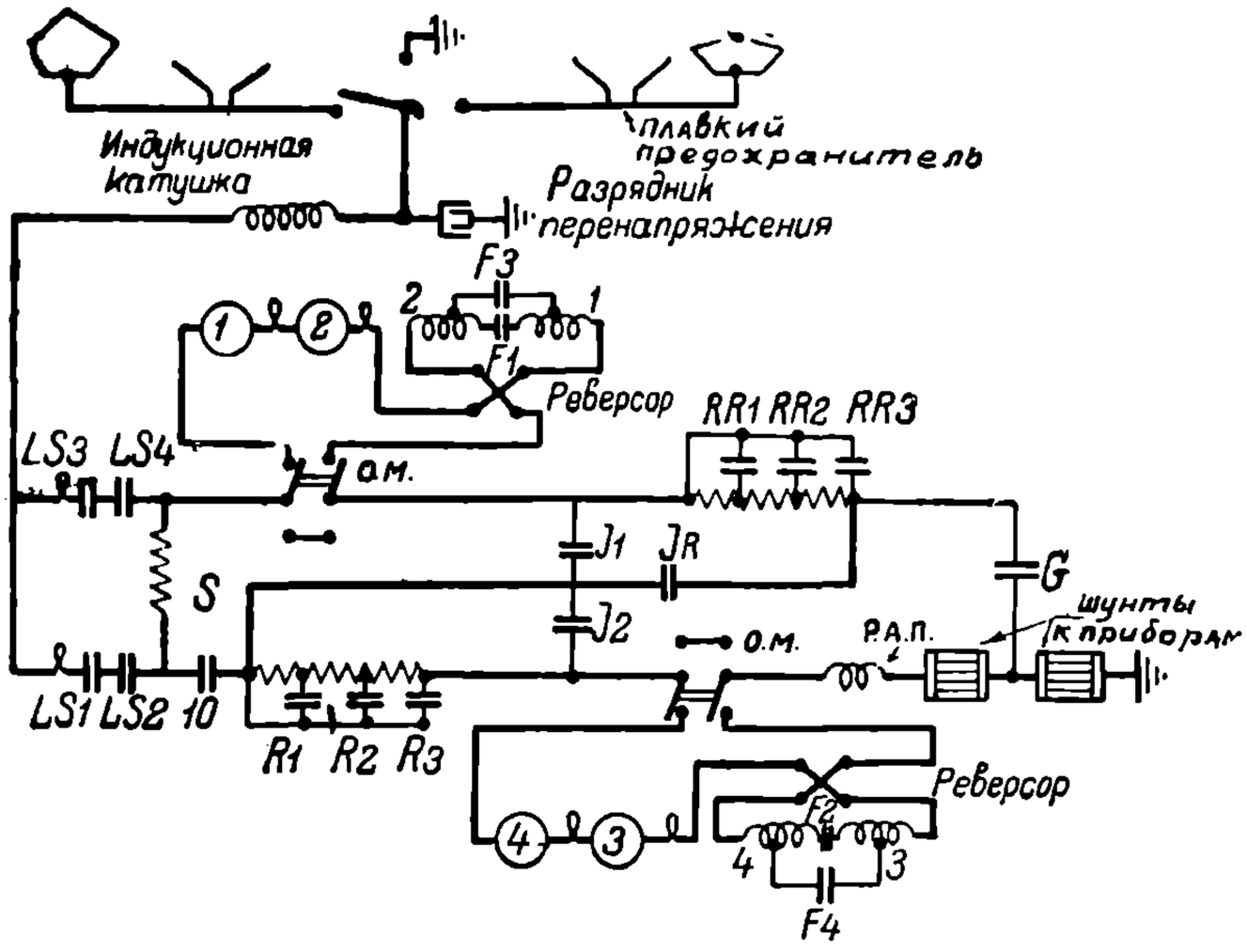


Таблица включения контакторов

Положение ручки контроллер		Ступени	LS1	LS2	LS3	LS4	RR1	R1	RR2	R2	RR3	R3	JR	J1	J2	G	F1	F2	F3	F4	10
Последовательное соединение	1	1	●	●									●				●	●			
	2	2	●	●	●	●							●				●	●			
	2	3	●	●	●	●	●						●				●	●			
	2	4	●	●	●	●	●	●					●				●	●			
	2	5	●	●	●	●	●	●	●				●				●	●			
	2	6	●	●	●	●	●	●	●	●			●				●	●			
	2	7	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●				●	●			
	2	8	●	●	●	●								●	●		●	●			
Переходное положение	3	9	●	●	●	●								●	●	●	●	●			●
Параллельн. соединение	3	10	●	●	●	●										●	●	●			●
	3	11	●	●	●	●	●	●								●	●	●			●
	3	12	●	●	●	●	●	●	●	●						●	●	●			●
	3	13	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				●	●	●			●
Ослабленное поле	4	14	●	●	●	●	●	●	●	●						●			●	●	●
	4	15	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				●			●	●	●

Рис. 231. Силовая цепь автоматического управления поездом Северных ж. д. СССР.

Для первого маневрового положения следует поставить ручку реверсора на „вперед автоматическое", а главную — на положение I. Тогда сегменты контроллера управления замкнут контактные пальцы 4—5, 7—10, и ток управления, пройдя выключатель цепи управления и кнопку управления, поступит через предохранительный барабан от контакта 7 в контакт 8. Контактный палец 8 соединит главный и реверсивный барабаны через контактные пальцы соответственно 9 и 4, и ток пойдет по проводу 10 и 5. От контактного пальца 5 ток пойдет по проводу 5, разветвившись на два пути — через катушку F реверсивного контактора (возбудив ее, он переключит реверсор на положение „вперед") и через блокировочный контакт „вперед". Отсюда ток пойдет опять двумя путями — по катушкам $LS1$ и $LS2$ (это замкнет линейные контакторы $LS1$ и $LS2$), через отключатели моторов 1—2 и 3—4 максимальное MP и нулевое реле HP, через блокировочные контакты $F_{3\,откл}$, $F_{4откл.}$ (эти контакторы пока замкнуты, так как катушки F_3 и F_4 еще не включились) и, наконец, по катушкам F_1 и F_2, что включит силовые контакторы F_1 и F_2.

Кроме указанного, ток, поступивший в провод 10, пойдет также через контакты $LS1_{вкл.}$ (контактор $LS1$ включен), $10_{откл.}$, по катушке JR и возвратится обратно через контакт $J1_{откл.}$ По другим цепям ток пойти не может потому, что остальные контакты ($LS3_{вкл.}$, $RR1_{вкл.}$ и т. д.) еще разомкнуты. Таким образом, получаются включенными следующие контакторы: $LS1$, $LS2$, JR, F_1 и F_2. Нетрудно проследить по силовой схеме (рис. 231), что это отвечает последовательному включению моторов с пусковыми сопротивлениями. Дальнейшим поворотом главной ручки $KУ$ на поло-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

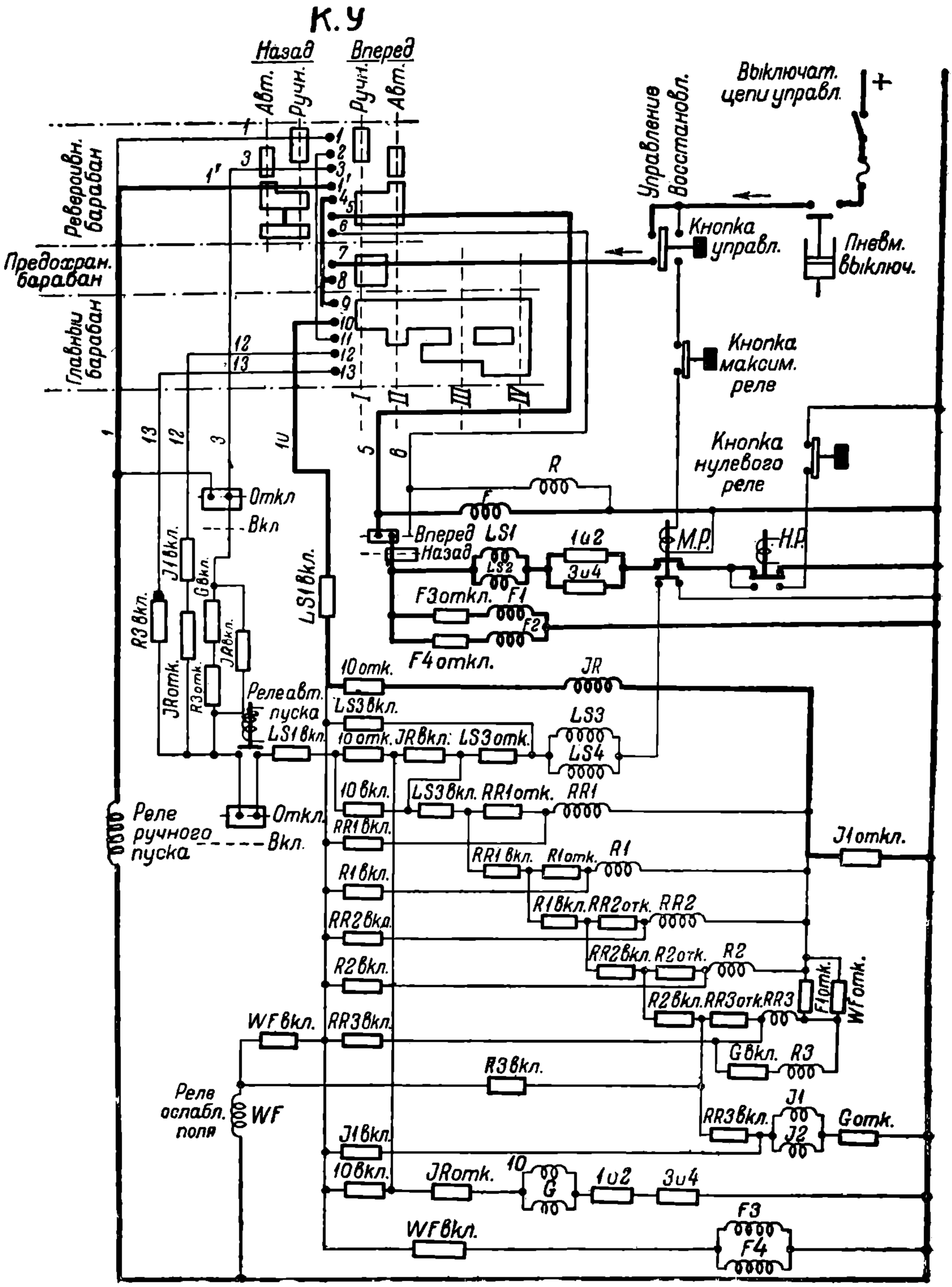


Рис. 232. Цепь управления поездом Северных ж. д. СССР.

жение II к возбужденным ранее цепям добавляется цепь 3. При возбуждении этой цепи производится автоматическое включение всех промежуточных ступеней второго главного положения. Ток по проводу 3 через автоматическое реле пуска, через блокировочные контакты $LS1_{вкл.}$, $10_{откл.}$, $JR_{вкл}$, $LS3_{откл.}$, возбудит катушки *LS*3 и *LS*4. При замыкании контакторов *LS*3 и *LS*4, цепь должна была бы разомкнуться (контакт $LS3_{откл.}$ разомкнется), но так как с возбуждением катушки *LS*3 блокировочный контакт $LS3_{вкл.}$ замкнется раньше, чем разомкнется контакт $LS3_{откл.}$, то про-

НБ УГУНТ (ДІІТ)

изойдет их переблокировка, и контакторы *LS*3 и *LS*4 будут удерживаться в включенном состоянии через контакт $LS3_{вкл.}$ от провода 10, причем нужно иметь в виду, что катушка реле автоматического пуска Р.А.П. уже включена в главную цепь. С замыканием контакторов *LS*3 и *LS*4 промежуточное, так называемое подготовительное сопротивление *S* силовой цепи окажется накоротко замкнутым, и ток в силовой цепи возрастет. Возрастание тока вызовет выключение реле автоматического пуска раньше, чем ток цепи управления успеет пройти по катушке *RR*1, и цепь 3 окажется невозбужденной. При дальнейшем увеличении скорости движения силовой ток вновь упадет, и контакты реле автопуска замкнутся. Тогда ток пойдет через реле пуска, $LS1_{вкл.}$, $10_{откл.}$, $JR_{вкл.}$, $LS3_{вкл.}$, $RR1_{откл.}$ в катушку *RR*1 и возвратится обратно через $J1_{откл.}$. Как и в предыдущем случае, контактор *RR*1 остается включенным, удерживаясь цепью 10 через контакт $RR1_{вкл.}$. Контактор *RR*1 выключит соответствующее сопротивление, ток в силовой цепи снова возрастет, и реле разомкнет цепь раньше, чем ток успеет попасть в контактор *R*1 и т. д. Наконец, когда будет включен контактор *RR*3, и ток в силовой цепи упадет до I_{min}, включится опять реле пуска. Ток через $RR3_{вкл.}$ пойдет по катушкам *J*1 и *J*2 и возвратится через $G_{откл.}$. С включением катушки *J*1 разомкнется контакт $J1_{откл.}$, и цепь с сопротивлениями будет разомкнута. Включенными окажутся контакторы: *LS*1, *LS*2, *LS*3, *LS*4, *J*1, *J*2, F_1 и F_2. Получится последовательное соединение без пусковых сопротивлений, причем питание цепи контакторов по цепи приостановится ($JR_{вкл.}$ будет уже разомкнут).

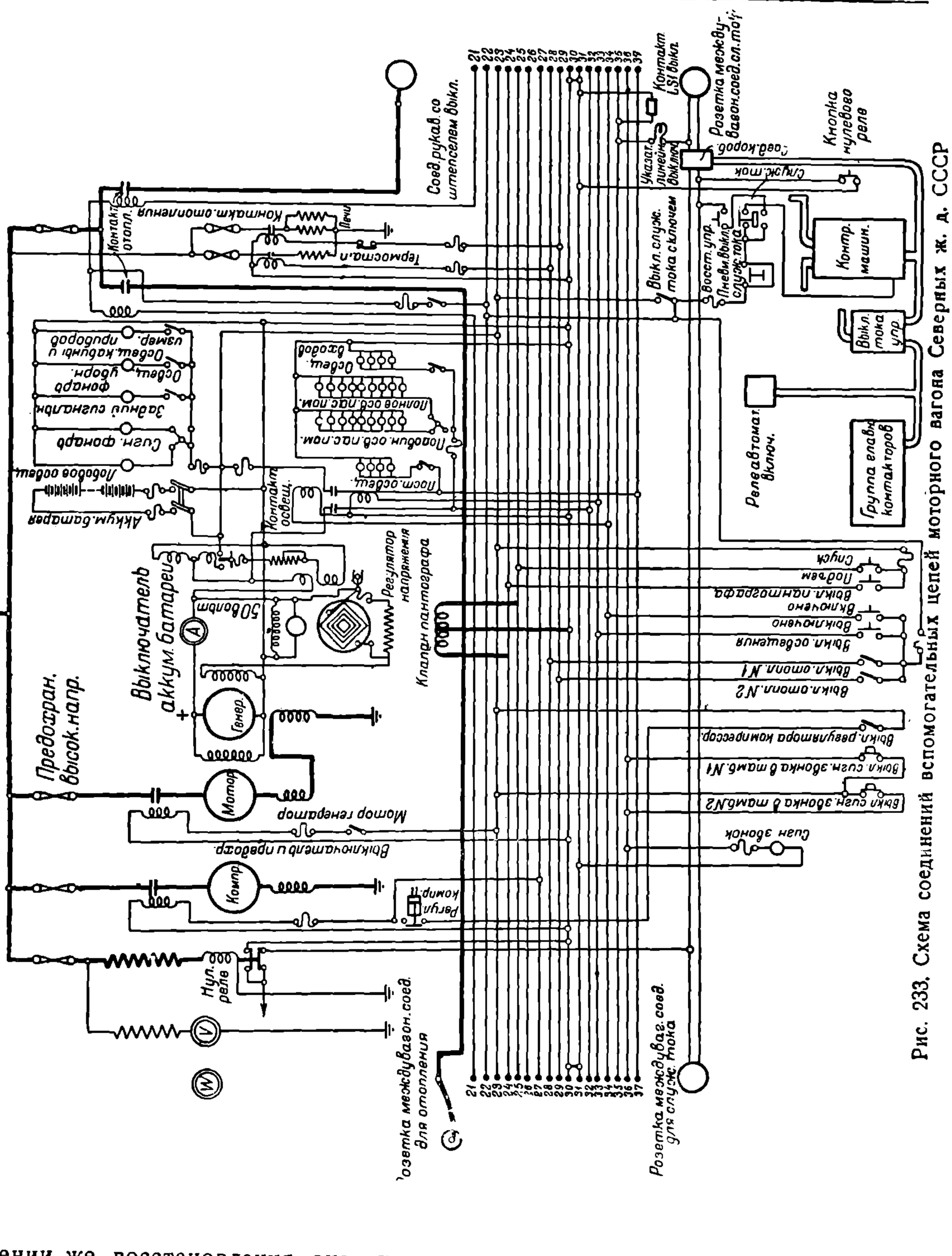
Поворотом ручки *КУ* в положение III возбуждается цепь 12, Проходится положение переходное и затем четыре параллельных позиции. Включение контакторов видно из таблицы рис. 231. При перестановке главной ручки в положение IV возбуждается провод 13. Ток пройдет через $R3_{вкл.}$, реле пуска, $LS1_{вкл}$, $10_{вкл}$, $LS3_{вкл.}$, $RR1_{вкл}$, $R1_{вкл.}$, $R2_{вкл.}$, $R3_{вкл.}$ в реле ослабленного поля, которое в дальнейшем удерживается через блокировочный контакт $WF_{вкл.}$. Вслед за включением *WF* выключаются *RR*3 и *R*3 (потому что прерывается их цепь через блокировочный контакт $WF_{откл.}$), возбуждаются катушки F_3 и F_4, и отключаются контакторы F_1 и F_2. Ток в силовой цепи, увеличиваясь, размыкает реле пуска, не дав снова включиться контакторам *RR*3 и *R*3 через $F_{1_{откл}}$. Включение *RR*3 и *R*3 осуществляется через питающий провод 10 по уменьшении тока в главной цепи до I_{min}.

При необходимости перейти на ручное управление, например, в случае порчи реле автоматического пуска, нужно реверсивную рукоятку перевести на положение „вперед ручное“ или „назад ручное“. Провод 1 при автоматическом пуске находится все время под током, вследствие чего контакты реле ручного пуска стоят в положении „вкл“, не мешая работе автоматического управления (рис. 232). Как только контроллер будет поставлен на ручное управление, возбуждение провода 1 возможно будет только через палец 11 в положениях II, III и IV. В промежуточных же положениях между I и II, между II и III, между III и IV провод 1 не возбуждается. Таким образом, передвинув главную рукоятку из положения I во II и обратно, можно послать только один импульс тока, который будет способен включить лишь одну ступень положения II. Ввиду этого для включения всех ступеней положения II необходимо повторить поворот ручки со ступени I на II семь раз.

Кроме указанных реле, в цепи управления имеются еще два: максимальное (МР) и нулевое (НР). Первое предохраняет моторы от перегрузки, а второе от ненормальных падений напряжений в линии. Оба реле связаны с контакторами *LS*1 и *LS*2. В случае выпадения одного из них, все аппараты управления приходят в исходное положение. Для восстановления максимального реле служит кнопка максимального реле“. Нулевое реле восстанавливается само, а кнопка нулевого реле служит для испытания аппаратов цепи управления при опущенном токоприемнике, причем питание здесь производится от аккумуляторной батареи. Затем в цепи имеются три выключателя: выключатель тока управления, пневматический выключатель и кнопка управления. Выключатель тока управления выключается специальной ручкой. Это дает гарантию включения его только в одном месте поезда. Пневматический выключатель контролирует давление воздуха в резервуарах для питания контакторов и в случае недостатка давления размыкает цепь.

Кнопка управления имеет два положения: восстановление и управление. В положении управления она соединяет цепь управления с положительным проводом.

НБ УДУНТ (ДІІТ)


Кантографу
Предохран. высок.напр.
Выключатель аккум. батареи
Мотор генератор
Выключатель и предохр.
Нул. реле
Розетка междувагон.соед. для отопления
Розетка междувагон.соед. для служ. тока
Групповой переключатель
Реверсор
Контр. машин.
Кнопка нулевого реле
Релеавтомат включ.
Группа главн. контакторов
Выкл. тока упр.
Регулятор напряжения
Клапан пантографа
50 ом
Аккум. батарея
Мотор
Генер.
Комп.
Нул. реле
Вольтм.
Ваттм.
Амперм.
Освещ. кабины и прибор. щитов
Освещ. коридора
Задний сигнальн. фонарь
Служ. фонарь
Лобовой освещ.
Контакт освещ.
Контакт отопл.
Контакт LS1 выкл.
Указат. линейн. выключ.
Сов. рукав со штепселем выкл.
Сов. коридор
Служ. мок
Восст. упр.
Пневм. выкл. служ. тока
Выкл. служ. тока с ключом
Освещ. кабины
Освещ. коридора
Освещ. задней площ.
Освещ. передней площ.
Освещ. лобовой площ.
Освещ. площ. у входа
Освещ. площ. у выхода
Освещ. площ. у тамбура
Освещ. площ. у компрес.
Освещ. площ. у аккум. ящ.
Освещ. площ. у вентил.
Освещ. площ. у реостата
Освещ. площ. у ящ. с песком
Освещ. площ. у ящ. с инстр.
Освещ. площ. у ящ. с инстр.
Освещ. площ. у ящ. с инстр.

электровозу, смотря по-надобности с требуемым по условиям ведения поезда ускорением или замедлением.

Главная силовая цепь, представленная на рис. 234, имеет последовательно-параллельное включение ступеней пусковых сопротивлений; группы двигателей, каждая из двух двигателей, могут соединиться последовательно, последовательно-параллельно и параллельно. Переход с последовательного положения на последующие ступени совершается по методу замыкания группы двигателей на шунтирующее сопротивление. На всех трех ступенях соединения тяговых двигателей используются одни и те же пусковые сопротивления, но с различной группировкой их ступеней.

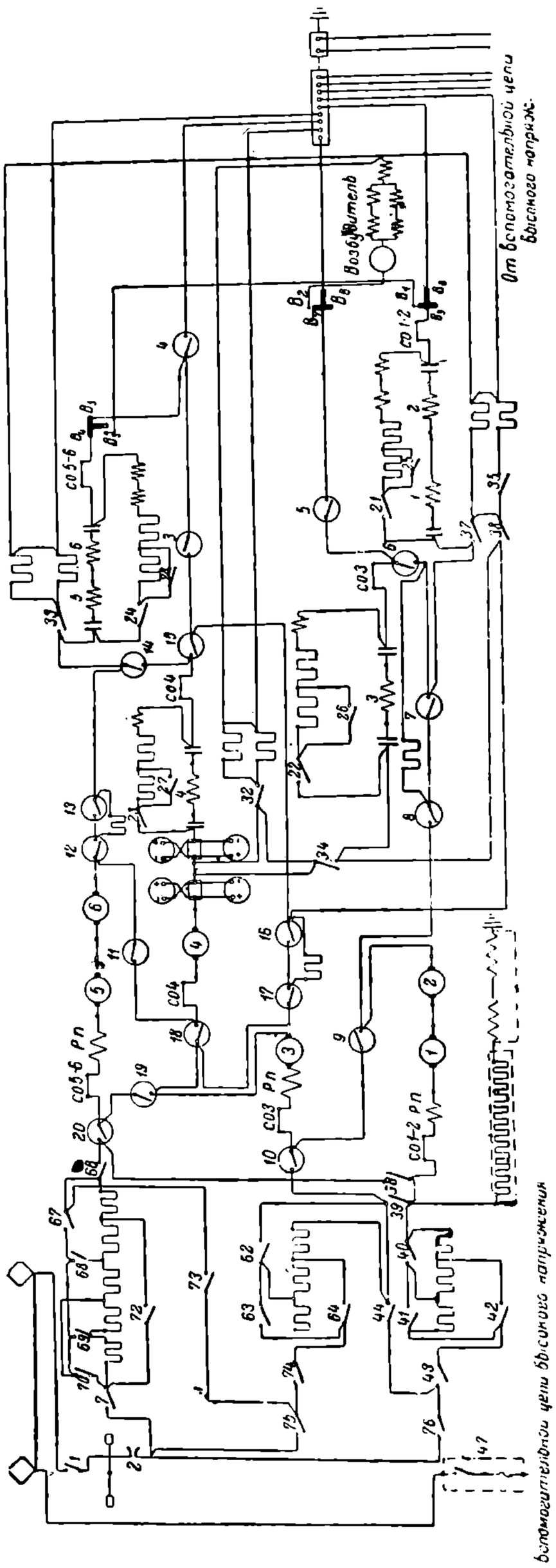


Рис. 234. Силовая цепь Сурамского электровоза GEC.

Рекуперативный режим осуществляется на всех трех ступенях соединения тяговых двигателей. Обмотки возбуждения при этом имеют независимое питание от мотор-генераторного возбудителя, имеющего, в свою очередь независимое возбуждение, регулируемое при помощи сопротивления в цепи возбуждения от контроллера управления. Устойчивость работы при колебаниях напряжения контактной сети достигается включением стабилизирующих сопротивлений. Включение этих сопротивлений в каждую группу тяговых двигателей обеспечивает равномерное распределение нагрузки на отдельные группы машин. Необходимые в схеме переключения с тягового режима при переходе на рекуперативный производит так называемый тормозной переключатель, устроенный по принципу реверсора.

Групповой привод контакторов применен исключительно для перехода с последовательного на последовательно-параллельное и параллельное соединения. Все промежуточные позиции дают индивидуальные контакторы. Схема дает возможность иметь на безреостатных позициях две шунтировки поля двигателей, для чего служат омический и индуктивный шунты.

Защитой тяговых двигателей от перегрузок и коротких замыканий служит быстродействующий выключатель, действующий через реле перегрузки, а при коротких замыканиях еще и от специальной его обмотки. Главная силовая цепь имеет амперметры, контролирующие токи во всех группах тяговых двигателей и на всех позициях. Вольтметр контролирует напряжение в контактном проводе. При перенапряжениях главная цепь размыкается действием реле перенапряжений на быстродействующий выключатель. Подробно за процессом работы системы управления можно проследить на основании рис. 234 и с помощью табл. 35-a и 35-b.

На рис. 235-a и 235-b представлены электрические схемы электровоза советской конструкции, серии ВЛ. Система управления на электровозе ВЛ имеет много общего с предыдущей (рис. 234). Принцип компановки схем сохранен. В отличие

НБ УДУНТ (ДІІТ)

от предыдущей схемы при переходе с последовательного соединения двигателей на последовательно-параллельное и параллельное здесь вместо шунтировки их сопротивлением применен метод короткого замыкания. Кроме того, на электровозе ВЛ впервые в практике электровозостроения применено реостатное торможение по так называемой двойной циклической схеме. Двигатели переходят при торможении на работу сериесными генераторами. Устойчивость параллельной работы сериесных генераторов достигается путем соединения каждой группы якорей двигателей с обмотками возбуждения двух других групп. Таким образом, при реостатном торможении группы из двух двигателей всегда соединены параллельно. Тормозной переключатель (рис. 235) имеет назначение подготовить обмотки возбуждения к требуемой последовательности соединений между ними. Соответствующей блокировкой в цепи управления тормозной переключатель всякий раз при переходе на тормозной режим действует на реверсор, реверсирующий обмотки для сохранения направления протекаемого по ним тока двигателя. Работу системы управления электровозом можно проследить по схеме рис. 235, согласно табл. 36. Нужно особо отметить, что контакторы 96 и 97 замкнуты на всех позициях тягового режима и выключаются при переходе на реостатное торможение. Цепь торможения замыкают главные тормозные контакторы 14 и 25. Последние сблокированы с контакторами 96 и 97, и одновременное включение тех и других невозможно. Быстродействующий выключатель при торможении не включается.

Защита на тяговом режиме та же, что и в схеме рис. 234. При реостатном торможении реле перегрузки и реле максимального напряжения действуют на цепь управления контактов 14 и 25, размыкая их и вслед за ними и другие (2, 3. 54, 55, групповой контактор и т. д.).

При тяговом режиме контакты тормозного переключателя замкнуты так, как указано на силовой схеме. При тормозном режиме контакты соединены следующим образом: Т1—Т11, Т3—Т5, Т7—Т9, Т2—Т4, Т6—Т8, Т10—Т12.

Если какой-либо из двигателей отключен, работа системы начинается с 17-й позиции контроллера. Порядок включения контакторов при отключенном моторе такой же, как при нормальном режиме со следующими исключениями:

а) контактор 29 включается с 17-й позиции до 36 включительно,

б) контактор 28 не включается совсем,

в) контактор 30 включается с 28-й позиции до 36-й включительно; контакторы 6, 7, 8, 12, 13, 26, 27, 34 и 36 не включаются на сериесных позициях.

Все блокировочные контакты изображены на схеме в положении, соответствующем включенному положению контроллера, сериесному включению групповых контакторов и тяговому положению тормозного переключателя.

Все провода низковольтной цепи, обозначенные цифрой (например, 15, 20, 25 и т. д.), принадлежат поездной магистрали, соединяющей отдельные электровозы по схеме многих единиц.

Провода, обозначенные цифрой с буквой или одной буквой (например, 5А, Н12, Н), идут в пределах только каждого данного электровоза.

Номера аппаратов и проводов, поставленные на схеме в скобках, относятся к таким же проводам и аппаратам на втором посту управления.

Контроль правильности работы контакторов при переходе на реостатное торможение показывает стрелка спидометра (рис. 235-b). При переходе с тягового режима она падает до нуля, а затем при включении тормозных контакторов (14, 25, ТК-Т, 2, 3 и т. д.) устанавливается снова, показывая скорость данного режима.

Для производства переключений с последовательного соединения двигателей на последовательно-параллельное и параллельное управление применен метод групповых контакторов с кулачковым валом. В качестве приводного механизма служит механизм с двумя цилиндрами, из которых один имеет связанные поршни, а другой независимые. Первый управляется двумя клапанами, из коих клапан впуска имеет одну обмотку, а клапан выпуска две. Из них одна основная, а вторая добавочная, работающая с первой одновременно только при переходе на параллельное включение для ускорения процесса. Цилиндр с независимыми поршнями имеет клапаны впуска и выпуска с одиночными обмотками (рис. 235-b).

Напряжение генератора управления при колебаниях числа оборотов и нагрузки напряжения системы МУ (рис. 235-b).

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Перечень машин и аппаратов электровоза ВЛ.

№№	Кол.	Наименование машин.
	6	Тяговый двигатель.
	1	Мотор-вентилятор.
	1	Генератор управления.
	2	Мотор-компрессор.
		Наименование аппаратов.
2—14	13	Электропневматический контактор.
15	1	Отключатель моторов с 3 реле перегрузки типа РП-1.
16	1	Реверсор.
17	1	Электропневматические контакторы.
18—20	3	„ „ „
21—23	3	„ „ „
24	1	„ „ „
25—36	12	„ „ „
37—51	18	Групповые контакторы.
52	1	Реверсор.
53	1	Тормозной переключатель.
54—55	2	Электропневматические контакторы.
56—57	2	Электромагнитные контакторы.
58—60	3	„
61	1	Пусковая панель.
62	1	Разъединитель вспомогательной цепи.
63	1	Главный разъединитель.
65	1	Реле минимального напряжения.
66	1	„ максимального „
68	1	Шунт амперметра.
71—74	4	Предохранители вспомогательной машины.
75	1	Быстродействующий выключатель.
78—83	6	Шунты индуктивные.
84	1	Алюминиевый разрядник.
88	1	Автомат обратного тока.
89	1	Регулятор напряжения.
90	1	Щиток с тремя предохранителями.
91	1	Шунт амперметра батареи.
92	1	Амперметр батареи 75—0—75А.
94	1	Выключатель.
95	1	Батарейный выключатель.
98	1	Предохранитель якоря.
99	1	„ возбуждения.
100	1	„ духовки.
105	4	Соединительные зажимы.
106—107	2	Клапан пантографа.
108	1	Регулятор давления.
109	2	Блокировочные вентили торможения.
110	2	Автомат. выкл. управл.
113—114	2	Блокировка дверей выс.-вол. камеры.
115	2	Пантографы.
116	6	Розетки между электровозн. соедин.
117	6	Штепсели. „ „
118	2	Соединительные шины.
119	2	Лобовой фонарь.
120	4	Буферный фонарь.
121	2	Контроллер машиниста.
122	2	Кнопочный выключатель.
123	2	Кнопочный выключатель.
124	2	Выключатель управления.
125	2	Амперметр якоря.
126	4	Вольтметр 4000 V.
127	16	Лампы освещения 25 ватт.
128	10	Штепсельные розетки осветит. приборов.
129	2	„ „ нагрев. „
130	1	Чайник электрический.
131	1	Электропечь духовая.
132	4	Сигнальные лампы 25 ватт.
133	2	Клапан песочницы.
134	2	Выключатель песочницы.
135	2	Сопротивление к лобовому фонарю.
136	8	Электропечи.
137	2	Спидометр компл. с магнето и 2 ук
139	1	Пневматический выкл. управл.
140	1	Аккумуляторная батарея на 50 V.

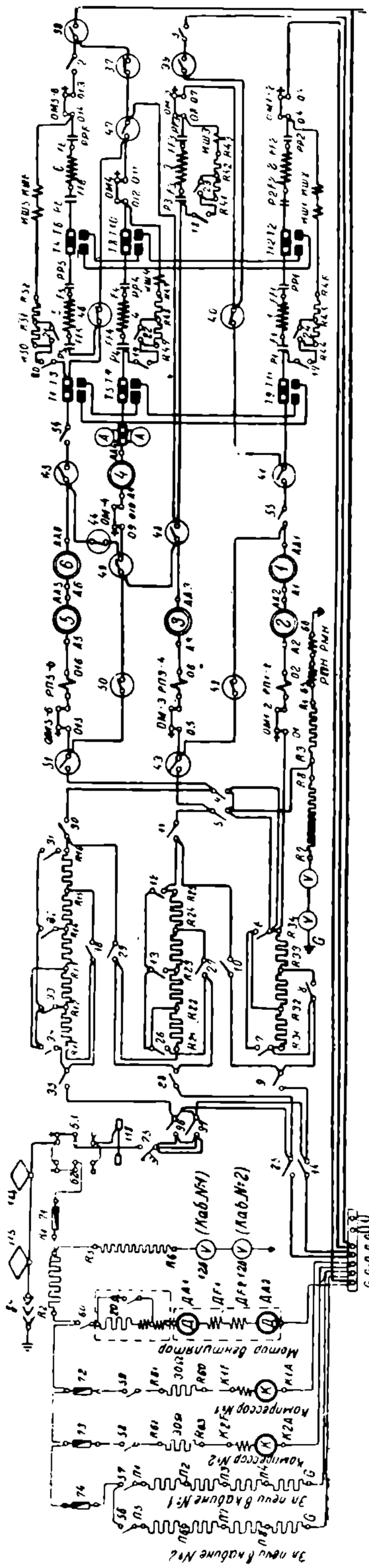
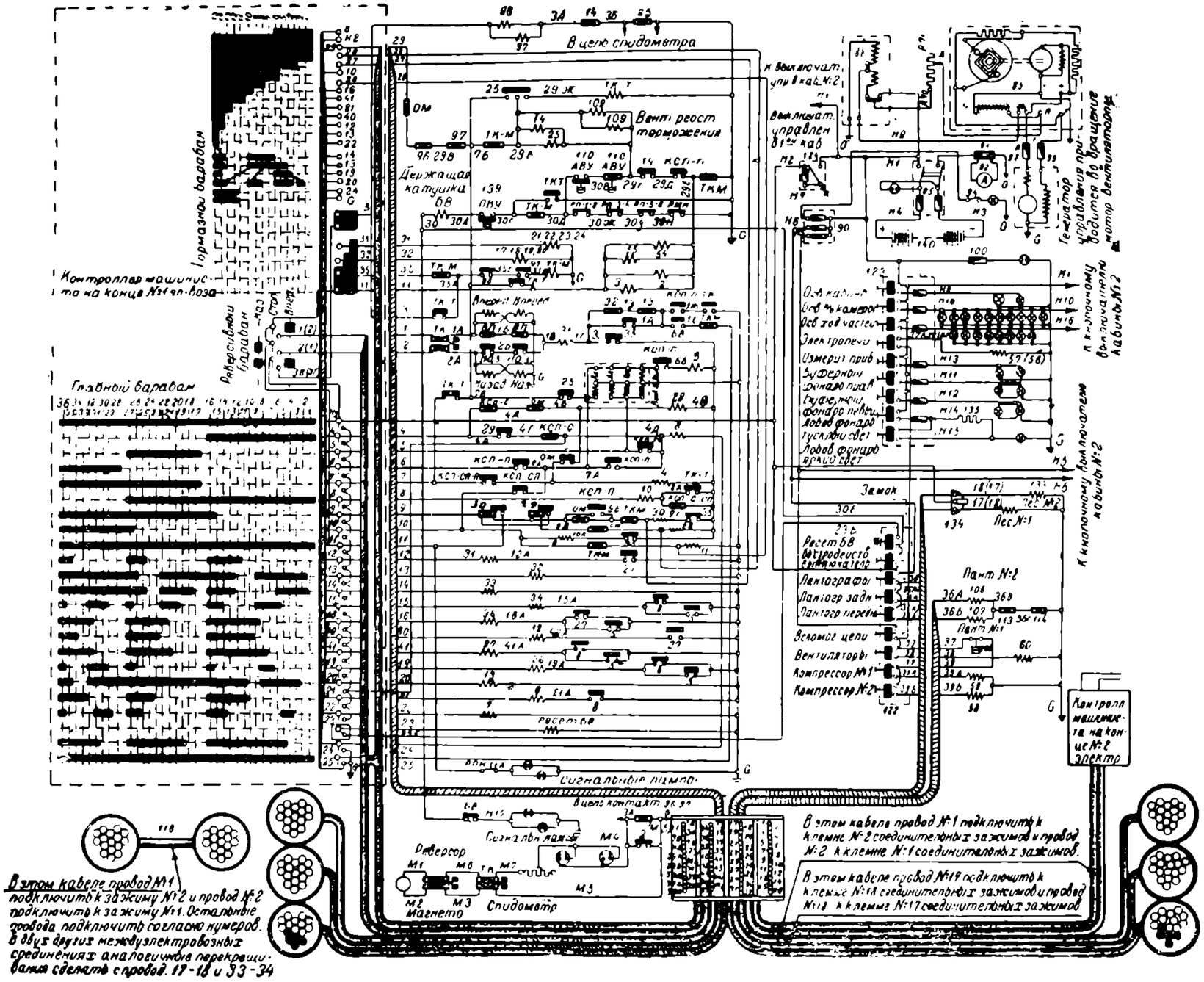


Рис. 235-а. Главная цепь управления электровоза типа ВЛ зав. им. Кирова.

Сопротивления.

R1—R2		Демпферное.
R3—R4		В цепи реле.
R5—R4	1	Вольтметра.
R7—R8	1	„
R11—R34	24	Пусковые.
R45—R52	1	Шунтиров поля.
R61—R62	1	Компрессора.
R62—R63	1	„
R70—R72	1	Регулят. напряжен.

НБ УДУНТ (ДІІТ)



Условные обозначения

- Якоря машин
- Обмотки машин
- Контакторы элементы групповых контакторов
- Контакторы индивидуальные и контакторы реле
- Контакторы турм переключат.
- Контакты реверсора
- Ножи отключат моторов и разъединит ножевого типа
- Сопротивления
- Выстродействующ выключатели
- Плавкие предохранители
- Лампы освещения
- Блокировка дискового типа
- Блокировка с пальцами
- Сигнальные лампы
- Шунты амперметра.

Сокращенные обозначения.

- АВУ - Автоматически выключат управл.
- ПВУ - Пневматически выключат управл.
- КВ - быстродействующ выключатель
- КСП - Групповые контакторы
- С - Сериесные позиции
- СП - Сериесно-параллельные позиции.
- П - Параллельные позиции
- ТК - Тормозной переключатель
- М - Моторный режим
- Т - Тормозной режим
- ИШ - Индуктивный шунт
- ВМ - Выключатель моторов
- РП - Реле перегрузки
- РМН - Реле минимальн напряж
- РМН - Реле максимальн напряж.
- ПП - Полное поле
- ШП - Шунтированное поле.
- В - Вперед
- Н - Назад
- З - Заземление
- Вкл. / Вспом. — Катушки вспом. групп. конт.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Рис. 235-Ь. Вспомогательная цепь управления электровоза типа ВЛ зав. им. Кирова.

Т А Б

Включение контакторов по позициям при последовательном и последова.

Положения	№№ позиций	Групповые контакторы										Индивидуальные									
Тяговый режим: Последовательный	1	3		6		9	11		14		19										
	2	3		6		9	11		14		19										
	3	3		6		9	11		14		19										
	4	3		6		9	11		14		19										
	5	3		6		9	11		14		19										
	6	3		6		9	11		14		19										
	7	3		6		9	11		14		19										
	8	3		6		9	11		14		19										
	9	3		6		9	11		14		19										
	10	3		6		9	11		14		19										
	11	3		6		9	11		14		19										
	12	3		6		9	11		14		19										
	13	3		6		9	11		14		19										
	14	3		6		9	11		14		19										
	15	3		6		9	11		14		19										
	16	3		6		9	11		14		19										
	16	3		6		9	11		14		19	21	22	23	24						
	16	3		6		9	11		14		19	21	22	23	24	25	26	27	28		
Переход	Т	3		6		9	11		14		19										
	Т	3		6		9	11		14	17	19										
	Т			6		9	11		14	17											
Тяговый режим: Последовательно-параллельный	17		4	6		9	11		14	16	17	20									
	18		4	6		9	11		14	16	17	20									
	19		4	6		9	11		14	16	17	20									
	20		4	6		9	11		14	16	17	20									
	21		4	6		9	11		14	16	17	20									
	22		4	6		9	11		14	16	17	20									
	23		4	6		9	11		14	16	17	20									
	24		4	6		9	11		14	16	17	20									
	25		4	6		9	11		14	16	17	20									
	26		4	6		9	11		14	16	17	20									
	27		4	6		9	11		14	16	17	20									
	27		4	6		9	11		14	16	17	20	21	22	23	24					
			4	6		9	11		14	16	17	20	21	22	23	24	25	26	27	28	

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Л И Ц А 35-а.

тельно-параллельном соединении двигателей Сурамского электровоза GEC.

| а л ь н ы е к о н т а к т о р ы | | |

Т А Б

Включение контакторов по позициям при переходе на паралл. соед., при

| Тяговый режим | Положения | №№ позиций | Групповые контакторы | | |

Л И Ц А 35-b.

параллельн. соед. двиг. и при рекуперации Сурамского электровоза GEC.

а л ь н ы е к о н т а к т о р ы																							B_3-B_4	B_4-B_5	B_2-B_7	B_6-B_7	B_1-B_9	B_8-B_1	
		38					43					66		68	69		71			74	75	76		0		0		0	
		38					43					66		68	69		71			74	75	76		0		0		0	
		38					43					66		68	69		71			74	75	76		0		0		0	
		38	39				43					66		68	69		71			74	75	76		0		0		0	
		38	39				43			63		66		68	69		71			74	75	76		0		0		0	
		38	39				43			63		66		68	69		71	72		74	75	76		0		0		0	
		38	39				43			63	64	66					71	72		74	75	76		0		0		0	
		38	39		41		43				64	66	67				71	72		74	75	76		0		0		0	
		38	39		41	42	43				64	66	67		69		71	72		74	75	76		0		0		0	
		38	39			42	43		62		64	66	67		69		71	72		74	75	76		0		0		0	
		38	39	40		42	43		62		64	66	67	68	69		71	72		74	75	76		0		0		0	
		38	39	40	41	42	43		62	63	64	66	67	68	69	70	71	72		74	75	76		0		0		0	
		38	30	40	41	42	43		62	63	64	66	67	68	69	70	71	72		74	75	76		0		0		0	
		38	39	40	41	42	43		62	63	64	66	67	68	69	70	71	72		74	75	76		0		0		0	
36		38					43	44						68			71		73				0		0		0		
36		38					43	44						68			71		73	74			0		0		0		
36		38					43	44						68	69		71		73	74			0		0		0		
36		38					43	44		63				68	69		71		73	74			0		0		0		
36		38					43	44		63	64			68	69		71		73	74			0		0		0		
36		38					43	44			64			68	69	70	71		73	74			0		0		0		
36		38			41		43	44			64			68		70	71		73	74			0		0		0		
36		38			41		43	44			64			68		70	71	72	73	74			0		0		0		
36		38			41		43	44	62		64			68			71	72	73	74			0		0		0		
36		38			41	42	43	44	62		64			68			71	72	73	74			0		0		0		
36		38				42	43	44	62		64		67	68			71	72	73	74			0		0		0		
36		38				42	43	44	62		64		67	68			71	72	73	74			0		0		0		
36		38		40		42	43	44	62		64		67	68			71	72	73	74			0		0		0		
36		38		40		42	43	44	62		64		67	68		70	71	72	73	74			0		0		0		
36		38		40		42	43	44	62	63	64		67	68		70	71		73	74			0		0		0		
36		38		40	41	42	43	44	62	63	64	66	67	68		70	71		73	74	75	76	0		0		0		
36		38		40	41	42	43	44	62	63	64	66	67	68		70	71		73	74	75	76	0		0		0		
	37	38	39	40	41	42	43	44	62	63	64	66	67	68		70	71		73	74	75	76	0		0		0		

Т о р м о з н о й п е р е к л ю ч а т е л ь

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ТАБЛИ

Включение контакто

И н д и в и д у а л ь н ы е

| Положения | Последовательное соединение | | | | | | | | | | | | | | | | Переход | Шунт. поля | Последоват.-параллельн. | | | | | | | | | | | | | | | |

ров электровоза ВЛ.

| Групповые контакторы | | |

Схемы соединений при индивидуальных контакторных системах однофазного тока. На рис. 236 приведена система контакторного управления для моторного вагона при однофазном токе. В отношении принципиального построения управления эта схема не отличается от разобранных выше. Ее особенности обусловлены, главным образом, наличием секционированного трансформатора. Этим объясняется введение такой детали, как предохранительная или ограничительная катушка, назначение которой было уже указано. Система управления применена электропневматическая с электрической блокировкой. Цепь управления питается от вспомогательного трансформатора. Применена кнопка безопасности обозначенная через *D*. Реверсор — электропневматический. Для включения и выключения тока в данном случае, как и вообще при переменном токе, применен масляный выключатель *E*, снабженный ручным приводом и приводом механизированным, электропневматического типа. Выключатель связан с реле перегрузки, что дает ему возможность одновременно служить и в качестве максимального.

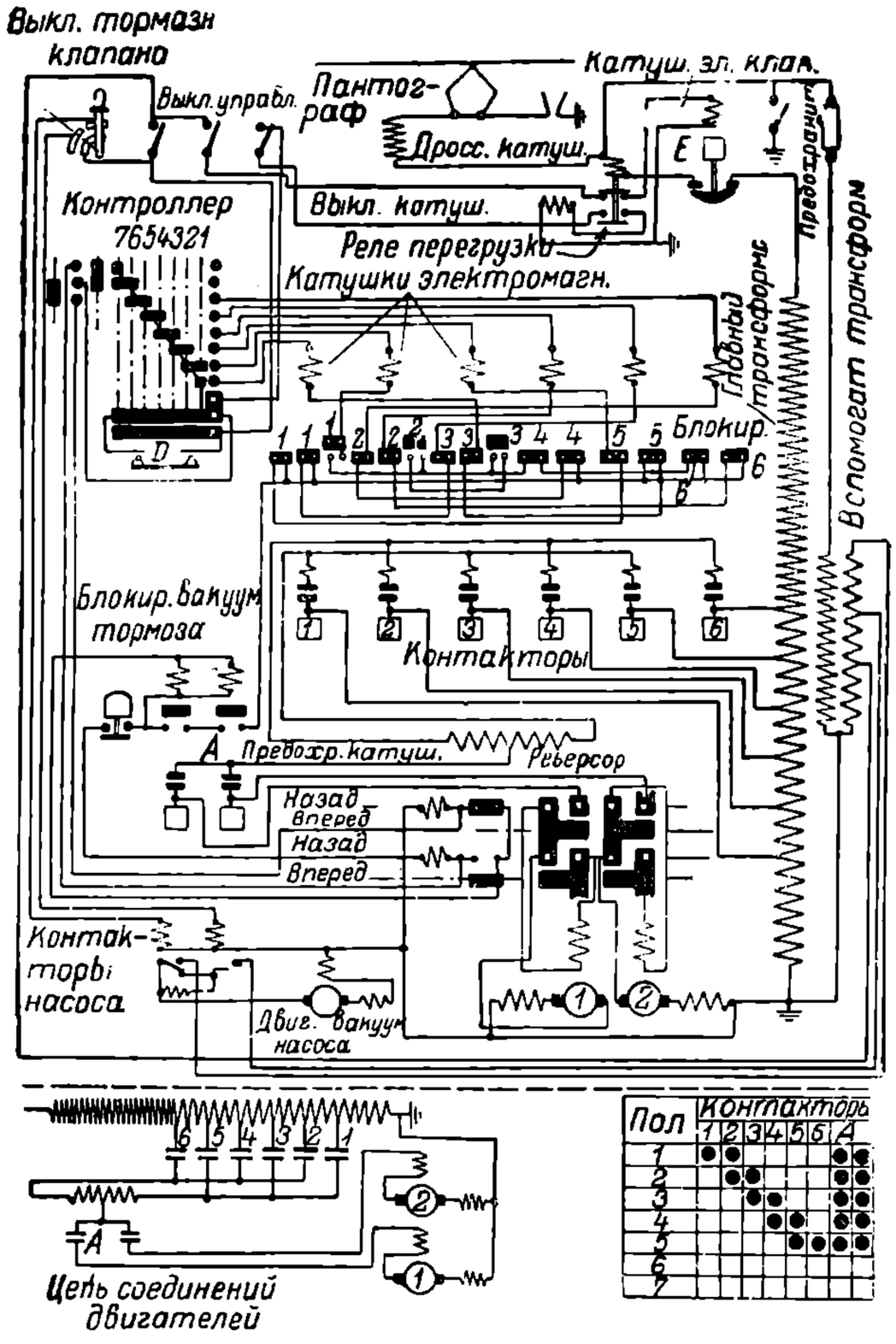


Рис. 236. Схема соединений моторного вагона однофазной ж. д. фирмы Вестингауз.

Особенности схем управления при трехфазной системе. Несколько особняком стоят схемы управления трехфазными электровозами. На рис. 238 приведена система управления для электровоза итальянских ж. д. Здесь применено каскадно-параллельное соединение. При каскадном включении обмотка статора второго двигателя, работающая от ротора первого, секционирована. В системах управления трехфазными двигателями с фазными роторами главные манипуляции в большинстве случаев, как было указано, производятся с помощью водяных реостатов, имеющих механизированный привод. Это обстоятельство в значительной степени упрощает общую схему управления, сильно понижая общее число контакторов системы. Механизмы, применяемые в трехфазных электровозах для реверсии, для

блокировки положено требование предотвратить одновременное включение нечетных или четных контакторов, что дает возможность, как уже было выяснено раньше, устранить опасность короткого замыкания отдельных секций трансформатора.

В качестве примера более сложных электровозных систем управления с индивидуальными контакторами приведена на рис. 237 схема для однофазного электровоза.

НБ УГЛУНТ (ДІІТ)

Рис. 237. Схема управления электровоза шведских ж. д. типа 1—С—С—1 завода SSW.

Обозначения.

A—Амперметр.
EZ—Поездная тормозная магистраль.
C—Измеритель скорости.
D—Дроселъная катушка.
E—Переключатель заземления.
FR—Защитное реле.
G—Штепсельная розетка тока управления.
Gn—Переключатель.
H—Ручной выключатель.
Hz—Крышевая шина с разъединителями.
HO—Масляник с воздушным и ручным приводами и с управлением на расстоянии
HA—Реле высокого напряжения.
J—Воздухонагревательная печь.
Jb—Указатель нагрева подшипников отбойного вала.
K—Штепсельный контакт.
kHE—Ввод высокого напряжения.
LJ—Проходной изолятор воздушной магистрали.
MI и *MII*—Тяговые двигатели.
N—Реле низкого напряжения.
O—Предохранительная катушка.
P—Регулятор напряжения.
R—Реверсор с управлением сжатым воздухом.
S—Токоприемник.
sAz—Приводной цилиндр для токоприемника.
JA—Выключатель для присоединения магистрали многих единиц.
SK—Штепсельная розетка для магистрали многих единиц.
St—Пескосушилка.
T—Главный трансформатор.
TH—Ящик для контакторов.
TM—Вентиляторный двигатель.
TU—Автоматический переключатель.
U—Компрессор.
UB—Резервуар для сжатого воздуха.
UP—Автоматический выключатель компрессора.
US—Автомат для отключения тока управления.
V—Вольтметр.
Va—Вентиль для автоматического тормоза.
Vn—Вентиль для простого тормоза
Vo—Вентиль для масляника высокого напряжения.
Vs—Вентиль песочницы.
Vt—Вентиль для токоприемника.
W—Трехходовой кран.
Wp—Ручной насос.
Z—Свисток.
v—Вперед.
h—Стоп.
r—Назад.
ol—Масляник включен.
oa—Масляник выключен.

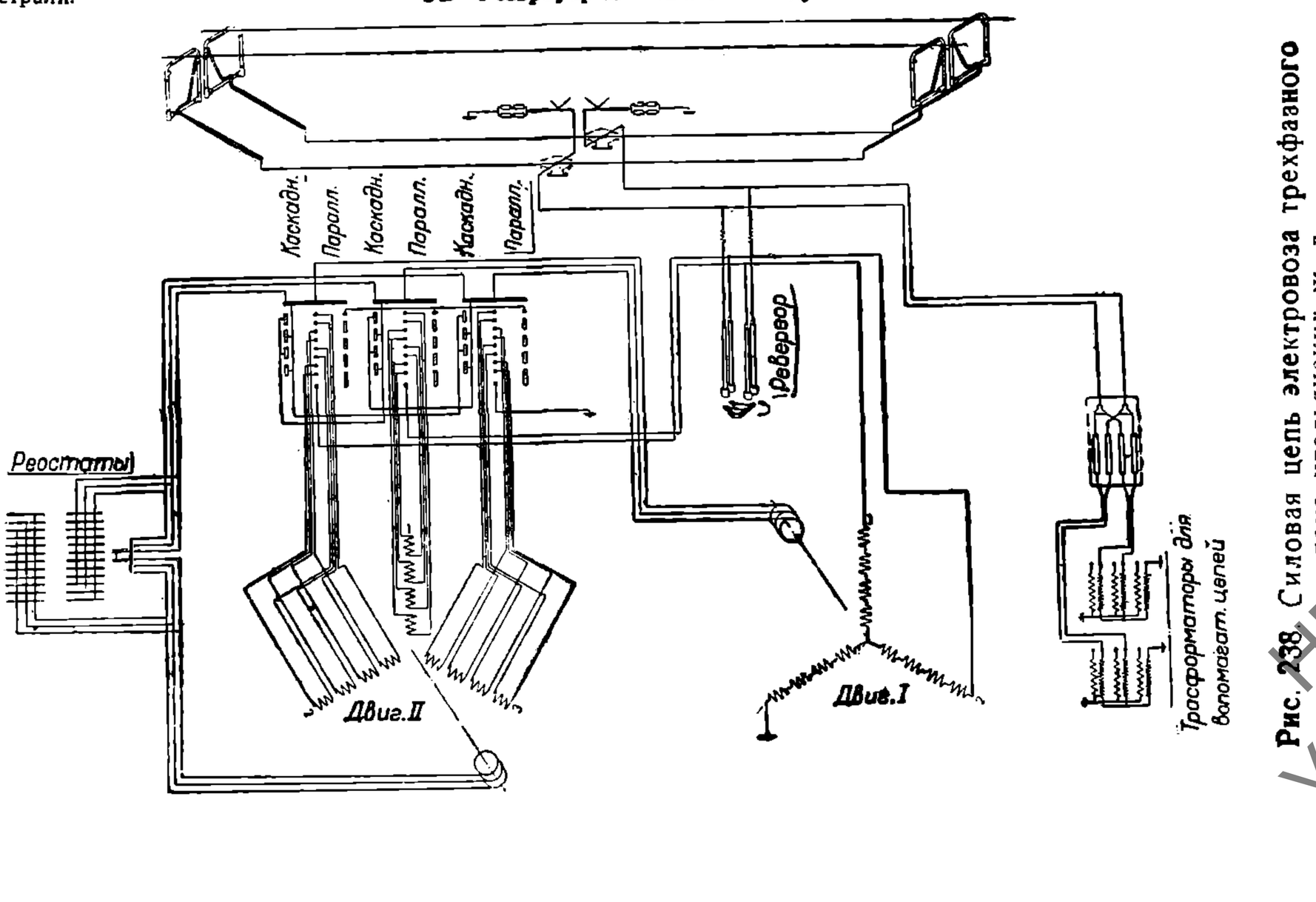


Рис. 238. Силовая цепь электровоза трехфазного тока итальянских ж. д.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

перехода с каскада на параллельное соединение и для переключения числа полюсов. чаще всего выполняются в виде барабанных контроллеров с электропневматическим приводом. В некоторых случаях применяются особые ножевые переключатели. Большим распространением в Италии пользуется стержневой реверсор (рис. 239). Линейные зажимы L_1, L_2, L_3 и зажимы для статорных обмоток 1, 2, 3 в этом переключателе прикреплены с помощью промежуточных фарфоровых втулок к верхнему неподвижному диску. Нижний же диск, с которым скреплены переключательные стержни, сидящие на изоляторах, — подвижной. Он может подниматься, опускаться и вращаться с помощью электропневматического привода. Приведенный реверсор представляет интерес и в том отношении, что он может служить и для выключения главной цепи.

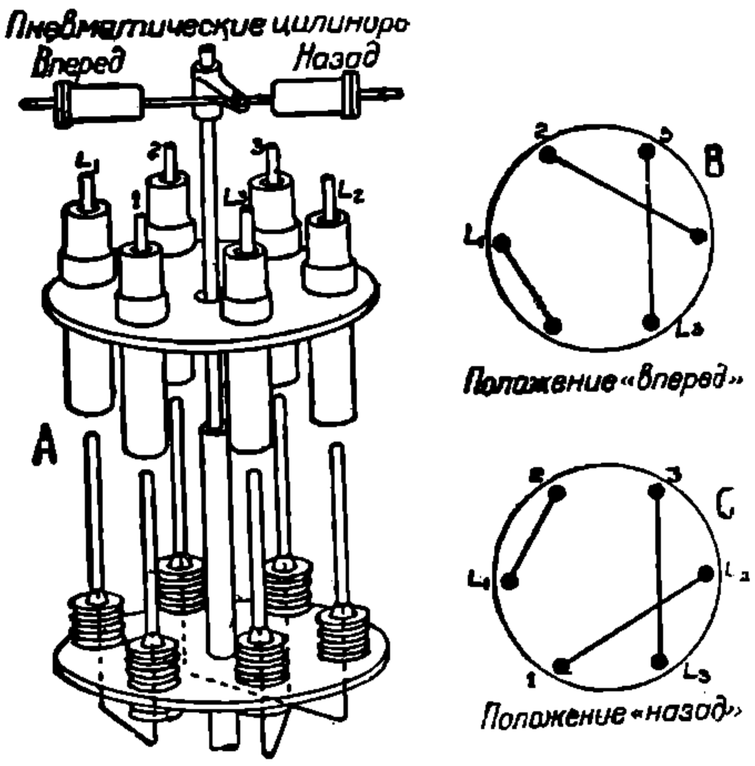


Рис. 239. Реверсор для трехфазных двигателей итальянских ж. д.

На рис. 240 приведена схема управления трехфазным электровозом Симплонской ж. д. при двух двигателях с короткозамкнутыми роторами. Для пуска в ход здесь служит специальный трансформатор. Каждый двигатель имеет по две обмотки на статоре, из которых каждая переключается на два числа полюсов, что дает четыре ходовых скорости.

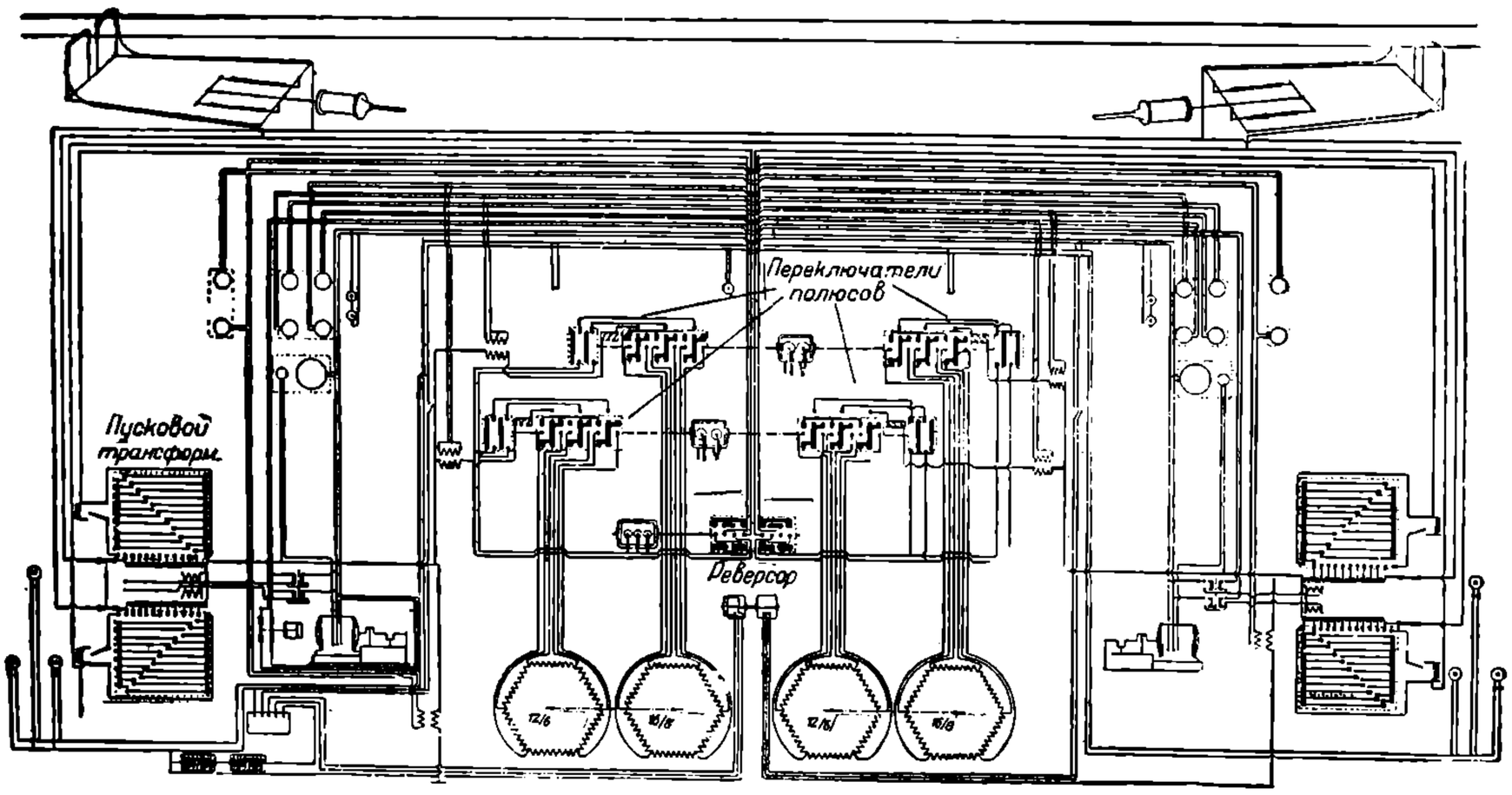


Рис. 240. Схема управления трехфазного электровоза Симплонской ж. д. с короткозамкнутыми двигателями.

6. Защитные и вспомогательные аппараты электрического оборудования подвижного состава.

Защитные аппараты от сверхтоков и перенапряжений. Для выключения и включения цепей постоянного тока применяются различного рода выключатели. Очень часто такие выключатели выполняются в виде максимальных автоматов. Одна из таких схем приведена на рис. 241. Здесь, как и в большинстве подобных случаев, контакты в замкнутом состоянии поддерживаются с помощью защелок. При переходе тока через определенную норму защелка с помощью электромагнитного эффекта отводится, и автомат под действием пружины выключается. Для улучшения дугогашения по большей части применяется магнитное дутье.

При выключении больших токов, особенно при высоких напряжениях, автоматы простейшего вида оказываются непригодными. В данных условиях скорость разрыва цепи должна быть порядка 0,01 sec. Получить такие величины при защелкивающихся

НВ УДУНТ (ДІІТ)

механизмах практически невозможно. Ввиду этого теперь начинают пользоваться большим распространением так называемые быстродействующие автоматы, основанные на принципе поддержания цепи в замкнутом состоянии непосредственно с по-

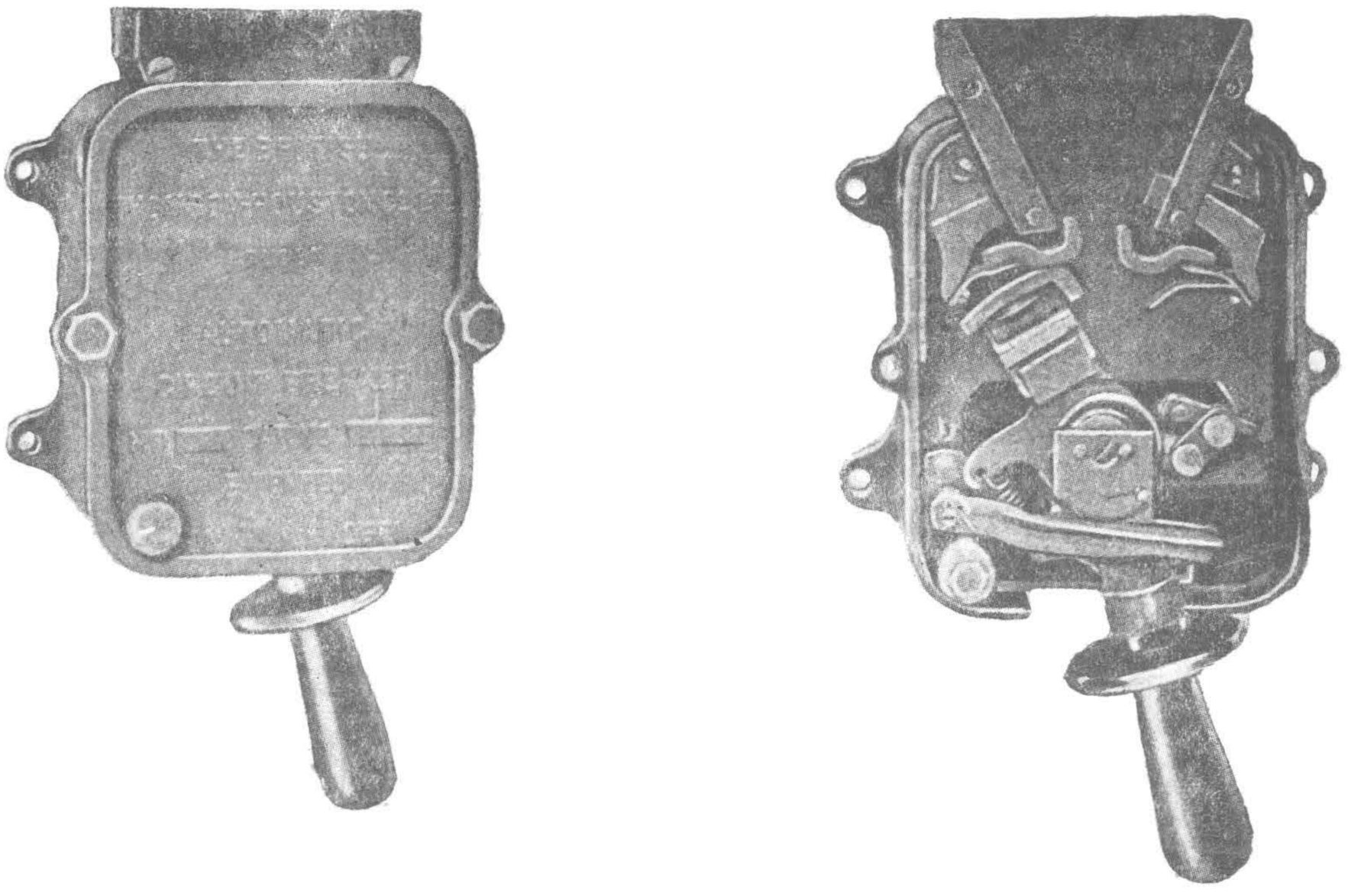


Рис. 241. Автоматический максимальный выключатель трамвайного типа системы TH.

мощью магнитного притяжения. Примером таких автоматов может служить конструкция GEC (рис. 242). Подвижной контакт *B* здесь удерживается в замкнутом состоянии электромагнитом *M*, обмотки которого, последовательная и шунтовая, включены диференциально. При недопустимом усилении тока главная обмотка понижает силу магнитного притяжения сердечника *M*, и подвижной контакт *B* мгновенно отбрасывается пружиной *D*. Дугогашение производится катушкой *S* и катущкой *S'*, причем последняя находится в специальной камере *F'* Благодаря соответствующей форме последней, дуга под влиянием усиленной тяги нагретого воздуха быстро разрывается.

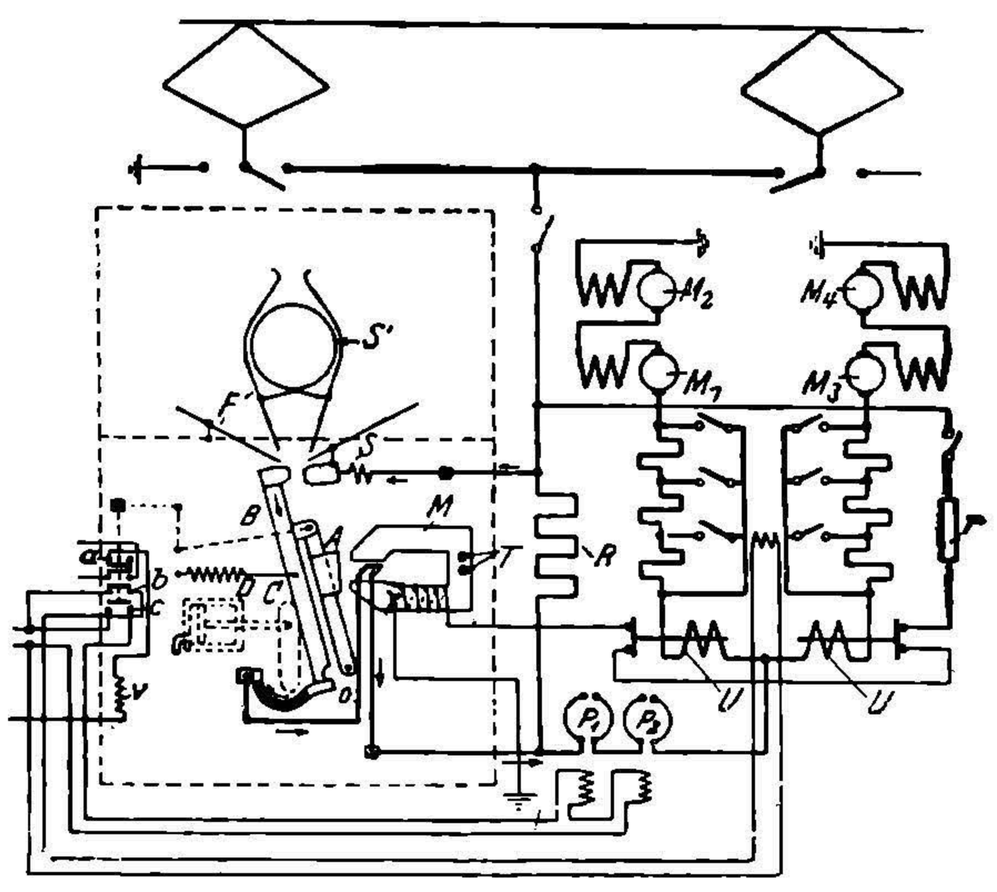


Рис. 242. Схема быстродействующего максимального выключателя GEC.

В целях облегчения процесса разрыва тока параллельно автомату включается шунтирующее сопротивление *R*. Кроме этого, при выключении рычажная передача, связанная с контактом *B*, замыкает блокировочные контакты *b* и *c*. Это влечет за собою включение пусковых сопротивлений двигателя и вслед за этим окончательное размыкание главной цепи с помощью электропневматических контакторов P_1 и P_2.

Помимо указанного, в приведенной системе применена защита каждой цепи двигателей в отдельности через реле перегрузки *U*. В случае возникновения чрезмерных токов в какой-либо из этих цепей шунтовая обмотка электромагнита автомата *M* разрывается, и он выключается. Включение же его производится с помощью пневматического привода *C*.

Вместо выключателей, действующих разобранным способом, иногда применяются автоматы электропневматического типа, например, быстродействующий выключатель

НБ УДУНТ (ДІІТ)

SSW, выключение и включение которого производится сжатым воздухом. Вестингауз для тех же целей применяет выключатели, выполняемые по типу электропневматических контакторов, соединяемых нормально по два последовательно. Для выключения переменного тока почти исключительно применяются масляные выключатели (рис. 243). Они делаются с многократным выключением. В некоторых конструкциях применяется в последние периоды размыкания и в первые моменты замыкания включение предохранительных активных сопротивлений. Монтируются масляные выключатели или в специальных камерах внутри кузова, или чаще на крыше в особых кожухах. Масляные выключатели нормально работают с механизированными приводами электромагнитного или электропневматического типа. Выключение их комбинируется с максимальными реле, а иногда и с реле напряжения.

Для постоянного тока масляные выключатели не применяются. Опыт и теория показывают, что работа их совершенно неудовлетворительна.

Кроме максимальных выключателей, в цепях электрического оборудования подвижного состава применяют также и предохранители, снабжаемые часто особыми рогообразными придатками. Однако, при современных выключателях, как например, быстродействующего типа и масляных, ставить предохранители необязательно.

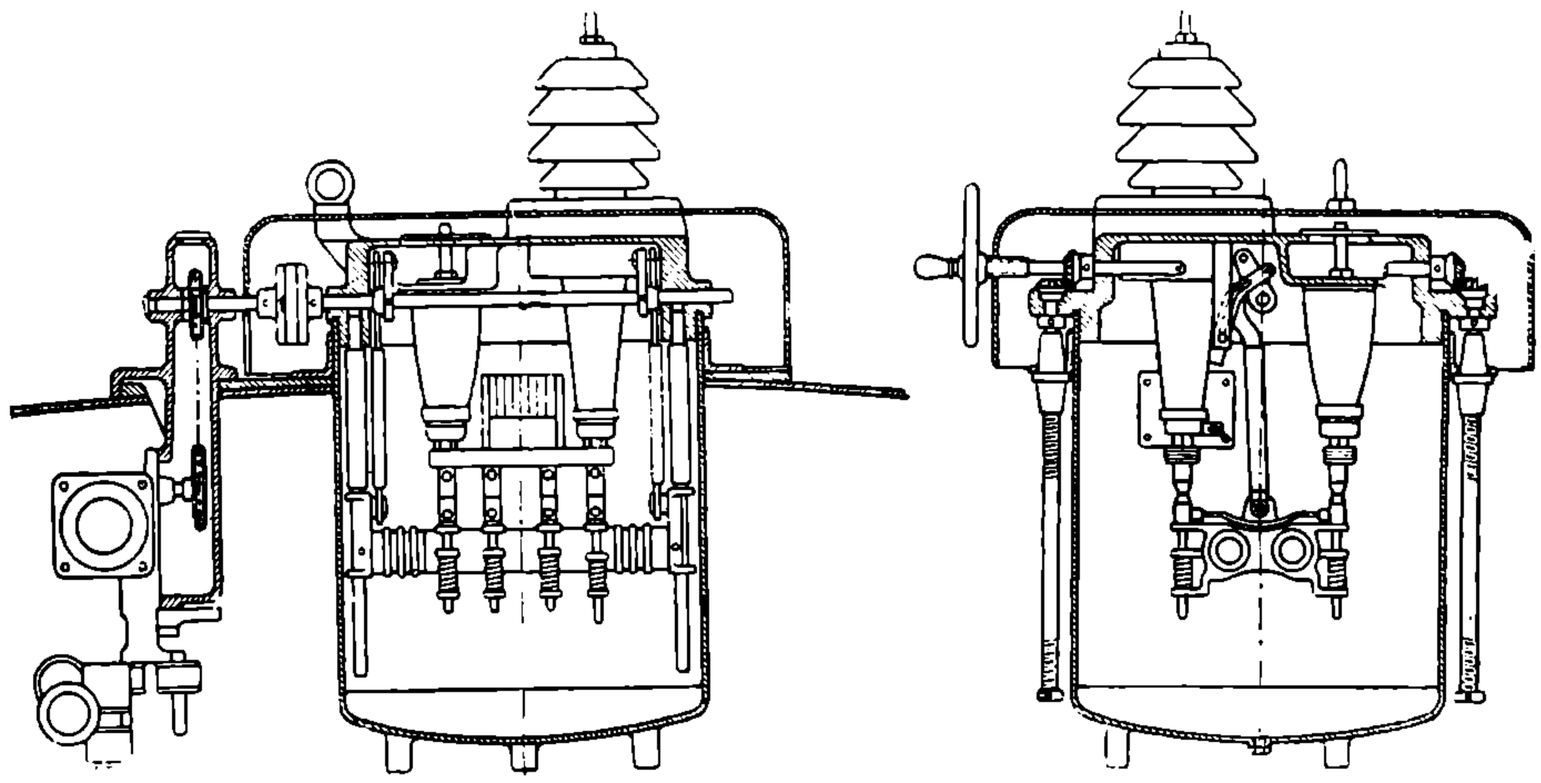


Рис. 243. Масляный выключатель электровозного типа.

Для защиты цепей вагонов и электровозов от перенапряжений применяются различного рода разрядники. Большим распространением пользуются разрядники роговые, с одним или несколькими воздушными промежутками. Для ускорения процесса разрыва дуги они иногда снабжаются специальным магнитным дутьем. Кроме роговых типов, в современной практике находят себе широкое применение разрядники алюминиевые, свинцовые и конденсаторные. Последние типы применяются преимущественно при высоких напряжениях.

Вспомогательные машины и аппараты. В современном подвижном составе электрических ж. д., особенно в электровозах, имеется большое количество вспомогательных агрегатов. Необходимыми принадлежностями каждого современного электровоза являются мотор-компрессор, мотор-вентилятор, динамо для освещения и для цепей управления, а при рекуперации энергии очень часто и специальные машины для ее осуществления.

При переменном токе обслуживание двигателей указанных агрегатов особого затруднения не представляет. От секционированного главного трансформатора можно брать такие напряжения для вспомогательных цепей, которые являются наиболее целесообразными. В качестве двигателей вспомогательных агрегатов при однофазном токе применяются или двигатели последовательные коллекторные, или репульсионные. Шунтовые применяются редко. Для компрессоров предпочтительны двигатели репульсионные, для вентиляторных агрегатов, как более быстроходных,— последовательные. Если имеются насосы для охлаждения трансформаторного масла, то они чаще всего приводятся в движение теми же двигателями, что и вентиляторы. При трехфазном токе в качестве вспомогательных двигателей применяются двигатели асинхронные.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Значительные осложнения со вспомогательными агрегатами возникают при постоянном токе высокого напряжения, потому что изготовление небольших высоковольтных машин постоянного тока встречает значительные осложнения. Практически на одном коллекторе избегают пока напряжения выше 1500 V, хотя некоторые фирмы, как например BBC, считают возможным доходить до 3000 V. Такой тип двигателей начинает получать применение и в СССР. При высоком напряжении вспомогательные двигатели почти исключительно выполняются в виде последовательных, так как производство высоковольтных шунтовых машин из-за осложнений с обмотками возбуждения представляет значительно большие трудности.

Вопрос о питании вспомогательных цепей при постоянном токе высокого напряжения, как уже было отмечено, разрешается двумя основными методами. По первому способу ставится центральный мотор-генератор с высоковольтным двигателем и низковольтным генератором. При напряжениях выше 1500—2000 V двигатель нормально имеет два коллектора и две якорные самостоятельные обмотки, уложенные в одних и тех же впадинах. Генератор получает напряжение порядка 110—220 V. От него питаются вспомогательные агрегаты. По второму способу в качестве основного преобразователя берется динамотор, при котором вспомогательные двигатели могут питаться от половины рабочего напряжения. Преимущество динамотора — в меньшей его чувствительности к коротким замыканиям и перегрузкам. Недостаток — в недостаточном снижении напряжения для вспомогательных агрегатов, вынужденных работать от половины рабочего напряжения. Динамоторы, главным образом, применяются в практике GEC.

При выполнении оборудования часто встречаются различные варианты указанных двух основных типов питания вспомогательных цепей. В целях понижения мощности мотор-генераторов иногда вспомогательные машины, мотор-компрессор и мотор-вентилятор, представляют собою два самостоятельных агрегата, двигатели которых соединены последовательно и непосредственно питаются от сети. В некоторых конструкциях компрессоры и вентиляторы непосредственно или через зубчатые передачи сочленяются с валами мотор-генераторов или динамоторов. Очень часто с ними также сочленены генераторы для освещения и цепей управления. Эти генераторы обычно приходится снабжать особыми регуляторами напряжения, так как скорость вращения приводящих их в движение двигателей по большей части сильно колеблется в зависимости от падения напряжения в тяговой сети.

Подобные регуляторы в большинстве случаев основаны на принципе автоматического воздействия на регулирующие сопротивления, находящиеся в цепи возбуждения генераторов. Изменение включаемых сопротивлений здесь ставится в зависимость от регулируемого напряжения, действующего через реле напряжения (рис. 233 и 235).

7. Области применения различных систем управления.

Система управления поездом с помощью контроллера применяется, главным образом в трамвайных вагонах, а также в различного рода небольших индустриальных электровозах. Управлять контроллером при общей мощности двигателей выше 150 –200 kW становится затруднительным. Контакторные контроллеры в этом отношении открывают бóльшие перспективы, но и они пока еще не дают возможности значительно повысить приведенные цифры.

Большим распространением начинают пользоваться кулачковые групповые приводы. Главная область их применения — моторные вагоны метрополитенов и пригородных ж. д. В электровозах они применяются реже и чаще для вспомогательных механизмов, как, например, реверсоров и выключателей отдельных двигателей или их групп.

Что касается до индивидуальных контакторных систем, то они имеют применение как в моторных вагонах, так и в электровозах. Из них доминирующее распространение начинают получать системы электропневматические. Последние, как только что было указано, нередко комбинируются с групповыми кулачковыми системами. Примером могут служить электровозы, применяемые в СССР.

Система автоматического пуска в настоящее время применяется почти исключительно для моторных вагонов. Для электровозов автоматизация редко находит себе применение. Причина этого заключается в том, что преимущества ее могут быть реализованы только при частом пуске в ход поездов, что имеет место

НБ УГУНТ (ДІІТ)

наиболее часто на дорогах метрополитенного и пригородного типа, которые обслуживаются в большинстве случаев мотор-вагонными составами.

Чтобы дать представление о весовых соотношениях оборудования подвижного состава электрических ж. д., приведена табл. 37.

ТАБЛИЦА 37.

Весовые соотношения электрического оборудования подвижного состава.

Тип подвижного состава	Число двигателей	Мощность каждого двигателя в kW	Тип управления	Вес двигателей в kg	Вес трансформаторов в kg	Вес аппаратов управления и вспомогат. агрег. в kg	Полный вес электрическ. оборуд в kg
Американский моторный вагон нормального типа постоянного тока, напряжен. 600 V	4	18,5	Контроллерное	4×865	—	540	4000
То же	4	37	То же	4×1130	—	1000	5520
	4	55,5	То же	4×1450	—	1000	6800
	4	55,5	Кулачковый привод	4×1450	—	1275	7075
	2	92,5	То же	2×1900	—	1230	5030
„	2	148	То же	2×2900	—	1450	7250
Моторный вагон Северн. жел. дор. СССР. Напряжение 1500 V	4	150	Индивидуальная электропневматическая система контакторов	4×2750	—	4500	15000
Моторный вагон б. Южнофранцузск. жел. дор. однофазного тока. Напряжение 11000 V	4	90	То же	4×2450	5650	3650	19000
То же Баварских жел. дор. Напряжение 16000 V	2	220	То же	2×3300	Около 4000	7900	11900
Электровоз постоянного тока 2400 V GEC	4	225	Электромагнитные контакторы	4×4000	—	11300	27300
То же BBC. Напряжение 1500 V	4	260	Контакторный кулачковый привод	4×4300	—	9800	27000
Электровоз GEC. Напряжение 3000 V с рекуперацией	6	340	Индивидуальное, контакторное электропневматическое	6×5330	—	21560	52740
Электровоз однофазного тока BBC. Напряжение 16000 V	4	440	Контроллер ползунного типа	4×6500	9800	14200	50000
То же Bergmann'a	1	2200	Электропневматическое контакторное	18700	10700	12600	42000
То же Oerlikon a	2	736	Барабанный контроллер с электрическим приводом	2×9800	2×5500	13200	44000

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ОТДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ.

СИСТЕМЫ ТОРМОЖЕНИЯ ПОЕЗДА.

I. МЕХАНИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ТОРМОЖЕНИЯ.

1. Тормозная сила.

В целях увеличения средних скоростей поезда в последней стадии движения приходится прибегать к торможению. Несмотря на то, что в процессе торможения теряются запасы живой силы, которые могли бы быть использованными для поддержания движения при ходе по инерции, торможение является неизбежным спутником нормального процесса движения поезда. Чем с большей скорости начинается торможение и чем оно интенсивнее, тем выше при прочих равных условиях может быть средняя скорость поезда.

Помимо указанного, наличие в поезде тормозов необходимо и с точки зрения безопасности движения. В этом отношении приходится принимать особые меры предусмотрительности, и этим объясняется требование в большинстве случаев иметь в поезде не меньше двух независимых тормозов. В теории тяги нормальное торможение поезда на перегоне носит название рабочего, торможение же в случае опасности называется экстренным.

При изучении торможения необходимо иметь в виду, что период работы поезда под тормозами является одним из самых ответственных периодов движения. В процессе борьбы с аварийностью тормозам необходимо уделять исключительное внимание. Нужно помнить, что одною из наиболее частых причин аварий, влекущих за собою крупнейшие несчастия, являются или неисправности тормозов, или небрежное ими управление, или просто незнание основных законов торможения. Ввиду этого к изучению нижеприводимых законов торможения требуется относиться с особой тщательностью и вниманием.

Очень важен при изучении тормозных процессов вопрос о предельной интенсивности торможения. Оказывается, что во всех случаях получения тормозного эффекта путем затормаживания осей подвижного состава интенсивность торможения может расти только до тех пор, пока колеса вращаются. Как только оси испытывают такое тормозное усилие, при котором они прекращают вращательное движение и начинают скользить по рельсам, тормозной эффект тотчас же падает. В нижеприводимом отделе тяговых расчетов будет подробно изложена теория скольжения колес, и будет показано, что для предотвращения его сила торможения должна быть меньше так называемой силы сцепления колес с рельсами.

Механическое торможение поезда производится путем использования сил трения. Наиболее часто применяется на практике метод торможения с помощью колодок, действующих на бандажи колес. Тормозная сила, получаемая при торможении колодками, подчиняется общим законам трения:

$$R_m = \mu P, \tag{191}$$

где μ — коэфициент трения и P — общее давление колодок на тормозные колеса.

Следует указать, что законы трения твердых тел, которым подчиняется и рассматриваемый процесс, несмотря на труды целого ряда выдающихся экспериментаторов, до сего времени нельзя считать окончательно разрешенными. В частности, ряд опытов Goodmann'a и Sperry показали, что точной пропорциональности между R_m и P не имеется. Однако, для практических целей формулу (191) можно считать достаточно приемлемой.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Очень важное влияние на процесс торможения оказывает коэфициент трения колодок о бандажи. Опытные данные показывают, что он не остается величиной постоянной. На него оказывает влияние целый ряд различных факторов. Из них наиболее важным является скорость движения. Можно считать вполне установленным, что коэфициент трения твердых тел с увеличением скорости падает. Чем выше скорость, тем ниже он становится. В этом отношении особенно показательными нужно считать классические опыты Galton'a, результаты которых приведены в табл. 38.

ТАБЛИЦА 38.

Данные опытов Galton'a о коэфициенте трения колодок о бандажи.

v km/h	0	12	16	24	32	48	64	80	96
φ	0,33	0,244	0,242	0,223	0,192	0,164	0,14	0,116	0,074

Вторым чрезвычайно важным фактором, влияющим на коэфициент трения, является состояние рельсов. При влажных рельсах замечается некоторое уменьшение μ. По сравнению с сухими рельсами он падает значительно. Естественно, что при выборе расчетных коэфициентов трения следует иметь в виду влажное состояние рельсов, как наименее благоприятный случай.

Влияет также на коэфициент трения продолжительность торможения. Чем длительнее процесс торможения, тем ниже становится коэфициент трения. Это подтверждают данные опытов Galton'a, приводимые в табл. 39.

ТАБЛИЦА 39.

Зависимость коэфициента трения от длительности торможения

v km/h	В начале опыта	После 5 сек.	После 10 сек.	После 15 сек.	После 20 сек.
32	0,182	0,152	0,133	0,116	0,099
40	0,171	0,130	0,119	0,081	0,072
60	0,152	0,096	0,083	0,069	—
75	0,132	0,08	0,07	—	—
96	0,072	0,063	0,058	—	—

При практическом решении различных тормозных задач приходится пользоваться для определения коэфициентов трения эмпирическими формулами, большинство которых базируется в основном на данных Galton'a. Все подобные формулы строятся в зависимости от скорости. При выражении последней в km/h главнейшие из них имеют следующую формулу:

Формула Doyen'a:

$$\mu = 0{,}27 - 0{,}002\,v. \tag{192}$$

Формула дорог СССР:

$$\mu = 0{,}3 - 0{,}00225\,v. \tag{193}$$

Формула Frank'a:

$$\mu = 0{,}29\,e^{\frac{v}{90}} \tag{194}$$

Формула Wichert'a:

$$\mu = 0{,}25\,\frac{1 + 0{,}0122\,v}{1 + 0{,}06\,v}. \tag{195}$$

2. Ручные тормоза.

Для приведения в движение колодок и нажатия их на бандажи чаще всего используется или непосредственно усилие машиниста, или сжатый воздух. Наиболее прост первый способ. Общее представление об устройстве ручного тормоза может дать рис. 244. В данном случае усилие руки с помощью промежуточной зубчатой передачи, приводит в движение валик B, на который наматывается цепь, прижимающая колодки к бандажам. Для увеличения усилия между цепью и колодками помещается соответственно подобранная система рычагов. Комбинация зубчатой передачи и рычажной системы дает возможность сильно повысить относительно слабое усилие человека (порядка 16—25 kg), доводя его до нескольких тысяч килограммов.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Приведенная схема ручного тормоза, в отличие от обычных, имеет несколько осложненную форму. Вместо правильной цилиндрической формы барабан для цепи здесь имеет форму улиткообразную. Это дает возможность ускорять действие тормоза, так как при такой форме барабана средняя скорость навивки цепи больше, чем при цилиндрической. Полезно также обратить внимание в данной конструкции на упоры *C* и *D*, назначение которых при отпуске тормоза не давать барабану слишком сильно разматывать цепь, а держать ее в положении, обеспечивающем быструю ее навивку.

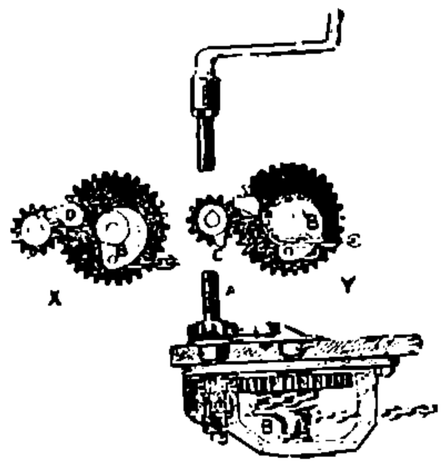


Рис. 244. Быстродействующий ручной тормоз.

Дефекты ручного тормоза: недостаточная быстрота его действия и, главное, значительное утяжеление работы машиниста. Для приведения в движение тормозной системы требуется большое напряжение мускульной силы. Несколько лучше и удобнее ручные тормозные приводы с тормозной ручкой в виде опускающегося и поднимающегося рычага, дающего возможность, помимо мускулов руки, легко использовать вес тела. Из-за своих больших технических недостатков ручные тормоза применяются в настоящее время почти исключительно в качестве запасных или в качестве вспомогательных.

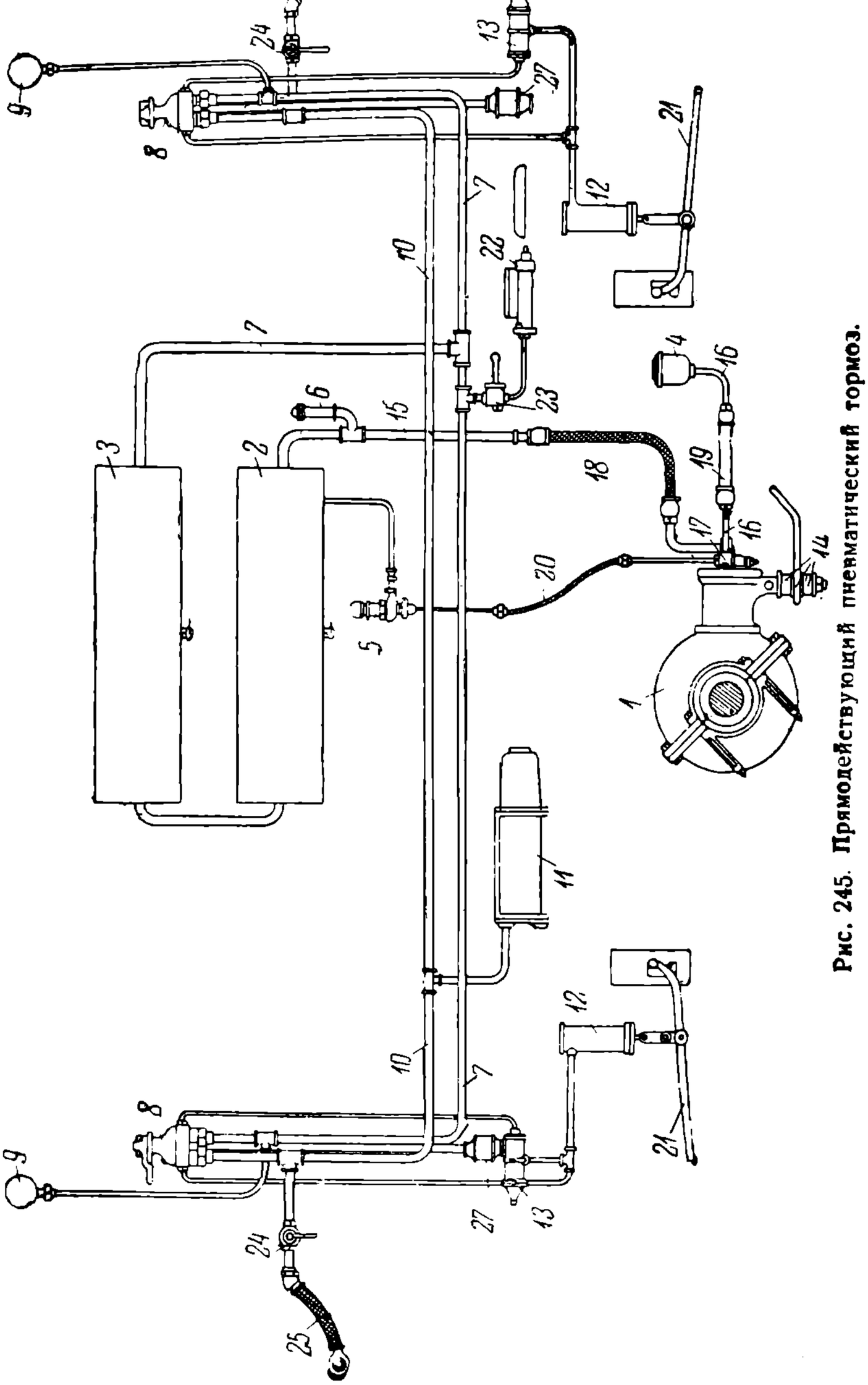


Рис. 245. Прямодействующий пневматический тормоз.

3. Пневматические тормоза.

Пневматические тормоза, действующие по принципу давления, разделяются на два класса: тормоза простые и автоматические. Схема первой системы, выполненная по так называемому прямодействующему типу, приведена на рис. 245. Главные ее части: компрессор 1, цилиндры для сжатого воздуха 2 и 3, краны машиниста 8 для всех манипуляций по управлению тормозом и тормозной цилиндр 11.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Работа тормоза начинается с нагнетания воздуха в главные воздушные резервуары. В этот период ручка крана машиниста стоит в так называемом положении оттормаживания, при котором главные резервуары отсоединяются от главного воздухопровода 10, причем последний вместе с тормозным цилиндром сообщается с атмосферой. При таком положении пружины, находящиеся внутри тормозного цилиндра, а также и действующие непосредственно на тормозную рычажную систему, отводят колодки от бандажей. Для торможения ручка крана машиниста ставится на положение торможения. Тогда главный воздухопровод отключается от атмосферы и через кран машиниста соединяется с главными резервуарами. Давлением воздуха поршень тормозного цилиндра приводится в движение, и колодки прижимаются к бандажам. Для прекращения тормозного эффекта и отпуска колодок ручка крана машиниста снова ставится в положение оттормаживания.

Компрессорный цилиндр имеет два клапана: всасывающий и нагнетательный. Для предотвращения чрезмерного давления воздуха применяется регулятор 5, присоединяемый с одной стороны к цилиндру всасывающего клапана, а с другой — к главному резервуару, нормально разобщенным друг от друга. В случае превышения нормы давления пружинящая диафрагма регулятора прогибается и открывает воздуху

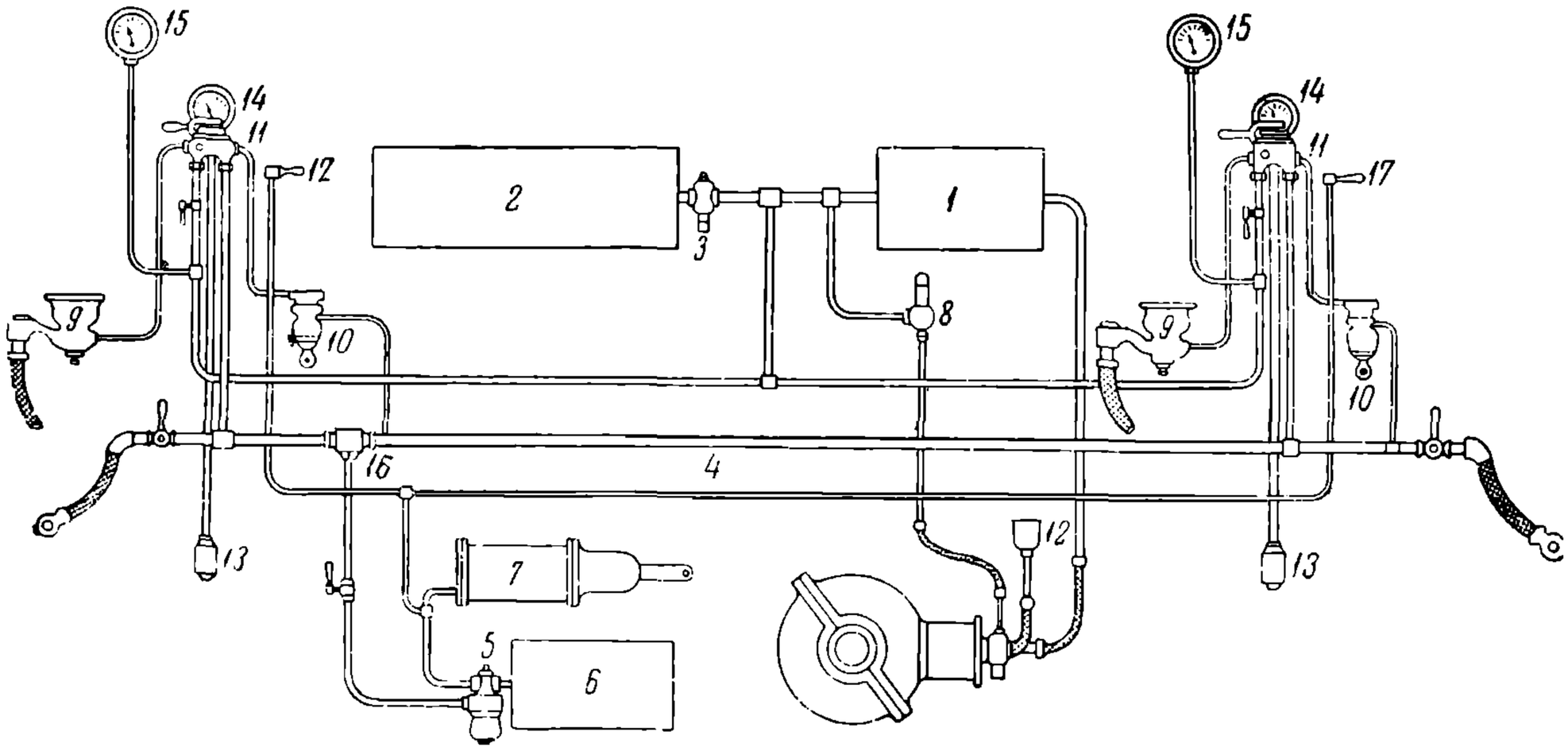


Рис. 246. Автоматический тормоз Вестингауза.

доступ через трубу 20 под поршенек всасывающего клапана. Это вызывает подъем последнего вверх с задержкой его в этом положении до тех пор, пока давление в главном цилиндре не упадет до нормы. Пока всасывающий клапан приподнят, компрессор работает в холостую, так как при этом условии его цилиндр все время сообщается с атмосферой, и нагнетательный клапан закрыт.

Среди вспомогательных частей рассматриваемый тормоз имеет пневматический привод для песочницы и предохранительной сетки. В случае необходимости, воздух через кран машиниста может быть подан в песочницу для посыпки рельсов песком. Это особенно важно при торможении, хотя большинство систем дает возможность посыпать рельсы и в положениях ходовых. Как будет указано ниже, песок содействует устранению скольжения колес. В случае экстренного торможения, когда на рельсовом пути находятся предметы, подвергающиеся опасности быть подмятыми под поезд, одновременно с песочницами воздух подается в цилиндры предохранительных сеток 12. Тогда сетки опускаются на рельсы и не дают попасть под вагон находящимся на пути предметам. Подъем сеток и поддержание их в верхнем положении достигаются противовесами. Очень часто сжатый воздух используется также для звонков, приводимых в действие или через кран машиниста, или через особый клапан, работающий от ручного или ножного привода.

В случае необходимости иметь тормозные устройства в прицепных вагонах главный воздухопровод гибкими рукавами соединяется со всеми следующими друг за другом вагонами. Прицепная часть состава оборудуется только тормозными цилиндрами. Достоинство прямодействующего тормоза — его простота и возможность

НБ УДУНТ (ДІІТ)

плавно регулировать процесс торможения, так как количество подаваемого в тормозной цилиндр воздуха зависит от машиниста. Недостаток его — прекращение тормозного эффекта в случае разрыва поезда. Последнее обстоятельство чрезвычайно важно и является одной из главных причин того, что простые прямодействующие тормоза разрешается применять только при одном вагоне или в крайнем случае при трех. Главная область их применения — трамвайные вагоны. Для железнодорожных поездов простые прямодействующие системы не применяются.

Значительно более совершенны в отношении безопасности движения, особенно при больших поездных составах, автоматические тормоза, первым из которых был знаменитый тормоз Вестингауза. Принципы его действия можно проследить на рис. 246. Воздух под давлением компрессора прежде всего поступает в резервуар 1, соединенный через промежуточный клапан 3 со вторым резервуаром 2. Назначение клапана 3, называемого клапаном двойного действия, заключается в том, чтобы открывать доступ воздуха в цилиндр 2 только после того, как в цилиндре 1 возникло давление, достаточное для производства надлежащего тормозного эффекта. Это имеет большое значение при компрессорах, работающих от оси подвижного состава. При них по выходе поезда из парка требуется достаточно длительный промежуток времени, прежде чем воздух достигает требуемого давления. Двойной клапан имеет пружинный затвор. Пока давление воздуха недостаточно для надежного торможения, этот затвор закрыт. Как только давление превысит эту норму, пружина затвора отпускает его, и воздух проходит в резервуар 2.

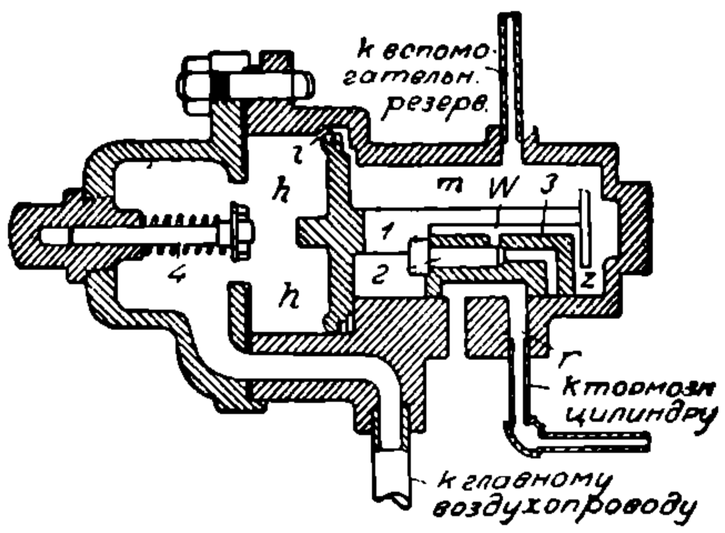


Рис. 247. Тройной клапан тормоза Вестингауза.

Из главных резервуаров так же, как и в тормозе прямого действия, воздух поступает в главный воздухопровод 4, соединенный с так называемым тройным клапаном 5, являющимся основной деталью тормоза Вестингауза (рис. 247). Кроме соединения с главной магистралью, тройной клапан имеет соединения с цилиндрами вспомогательным 6 и тормозным 7, а также и с атмосферой. В рассматриваемом положении оттормаживания воздух из главного воздухопровода через щели *i* поступает в запасной цилиндр 6. В это время тормозной цилиндр сообщается с атмосферой. Для торможения главный воздухопровод через кран машиниста соединяется с атмосферой. Это влечет за собой передвижение поршня тройного клапана с закрытием щели *i*. Одновременно с этим золотник 3 прерывает сообщение тормозного цилиндра с атмосферой и соединяет его с резервуаром 6, что и производит тормозной эффект. Для отпуска тормозов достаточно снова соединить главный воздухопровод с главными резервуарами, после чего получится картина, аналогичная первоначальному положению. При выпуске воздуха из тормозного цилиндра пружины отводят колодки от бандажей. Торможение, производимое в головной единице поезда, передается и на задние, если последние имеют хотя бы только части тормоза, начиная с главного воздухопровода.

Как следует из вышеизложенного, тормозной эффект в тормозе Вестингауза возникает, когда главный воздухопровод приходит в сообщение с атмосферой. Какая бы причина ни вызывала это, тормоз приходит в действие. Ввиду этого при разрыве поезда также возникает тормозной эффект и притом автоматически без участия машиниста, почему данный тормоз и получил название автоматического.

При больших достоинствах автоматический тормоз Вестингауза имеет некоторые недочеты. Основной недостаток его в том, что он не обладает достаточной эластичностью в отношении регулирования интенсивности торможения. Кроме того, он истощим. Непрерывный тормозной эффект у него получается только за счет того воздуха, который сосредоточен в вспомогательном резервуаре 6. Если по условиям длительности торможения требуется дать в тормозной цилиндр новые порции воздуха, то приходится сначала произвести оттормаживание, так как только после этого воздух может попасть во вспомогательный, а затем и в тормозные резервуары. В указанном отношении тормоза прямого действия имеют преимущество. При наличии у них прямой связи между главными цилиндрами и тормозным машинист, изменяя степень открытия воздушного прохода, может свободно регулировать

НБ УРУНТ (ДІІТ)

интенсивность торможения. Истощимость торможения также здесь не имеет места, так как тормозной цилиндр во все время торможения соединен с главным цилиндром, пополняющим свои запасы воздуха непосредственно от компрессора. Кроме того, недостатком тормоза Вестингауза является относительно медленная передача падения давления от головной поездной единицы к последующим, что задерживает тормозной эффект у последних.

Для улучшения действия тормоза Вестингауз ввел некоторые его усовершенствования. Одним из них является применение, вместо простых тройных клапанов так называемых быстродействующих типов (рис. 248). При работе с такими клапанами интенсивность торможения зависит от степени разрежения в главном воздухопроводе. При рабочем торможении разрежение дается небольшое, вследствие чего поршенек 1 тройного клапана перемещается только на часть своего полного хода. При таком положении золотник 3 действует так же, как и при простом тройном клапане. Для производства экстренного же торможения в главном воздухопроводе создается более сильное разрежение, вызывающее передвижение золотника 3 в его крайнее левое положение. Это влечет за собой открытие канала *t* и под действием проникающего через него воздуха опускание поршенька 4 и клапана 5. Одновременно с этим воздух из главного воздухопровода, встречая в камере *y* несколько пониженное давление, приподнимает клапан 6 и устремляется в тормозной цилиндр Это дает возможность значительно ускорить повышение давления в тормозном цилиндре. Кроме того, при такой системе энергичнее передается падение давления вдоль поезда, так как увеличивается степень одновременности действия тормозов под всем составом. Быстродействующие тройные клапаны находят себе преимущественное применение в метрополитенной и железнодорожной практике.

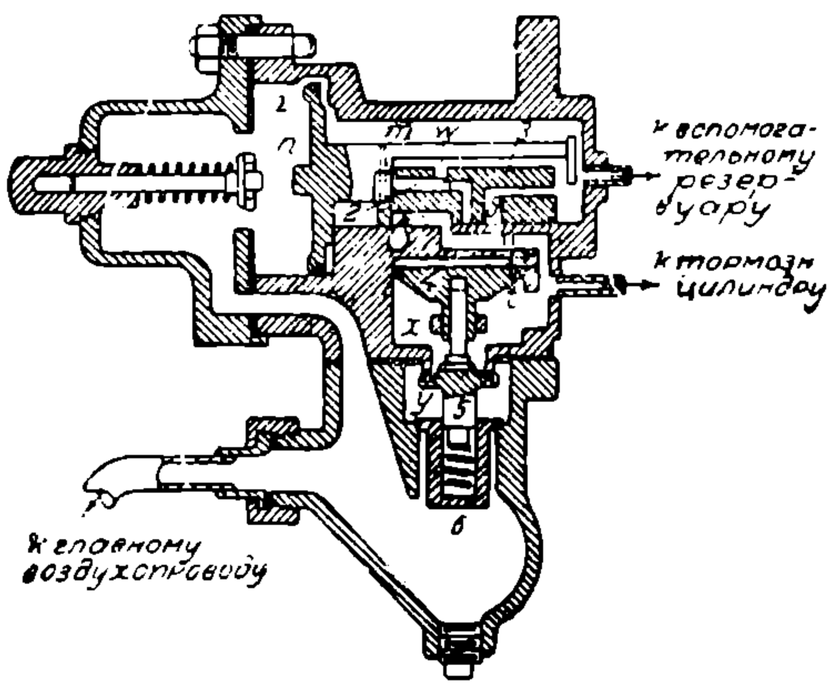


Рис. 248. Быстродействующий тройной клапан тормоза Вестингауза.

Из числа тормозов, работающих по схеме Вестингауза, но с некоторым устранением его недостатков, следует обратить внимание на тормоз Кнорра, схема которого в выполнении для трамвайных вагонов приведена на рис. 249. Характерной его особенностью является комбинированная работа тормоза на моторном вагоне. Помимо нормальной системы Вестингауза, моторный вагон при тормозе Кнорра может тормозиться прямодействующим эффектом. Для этих целей к тормозному цилиндру, кроме воздухопровода от вспомогательного цилиндра, приводится воздух через кран машиниста и прямодействующую магистраль 17 непосредственно от главных резервуаров.

Особенно большие затруднения при торможении поезда получаются у длинных товарных составов. Применительно к ним тормоз Вестингауза в его простейшем выполнении часто требует значительных улучшений. При длинных поездных составах требуются неистощимость торможения, плавность оттормаживания и быстрая передача падения давления вдоль поездной магистрали. Кроме того, весьма важно иметь возможность регулировать силу нажатия колодок на бандажи в зависимости от степени загрузки отдельных вагонов. Для соблюдения этих требований предложено значительное количество различных систем, например системы Американской компании прямодействующих тормозов, Drolshammer'a, Казанцева и Матросова.

Все эти системы относятся к прямодействующим автоматическим системам, характерной особенностью которых является осуществление торможения под всем составом поезда путем питания тормозных цилиндров не только от запасных, но и от главных резервуаров через поездную магистраль.

Одним из лучших современных тормозов такого типа нужно считать тормоз Матросова. Идею этого тормоза проще всего проследить по первому простейшему его варианту (рис. 250). В отличие от тормоза Вестингауза здесь передвижение основного распределяющего механизма, в данном случае поршенька 6, происходит под действием разности давления в магистрали и давления в особой камере постоянного давления. Воздух в резервуар и трубопровод постоянного давления подается по главной магистрали из главных резервуаров.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Для торможения в магистрали создается разрежение. Это вызывает перемещение вниз поршня 6. Вместе с этим поршеньком опускается вниз и стерженек 2, который своим нижним концом прикрывает отверстие, сообщающее тормозной цилиндр с атмосферой. Вместе с тем этот же стержень 2, приподнявшись несколько со сво-

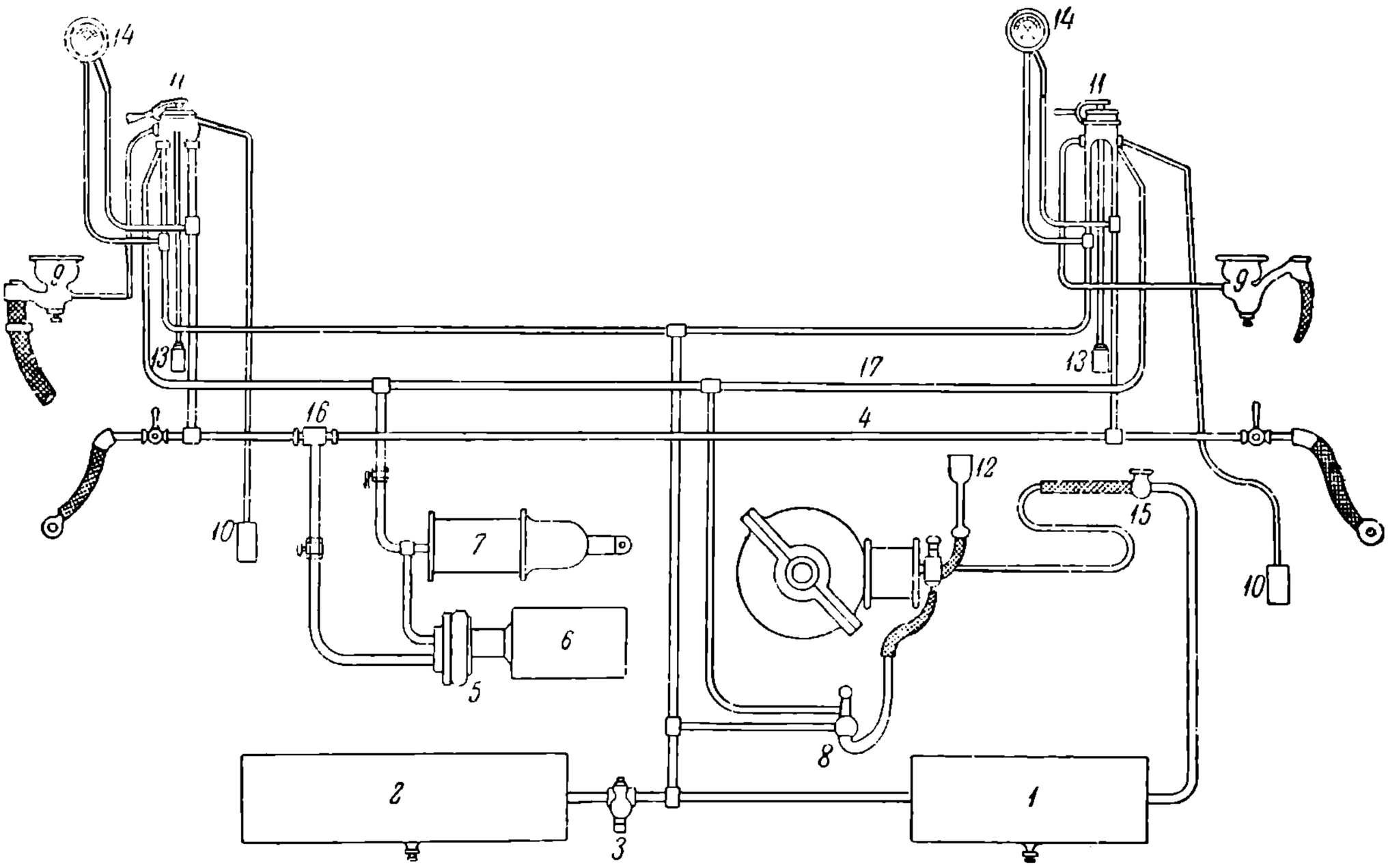


Рис. 249. Схема трамвайного тормоза Кнорра.

его седла, начинает пропускать воздух из запасного цилиндра в тормозной через отверстия, имеющиеся в золотнике 1. Величина хода поршня может варииро вать в зависимости от степени ослабления давления в магистрали. В случае нужды передвижение поршня 6 можно производить по ступеням. Весьма важно то, что каждой такой ступени в тормозном цилиндре будет соответствовать увеличение давления также по ступеням. То или другое давление на каждой ступени фиксируется взаимодействием давления, оказываемого воздухом тормозного цилиндра на поршень 3 и пружины 4, противодействующей сжимающему эффекту этого поршня. Как только давление в тормозном цилиндре превзойдет назначенную для него норму, поршень 3 начнет преодолевать сопротивление пружины 4 и будет опускаться вниз. При таком давлении, не влияющем на зафиксированное положение поршня 6, стерженек 2 сядет на свое седло и откроет проход для воздуха из тормозного цилиндра в атмосферу через отверстие в поршне 3. В момент, когда давление в тормозном цилиндре упадет до требуемого для данной ступени, пружина 4 поднимет поршень 3 вверх настолько, что стержень 2 снова закроет проходное отверстие в атмосферу, фиксируя этим требуемое давление в тормозном цилиндре. Легко сообразить, что и отпуск тормоза можно сделать таким же постепенным. Для этого требуется только постепенный ступенчатый впуск воздуха в магистраль.

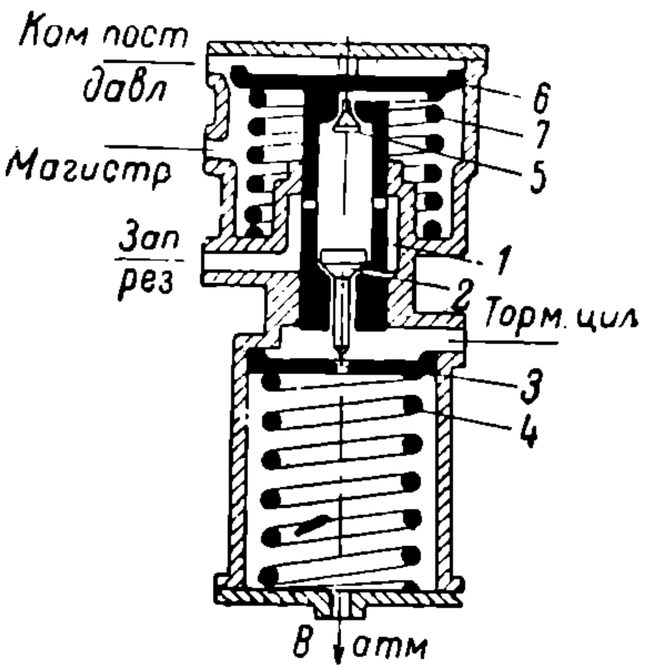


Рис. 250. Распределитель тормоза Матросова в первом варианте.

Из рассмотрения процесса следует, что рабочее давление в тормозном цилиндре определяется пружиной 4. Если вместо одной пружины взять две, разной жесткости, поместив одну из них внутри другой, то это даст возможность иметь два режима работы тормоза — для груженых и негруженых вагонов. При груженых

НБ УКУНТ (ДІІТ)

вагонах могут работать обе пружины. При негруженых же более жесткую пружину можно выключить путем надлежащего предварительного сжатия ее с помощью соответствующей защелки. Неистощимость тормоза Матросова достигается тем, что запасный цилиндр соединен с магистралью специальным обратнозапорным клапаном 5. Если в запасном цилиндре давление упадет ниже магистрального, то клапан откроет проход воздуха из магистрали в запасный резервуар. Следует иметь в виду, что истощимость тормоза практически является недостатком при длительном процессе торможения, которое нормально в среднем производится при наличии достаточно значительного давления в магистрали. Ввиду этого связь запасного цилиндра с магистралью через обратнозапорный клапан достаточно обеспечивает неистощимость тормоза.

В дальнейших вариантах Матросов еще значительно усовершенствовал свой тормоз. В конструктивном отношении клапанный стержень 2 был заменен комбинацией двух взаимно перемещающихся плоских золотников, связанных с поршнями 6 и 3. Была устранена пружина 7. Камера постоянного давления с питающим ее резервуаром была переведена на постоянную связь с магистралью. В связи с этим передвижение поршня 6 стало происходить только под действием разности между падениями давления. В камере, соединенной с буферным резервуаром, давление падает значительно медленнее, чем в магистрали. По этой причине при ослаблении давления в магистрали поршень 6, как и в случае постоянного давления, находится под действием усилий, заставляющих его в нужный момент переместиться. Это усовершенствование дало возможность избавиться от необходимости иметь приспособления для получения постоянного давления. Во всех тормозах, имеющих камеру постоянного давления, последнее в процессе длительного торможения очень трудно из-за утечек держать на постоянном уровне, что влечет за собой фактическое понижение степени неистощимости тормоза. Следовательно, устранение необходимости в постоянном давлении наделило тормоз Матросова большей степенью неистощимости.

Некоторым недостатком схемы рис. 250 является необходимость при торможении выпускать воздух одновременно из магистрали и из камер, в которых находятся пружины 7. Ввиду относительно большого объема этих камер требуется много времени для получения надлежащего разрежения в магистрали, а, главное, вследствие этого происходит запаздывание разрежения вдоль магистрали, что влечет за собой и запаздывание торможения задних вагонов состава. Для устранения этого дефекта Матросову удалось в последних вариантах направлять при торможении воздух из камер 7 в тормозные цилиндры. Для этого камеру 7 от магистрали пришлось отделить третьим по счету поршнем. При разрежении в магистрали этот поршень разобщает магистраль от камеры 7 и одновременно с помощью добавочных золотников направляет воздух из последней в тормозной цилиндр.

В результате конструктивных усовершенствований тормоз Матросова стал обладать следующими главнейшими свойствами. Он допускает плавное ступенчатое торможение и оттормаживание поезда. Он дает возможность иметь высокую неистощимость и обеспечивает почти одновременное повышение давления во всех цилиндрах независимо от хода поршней и размеров тормозных цилиндров. Это делает тормоз Матросова обезвреживающим неодинаковую степень сработки колодок, а также дает возможность приспосабливать его для любых типов тормозных цилиндров. Кроме того, как было уже указано, тормоз этот обеспечивает быстрое разрежение магистрали вдоль всего поезда даже при очень большой его длине. Благодаря последним двум свойствам торможение даже в длинных составах производится при практически одновременном затормаживании всех отдельных вагонов. Наконец, тормоз Матросова может одинаково хорошо работать как при груженых вагонах, так и при порожних (Л. 127).

В некоторых странах, например в Австрии, вместо тормозов, основанных на применении сжатого воздуха, применяют тормоза, работающие на принципе разрежения. Из таких тормозов наибольшим распространением теперь пользуется тормоз Hardy-Clayton. Основан он на поддержании в период оттормаживания разрежения во всех основных частях тормоза. Для торможения же атмосферный воздух впускается в тормозной цилиндр по одну сторону поршня и, так как с противоположной стороны находится разреженное пространство, передвигает поршень, а с ним и тормозную рычажную передачу. Те стороны тормозных цилиндров, которые при торможении сообщаются с атмосферой, соединены у Hardy-Clayton непосредственно

НТБ УрГУПС (ДИИТ)

с главным воздухопроводом. Ввиду этого данный тормоз является автоматическим, так как при разрыве поезда воздух, естественно, проникает в тормозные цилиндры и производит торможение всего состава (Л. 220).

В тех случаях, когда при торможении длинных составов требуется особая быстрота передачи тормозного эффекта от головы поезда к его хвосту, иногда применяют тормоза электропневматического типа. В основе эти системы построены на общем принципе автоматических тормозов сжатого воздуха. Характерным добавлением в них является наличие особых электромагнитных клапанов, которые при торможении, помимо тройных клапанов, сообщают запасные резервуары с тормозными. В некоторых случаях эти клапаны служат только для ускорения общего разрежения в главном воздухопроводе. Для этих целей они размещаются вдоль всего воздухопровода и при торможении одновременно в нескольких пунктах сообщают его с атмосферой. При электропневматических тормозах необходимо, помимо воздушного воздухопровода, иметь и электрическую магистраль для управления клапанами. Применяются электропневматические системы, главным образом, на метрополитенах, где условия торможения особенно тяжелы.

4. Способы передачи и производства тормозных усилий.

Для получения необходимых тормозных усилий приходится между поршнем тормозного цилиндра и колодками помещать рычажную передачу. С ее помощью можно увеличивать усилия, развиваемые тормозным поршнем, до требуемых величин. Примером рычажной передачи у трамвайного вагона может служить схема, приведенная на рис. 251. Теоретическое давление на колодки здесь получается равным около 7150 kg.

Образец тормозной рычажной передачи у электровоза приведен на рис. 252. Схема дана применительно к электровозу государственных швейцарских железных дорог. Помимо главных осей, в данном случае тормозятся и оси бегунковой тележки. Все основные размеры, а также и напряжения в отдельных стержнях передачи видны из рисунка. При расчете тормозов приходится ограничивать себя в отношении наибольших давлений на колодки. Ограничения эти вызываются как условиями механической прочности, так и условиями самого процесса торможения. Наибольшие допустимые тормозные усилия должны быть ниже того предела, при котором колеса начинают скользить. Характерной величиной, определяющей степень напряженности тормозной системы, является отношение суммы всех давлений на колодки подвижного состава к общему его весу. Для рассматриваемого электровоза это отношение, называемое тормозным коэфициентом, получается равным приблизительно 73%. Если же отнести его только к ведущим осям, то он получается около 90%. Чаще всего данный коэфициент для моторных вагонов и электровозов держится в пределах от 60 до 92%.

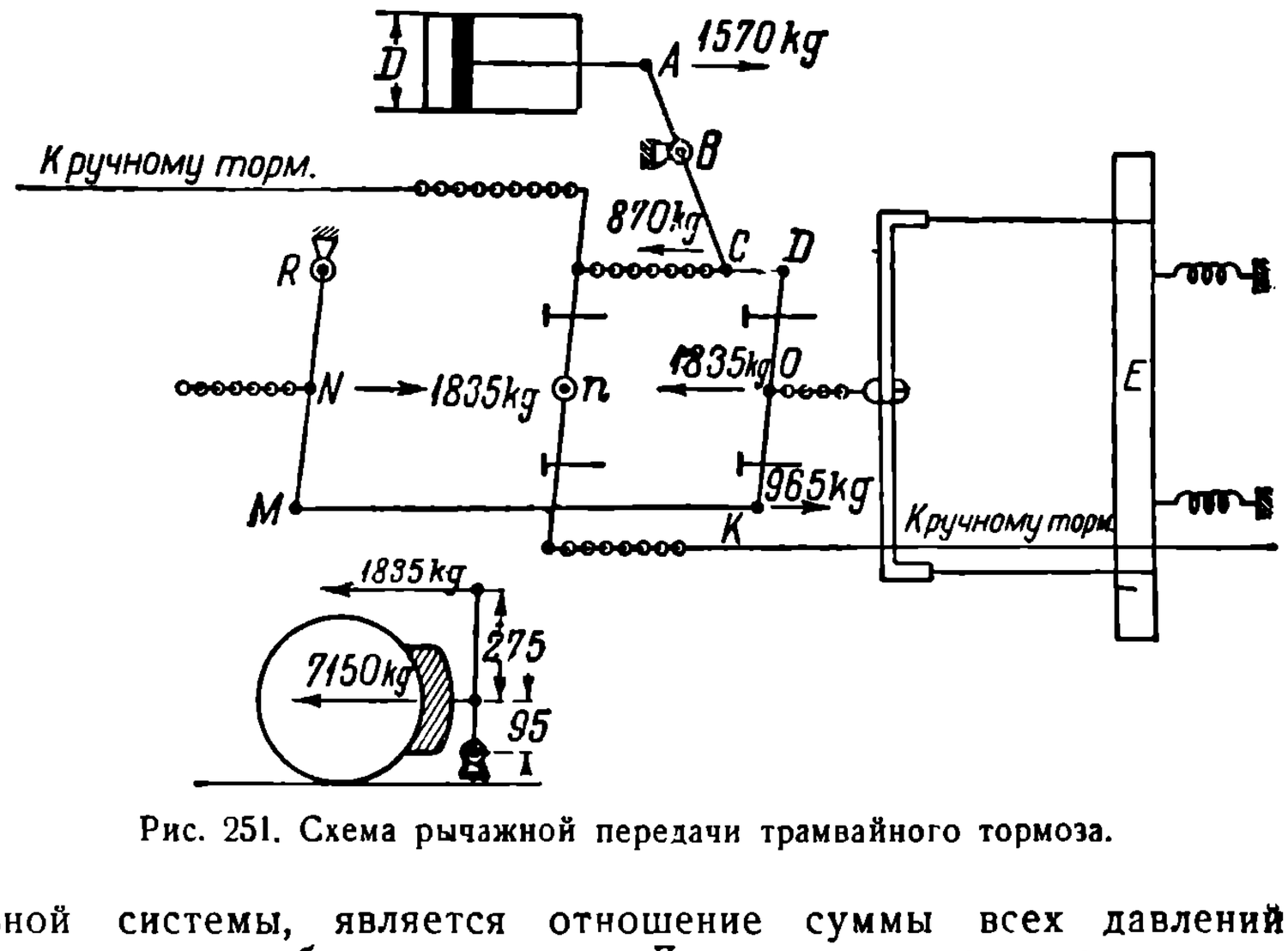


Рис. 251. Схема рычажной передачи трамвайного тормоза.

Приведенные на схеме цифры напряжений даны применительно к воздушному тормозу выполненному в данном случае по системе Вестингауза. При ручном торможении давление на каждую колодку, когда машинист нажимает на тормозную ручку с силой 35 kg, получается равным вместо 4400 kg всего только 2925 kg. Как

НБ УКУНТ (ДІІТ)

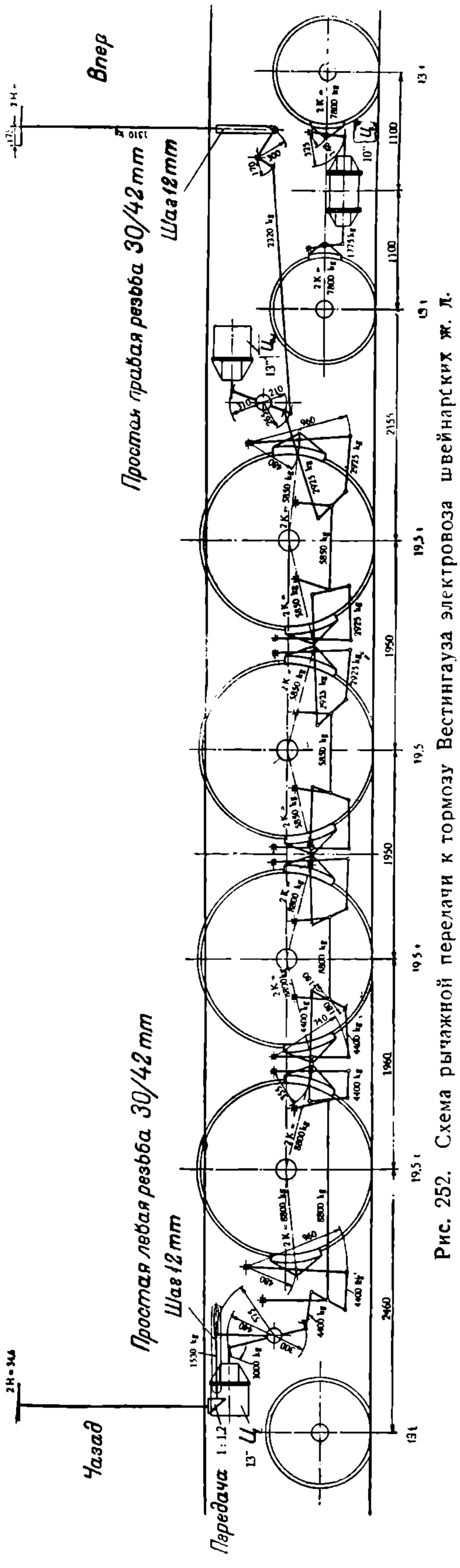


Рис. 252. Схема рычажной передачи к тормозу Вестингауза электровоза швейнарских ж. д.

видно из приведенных схем, на каждое колесо действует или одна колодка, или две. При двух колодках тормозная сила передается более равномерно, но зато система передачи несколько осложняется. Большим затруднением при регулировании колодочных тормозов является необходимость соблюдать определенные нормы для расстояния между колодками и бандажами колес. Следует отметить применение в некоторых случаях саморегулирующихся систем, не находящих пока широкого применения из-за своей сложности.

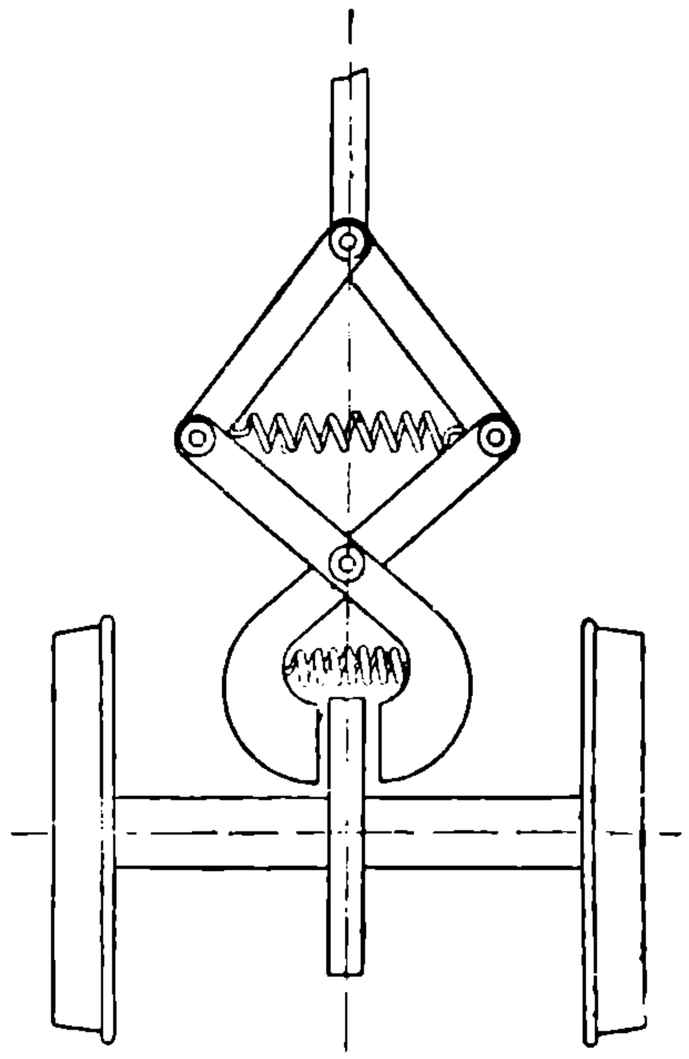


Рис. 253. Схема клещевидного тормоза.

Ввиду больших затруднений с колодками, действующими на бандажи, имеются попытки применять вместо них системы дисковых тормозов. Идея эта осуществляется путем насадки на оси специальных тормозных дисков, на которые тем или другим способом передается давление колодок. В настоящее время довольно часто в трамвайной практике начинают прибегать к так называемым клещевидным тормозам (рис. 253) Здесь давление передается колодками, прижимающимися к диску с помощью рычажной передачи, выполняемой в виде клещей. Особенно удобны эти тормоза для прицепных вагонов, оси которых свободны от двигателей. Вместо колодок иногда прибегают к ленточным тормозам. Для этой цели на оси насаживаются шкивы с тормозящими лентами. Ленточные тормоза рационально применять на валу двигателей. При наличии быстроходных двигателей, работающих с зубчатыми передачами, на их валах получаются по большей

НЕ УПУНТ (ДІТ)

части относительно небольшие вращающие моменты, благодаря чему торможение можно осуществлять путем приложения небольших усилий.

Для производства сжатого воздуха при пневматических тормозах необходимо иметь компрессоры. Существующие их типы можно разделить на компрессоры, приводящиеся в движение от оси подвижного состава, и на компрессоры с независимым электродвигателем. В первом типе, применяемом, главным образом, в трамвайной практике, поршень, производящий всасывание и нагнетание воздуха, приводится в движение от оси вагона с помощью эксцентрика или кривошипа (рис. 245). Недостаток этой системы — значительное сопротивление движению привода, доходящее до 10% от общего сопротивления самого вагона. Это обстоятельство усугубляется еще тем, что компрессор требует затраты энергии на свое движение и в те периоды, когда нет нужды в новых запасах воздуха и когда он работает вхолостую. В указанном отношении компрессоры с независимым двигателем имеют несомненное преимущество. Такие компрессоры, как общее правило, работают только тогда, когда запаса воздуха недостаточно. Включение и выключение независимого компрессора производится с помощью специального регулятора, действующего на цепь электродвигателей. Регулятор имеет пружинную диафрагму или поршень, отжимаемый пружиной. До тех пор, пока давление воздуха в главных резервуарах не превосходит нормы, цепь компрессорного двигателя, включение и выключение которого связано с работой регулятора, остается замкнутой. В момент же получения давления выше нормы, диафрагма или поршень перемещаются, и цепь двигателя размыкается. Компрессоры с независимым двигателем получают все большее и большее распространение. Даже на трамваях, особенно в Америке, они распространены весьма широко. Компрессоры, работающие от оси, выполняются в виде поршневых. Типы с независимым двигателем имеют в большинстве случаев ту же конструкцию. Примером такого компрессора может служить приведенный на рис. 254. У подобных типов двигатель либо сочленен непосредственно с осью компрессора, либо с помощью промежуточной зубчатой передачи. В последнее время наряду с поршневыми типами начинают появляться компрессоры турбинного типа, сочленяемые непосредственно с двигателями.



Рис. 251. Компрессор с непосредственным приводом от двигателя завода BBC.

По способу своего действия компрессоры выполняются в виде одноступенчатых, но в некоторых случаях применяются и двухступенчатые. Давление сжатого воздуха колеблется нормально в пределах от 3 до 8 атмосфер. Необходимая производительность компрессоров зависит от состава поезда, от профиля пути и от количества остановочных пунктов. Для небольших моторных вагонов производительность берется порядка 200 l/min, для вагонов большей вместительности около 400 l/min и для электровозов от 1300 до 4000 l min. В ответственных случаях следует иметь два независимых компрессора, чтобы по выходе из строя одного из них работу мог продолжать хотя бы один. Мощность компрессорного двигателя зависит в значительной степени от типа компрессора. В среднем при производительности компрессора 200 l/min нужно около 1,5 kW, при 400 l/min — около 3 kW и для 1200 l/min — около 9 kW. Общее количество энергии, затрачиваемое на производство тормозного воздуха, зависит от целого ряда обстоятельств. Ориентировочно можно считать, что от общего расхода энергии на движение оно составляет для загородных поездов, с достаточно большими расстояниями между остановками, около 0,9—1,5%, а для городских, особенно при осевых компрессорах, оно может доходить до 2,5—3,5%. Для средних условий по данным Martin однократное затормаживание одной тонны поезда требует около 0,25—0,35 литров воздуха (Л. 15). Нужно отметить, что в последнее время за границей начинают применяться тормозы, в которых сжатый воздух заменяется действующим под давлением маслом (Л. 19).

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

II. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ РЕОСТАТНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ ПОЕЗДА.

1. Тормозные схемы.

Электрическое торможение основано на законе обратимости электрических машин. Для торможения тяговые двигатели переводятся на работу генераторами. Получающийся при этом генераторный момент стремится задержать вращение связанных с машинами осей, чем и достигается тормозящий эффект. Тяговые двигатели, работающие генераторами, включаются на реостаты, путем регулирования которых можно получить требуемые тормозные усилия.

Наиболее часто электрическое торможение применяется в поездах, оборудованных электродвигателями постоянного тока. Простейшая схема торможения для этих условий приведена на рис. 255.

Как видно из нее, при торможении тяговые машины работают в качестве последовательных генераторов, нормально соединяемых параллельно, с целью понизить напряжение в тормозной цепи. Следует отметить, что согласно приведенной схеме при переходе от работы двигателями к работе генераторами необходимо предварительно пересоединить зажимы якорных или возбудительных обмоток, так как только при этих условиях машины, вращаясь и двигателями и генераторами в одну сторону, могут самовозбуждаться. Весьма важным обстоятельством при выборе способа соединений для тормозных схем является необходимость принятия надлежащих мер к недопусканию ненормальных режимов работы машин. С этой точки зрения схема рис. 255 непригодна. При ней всякая случайная неправильность в распределении нагрузки между отдельными машинами не устраняется никакими последующими воздействиями. Поэтому различие в нагрузках может итти в процессе работы нарастающим темпом. В предельном случае можно ожидать, что одна из машин перемагнитит другую. Такое же явление может возникнуть в процессе самовозбуждения машин. Если в этом процессе у одной машины остаточный магнетизм будет проявляться в большей степени, чем у другой, то первая машина перемагнитить вторую. То же самое может получиться и при равном остаточном магнетизме, но при некоторой, хотя бы небольшой, разнице в характеристиках машин. В результате такого явления появится недопустимо большой ток, который, минуя тормозные сопротивления, будет циркулировать по цепи обеих машин. В машине с большей начальной э. д. с. ток сохранит свое нормальное направление, в другой же он его изменит. Получатся два последовательно соединенных генератора, действующих по короткозамкнутой цепи. Естественно, что при подобных условиях схема (рис. 255) является совершенно непригодной для практических целей.

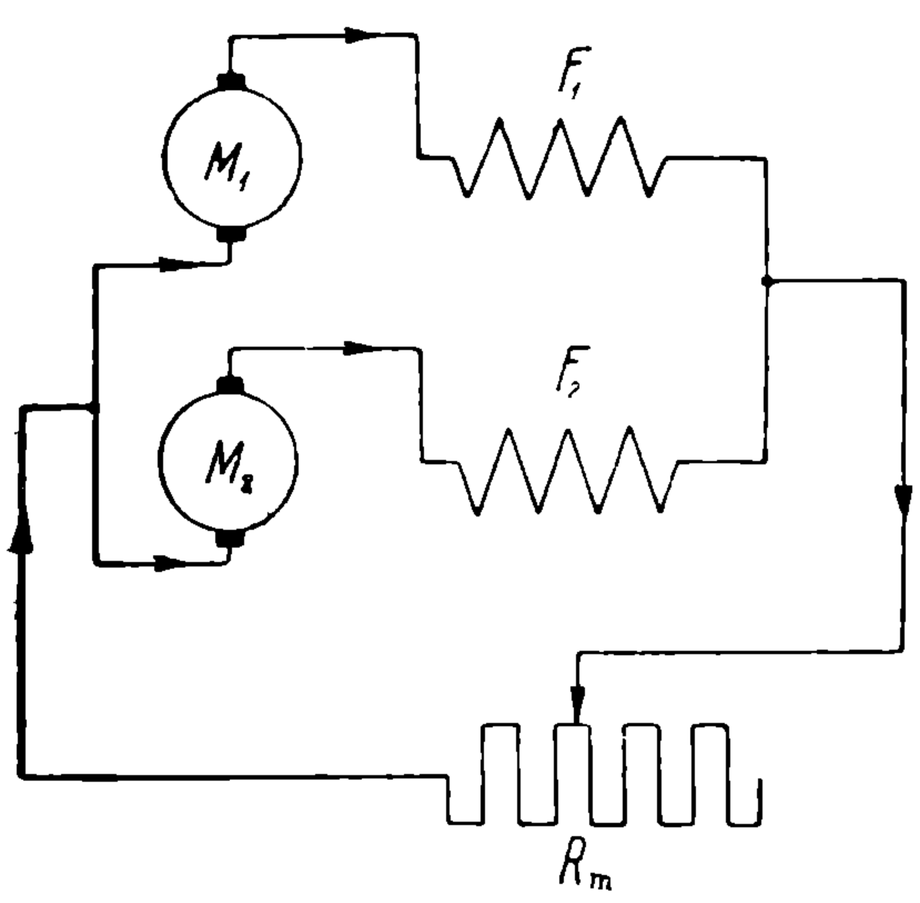


Рис. 255. Схема работы последовательных генераторов на сопротивление.

Для устранения отмеченных осложнений в схеме рис. 256, предложенной впервые Вестингаузом, введен уравнительный провод $a-a$, назначение которого — выравнивать токи в обмотках возбуждения обеих машин. В схеме рис. 257 данной AEG, тот же эффект выравнивания нагрузок достигается перекрещиванием якорных и возбудительных обмоток машин. При таком соединении, если бы одна из машин случайно перегрузилась, то это вызвало бы соответствующее увеличение тока в обмотке возбуждения машины недогруженной, а следовательно, вслед за этим и увеличение ее нагрузки. И в первой и во второй схемах режим торможения является достаточно устойчивым. Разница между ними заключается, главным образом, в степени интенсивности выравнивания нагрузок между отдельными машинами. Нужно иметь в виду, что система может быть устойчива, но вместе с тем машины могут работать при различных нагрузках. Конечно, очень желательно эти нагрузки поддерживать приблизительно постоянными. Причиной, вызывающей не-

НВ УДУНТ (ДІІТ)

равномерность нагрузок, является в большинстве случаях расхождение между характеристиками отдельных двигателей. Оно может получиться при самом изготовлении двигателей на заводе, а также вследствие разницы и диаметров бандажей отдельных полускатов. Различие между характеристиками опасно в том отношении, что в одной из машин может получиться значительно меньшая или бóльшая э. д. с., чем в другой. Особенно это опасно при наличии уравнительного провода. Как это нетрудно видеть из схемы Вестингауза (рис. 256), при понижении э. д. с. в одной из машин нагрузка ее падает, и даже может случиться, что при значительном уменьшении э. д с. такая машина начнет работать двигателем. В этом отношении схема рис. 257 имеет преимущество, гарантируя машины от такой большой несимметрии. Инж. Зильберталь в своей работе пришел к выводу, что при расхождении между характеристиками порядка 3% по схеме с уравнительным проводом может случиться, что одна машина будет работать двигателем, другая — генератором. При схеме же AEG это же расхождение нормально вызовет перераспределение нагрузок между машинами не выше 10—11%.

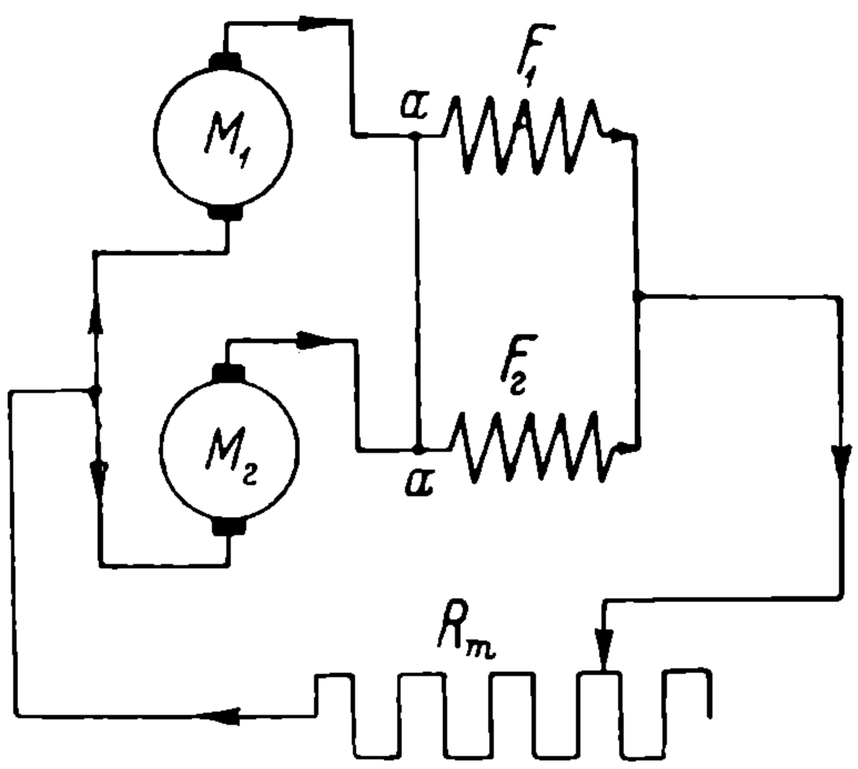


Рис 256. Схема электрического торможения с уравнительным проводом.

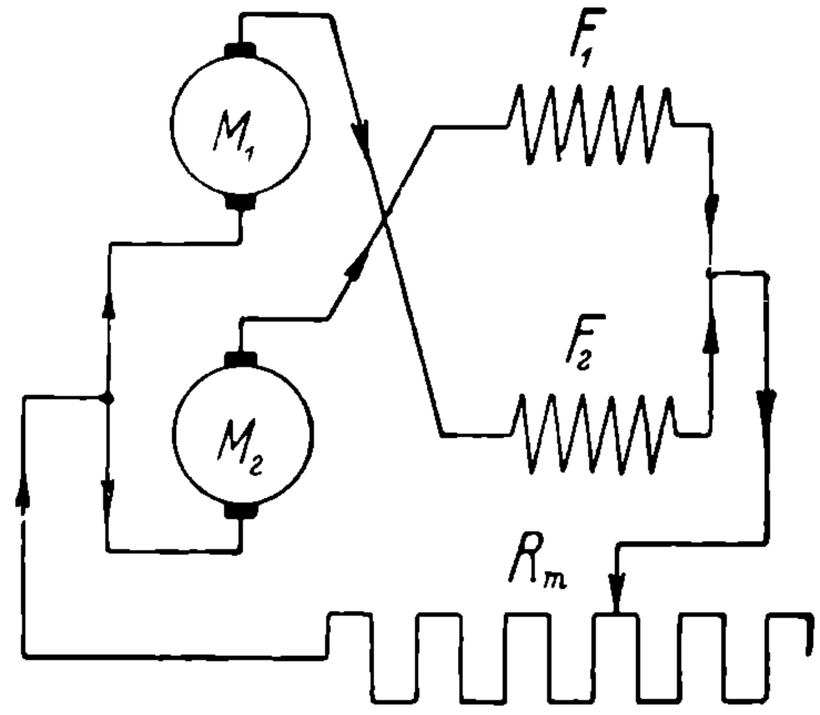


Рис. 257. Схема электрического торможения перекрестного типа.

Помимо этого, схема с уравнительным проводом может иногда представить опасность еще и в другом отношении. Если у двигателей окажутся несколько сдвинутыми с нейтрали щетки, то машины за счет продольных потоков реакции якоря, несмотря на относительно незначительный эффект продольного намагничения, могут возбуждаться по цепи последовательно соединенных якорных обмоток, так как последние нормально обладают очень небольшим сопротивлением, причем одна из машин окажется перемагниченной. Машины начнут работать в качестве последовательных генераторов на короткозамкнутую цепь, причем ток по обмоткам возбуждения и по сопротивлениям практически не пойдет. Указанное явление может получиться в том случае, если э. д. с. от остаточного магнетизма не в силах возбудить машины нормально через сопротивления тормозной цепи по причине слишком большой их величины для данного остаточного магнетизма. Для того, чтобы могло получиться самовозбуждение через последовательно соединенные якоря, щетки должны быть сдвинуты с нейтрали против вращения, причем это явление может иметь место при сдвиге их хотя бы у одной из машин. При сдвиге щеток против вращения, как нетрудно убедиться из элементарной схемы э. д. с. якорных обмоток, если имеются добавочные полюса, то действие их будет поддерживать эффект продольного потока реакции якоря.

Слабой стороной в системе Вестингауза являются места контактов в уравнительном проводе. Контакты эти осуществляются пальцами контроллеров, и при нарушении правильной их регулировки переходные сопротивления могут значительно возрасти. Ввиду того, что сопротивление обмоток возбуждения у двигателей относительно невелико, изменение переходных сопротивлений в уравнительном проводе может вызвать неправильное распределение токов в этих обмотках, а следовательно, и неравномерность загрузки отдельных машин. В схеме AEG различие в сопротивлениях контактов существенного значения не имеет. Значительным недостатком

РБ УИУНТ (ДІІТ)

системы AEG является полное прекращение действия тормозной схемы, если в ней хотя бы в одном месте появится разрыв. Точно так же действие тормоза практически прекращается, если одна из машин выйдет из работы благодаря механическим повреждениям, например поломке зубчатых колес или вала. В системе с уравнительным проводом при выходе из строя одного из двигателей, торможение можно все-таки осуществлять, хотя и с большими перегрузками в отдельных частях тормозной цепи, на оставшемся в исправности двигателе. Большие осложнения в работе схемы AEG получаются также, если один полускат начинает скользить, а второй работает нормально (Л. 128). При этом тормозной эффект понижается не только на скользящем полускате, но и находящемся вне скольжения.

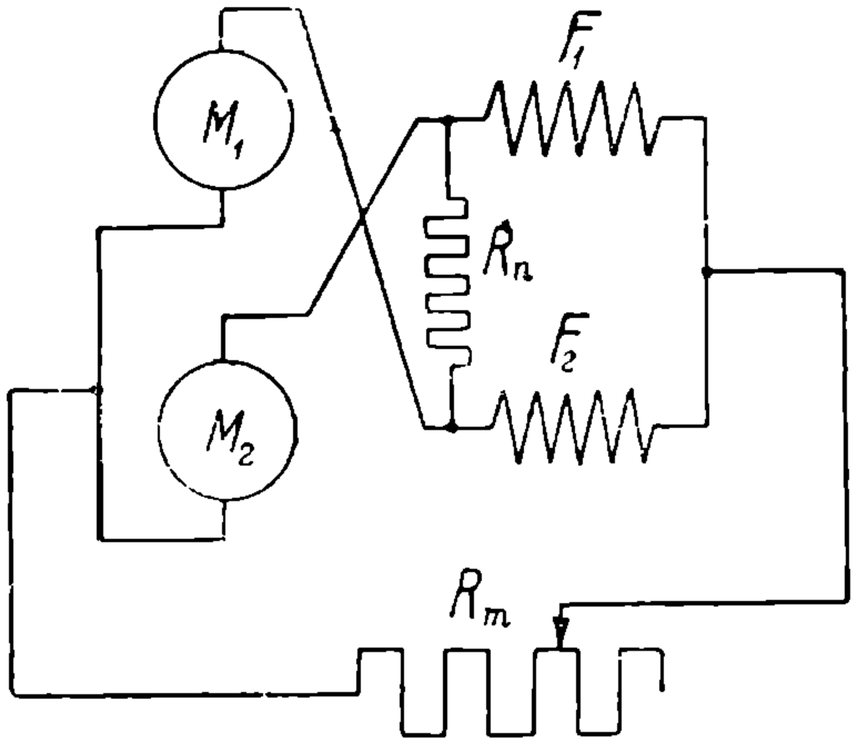


Рис. 258. Комбинированная схема электрического торможения поезда.

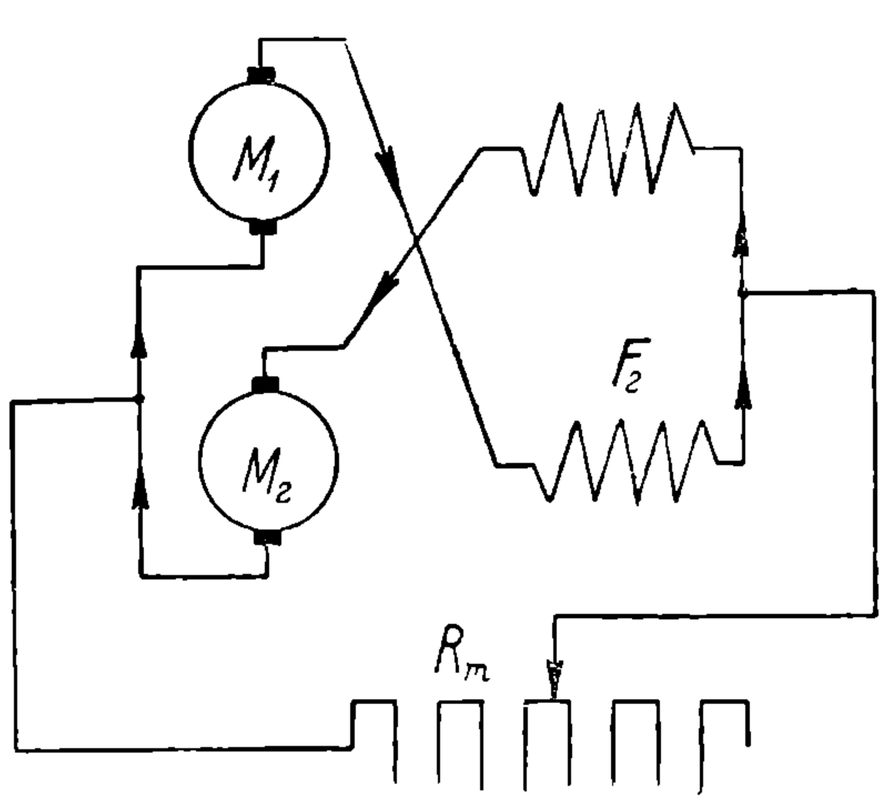


Рис. 259. Распределение токов в тормозной перекрестной схеме для случая отката вагона назад.

Кроме этого, в системе Вестингауза процесс самовозбуждения протекает более быстрым и устойчивым темпом, чем у AEG. При неодинаковом остаточном магнетизме в обеих машинах, у Вестингауза ток в обмотках возбуждения будет итти непрерывно в одном и том же направлении. По схеме AEG в самые начальные моменты самовозбуждения, пока не уравняются остаточные магнетизмы, токи могут итти в различных направлениях. Для сочетания преимуществ обеих тормозных схем в последнее время начинают применять системы, построенные на обоих принципах (рис. 258), причем в уравнительный провод иногда здесь рекомендуют включать сопротивление R_n, дабы хотя бы несколько ослабить опасные токи при авариях с одним из двигателей.

Следует остановиться еще на одной особенности схемы AEG. Нормальное направление тормозных токов показано на рис. 257. Если допустить, что направление вращения машин изменится на обратное, то получится представленное на рис. 259 направление токов. Нетрудно сообразить, что машины могут возбудиться указанным образом только при неравенстве у них остаточных магнетизмов. При таких условиях одна машина перемагничивает другую, в результате чего и получается схема рис. 259. При одинаковом остаточном магнетизме машины теоретически не возбудятся. Однако, опасаться этого не приходится, так как практически остаточные магнетизмы никогда не равны. В рассматриваемом случае тормозной эффект имеет место при последовательном соединении машин накоротко. Иногда рассмотренным свойством пользуются как мерой против отката вагонов. Если иметь двигатели включенными по схеме рис. 259, то при возвратном движении вагона, например, под уклон, будет получаться сильный тормозящий момент. Практически прибегать к данному средству нужно, однако, с осторожностью, так как при коротком замыкании машин могут возникнуть опасные токи.

При электрическом торможении машинам приходиться работать в тяжелых условиях. В тормозной цепи получаются высокие напряжения и большие перегрузочные токи. Особенно тяжелы условия работы при экстренном торможении. Представление о процессе электрического торможения по сравнению с воздушным и

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ручным дает табл. 40, полученная автором при одном из испытаний вагонов ленинградского трамвая (Л. 129).

ТАБЛИЦА 40.

Данные экспериментального исследования электрического торможения.

Состояние погоды и рельсов	Система торможения	Начальная скорость торможения в km h	Время торможения в sec	Путь торможения в m	Среднее замедление в m.sec²	Макс. торм ток на 1 двигатель	Макс. торм напр. на заж. двигателя
Мороз Рельсы сух.	Электрич. мот. и приц. ваг.	26,8	5,5	20,4	1,35	138	750
	» » »	24,4	5,5	18,5	1,26	138	785
	Ручной	23,6	6,8	28,0	0,97	—	—
		26,9	7,9	32,5	0,93	—	—
	Воздушн . .	28,6	7,0	27,8	1,13	—	—
	Электрич. один мот. ваг. . .	32,5	6,8	28,4	1,32	138	1250
	» » .	25,9	5,1	18,4	1,4	116	850
	» » .	33,8	5,5	25,8	1,71	136	1050
	» » »	24,8	5,1	18,2	1,28	144	1100
	» » »	33,0	6,0	27,6	1,53	143	1300
	Воздушн. один мот. ваг.	35,5	10 0	46,2	0,92	—	—
	Электрич. один мот. ваг .	14,3	4,0	8,0	1,0	100	450
	Электрич. мот. и приц. ваг.	27,5	8,0	29,8	0,96	138	950
	» » » » .	23,8	7,0	23,2	1,0	130	—

Приведенные данные относятся к вагону с двумя двигателями Сименса-Шуккерта, работающими при тяге с шунтировкой поля, а при торможении без таковой. Как видно из таблицы, напряжения и токи при данных условиях могут больше, чем

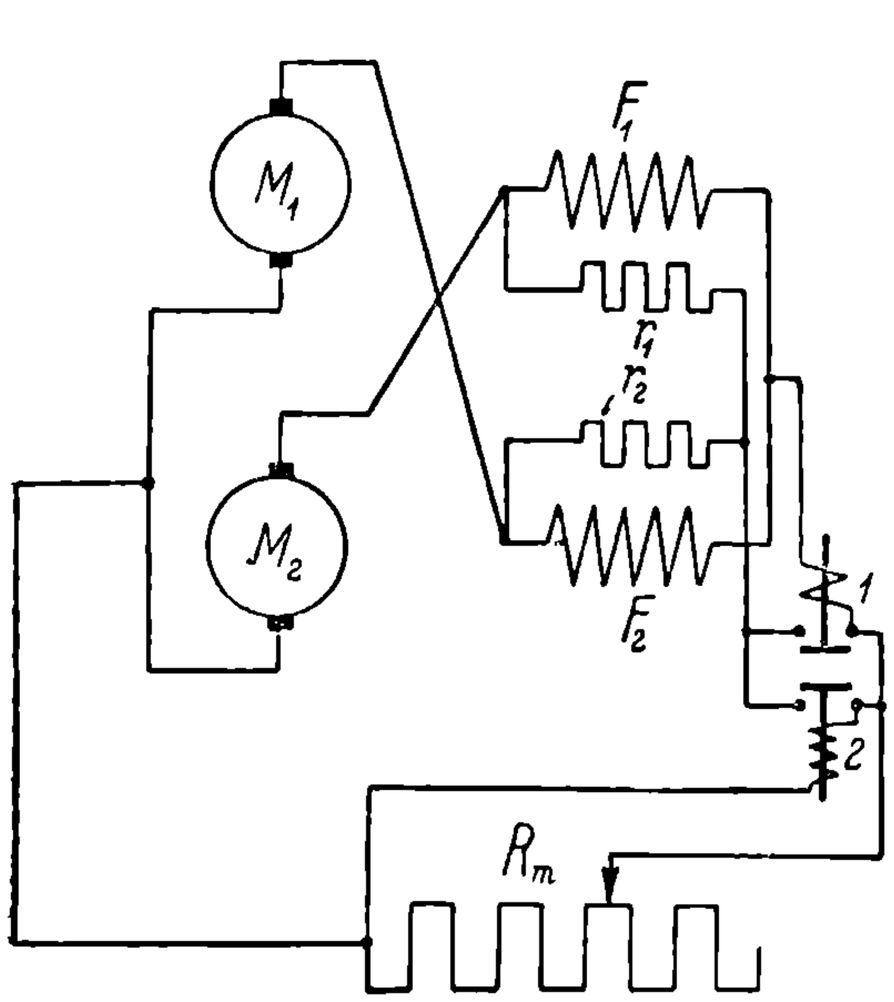


Рис. 260. Схема защиты тормозной электрической цепи от чрезмерных токов и перенапряжения.

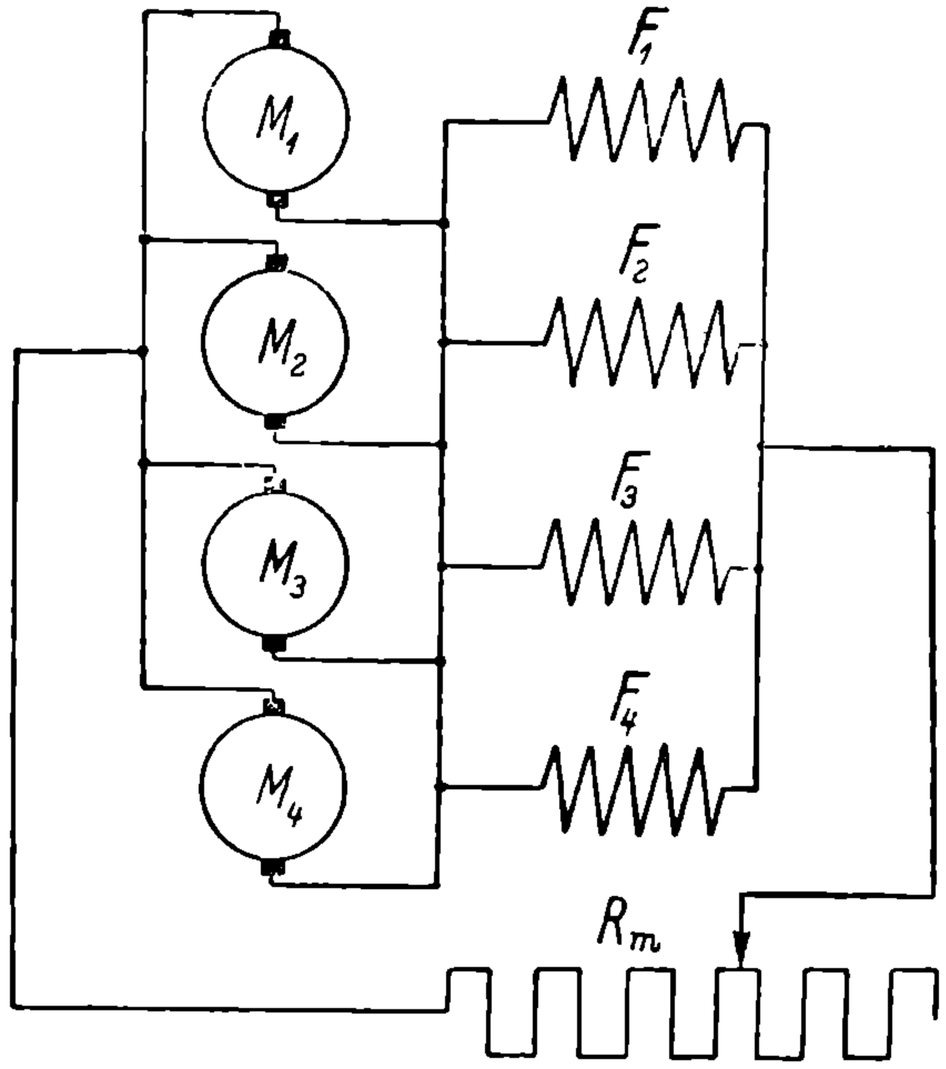


Рис. 261. Схема электрического торможения поезда с уравнительным проводом для четырех двигателей.

в два раза превосходить нормальные. При нешунтированной схеме напряжения достигают меньших величин, например, у двигателей Вестингауза превышение достигает только 40% Для ограничения тормозных напряжений и токов иногда рекомендуется применять особые схемы (рис. 260). Как видно из рис. 260, при превышении нормы тормозного тока или напряжения через реле 1 или 2 включаются сопротивления, которые шунтируют обмотки возбуждения, чем и достигается понижение токов и напряжений.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

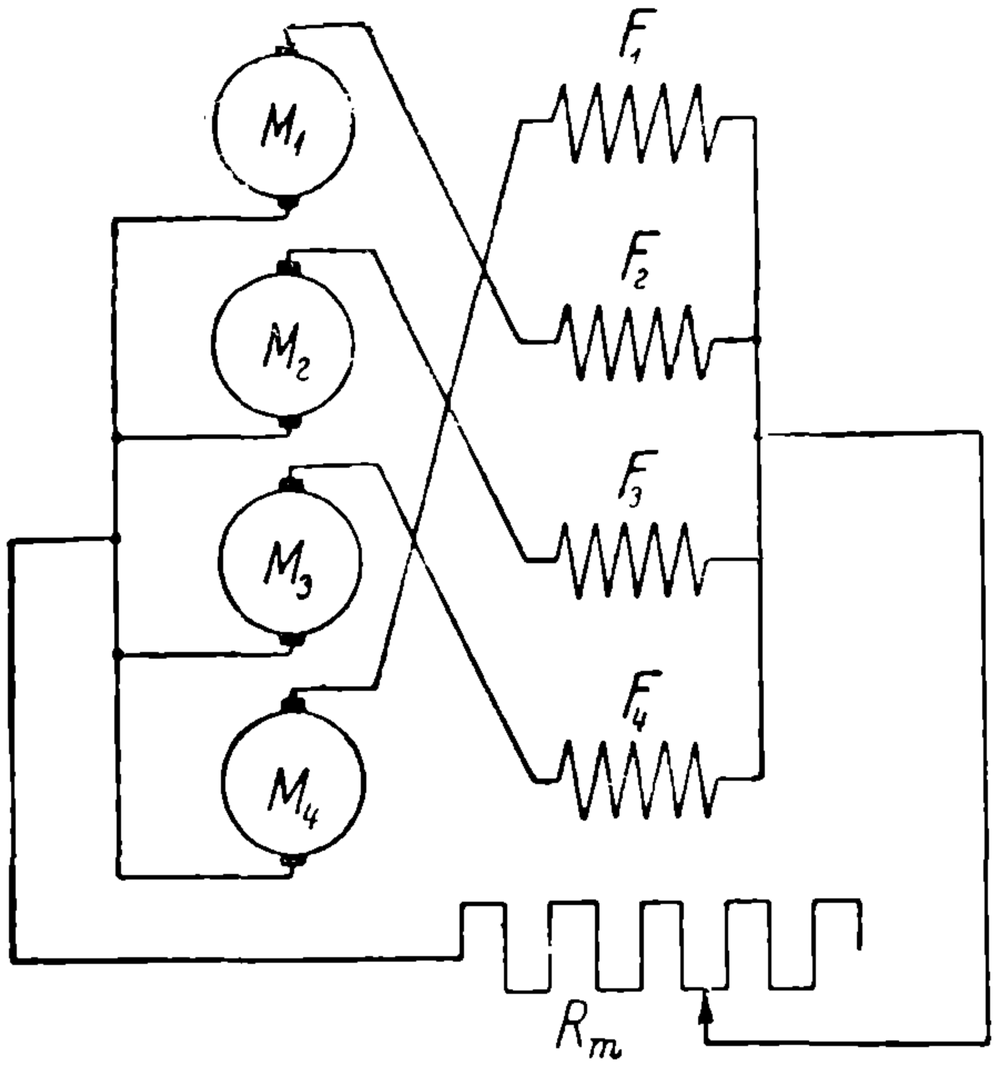


Рис. 262. Циклическая схема электрического торможения поезда при четырех двигателях.

При четырех двигателях схему их включения при торможении поезда можно строить на тех же основных принципах, что и при двух двигателях. Можно применять как схему с уравнительным проводом, так и схему перекрестную, называемую при четырех и больше двигателях циклической (рис. 261 и 262). Недостатком схемы с уравнительным проводом является уже указанная опасность неправильного распределения нагрузки между отдельными машинами, особенно вероятного при четырех цепях. Схема циклическая в этом отношении имеет преимущество. Однако, как доказывает инж. Зильберталь, она устойчива только при четырех двигателях да и то, если характеристики отдельных машин не особенно сильно между собой разнятся.

В случае работы нескольких групп машин при торможении наибольшей надежности в отношении устойчивости можно достигнуть, разбив машины на группы по две и в каждой группе устроив перекрестное соединение с работой на отдельные сопротивления. Недостатки этой схемы — относительная сложность и необходимость иметь при ней в два раза

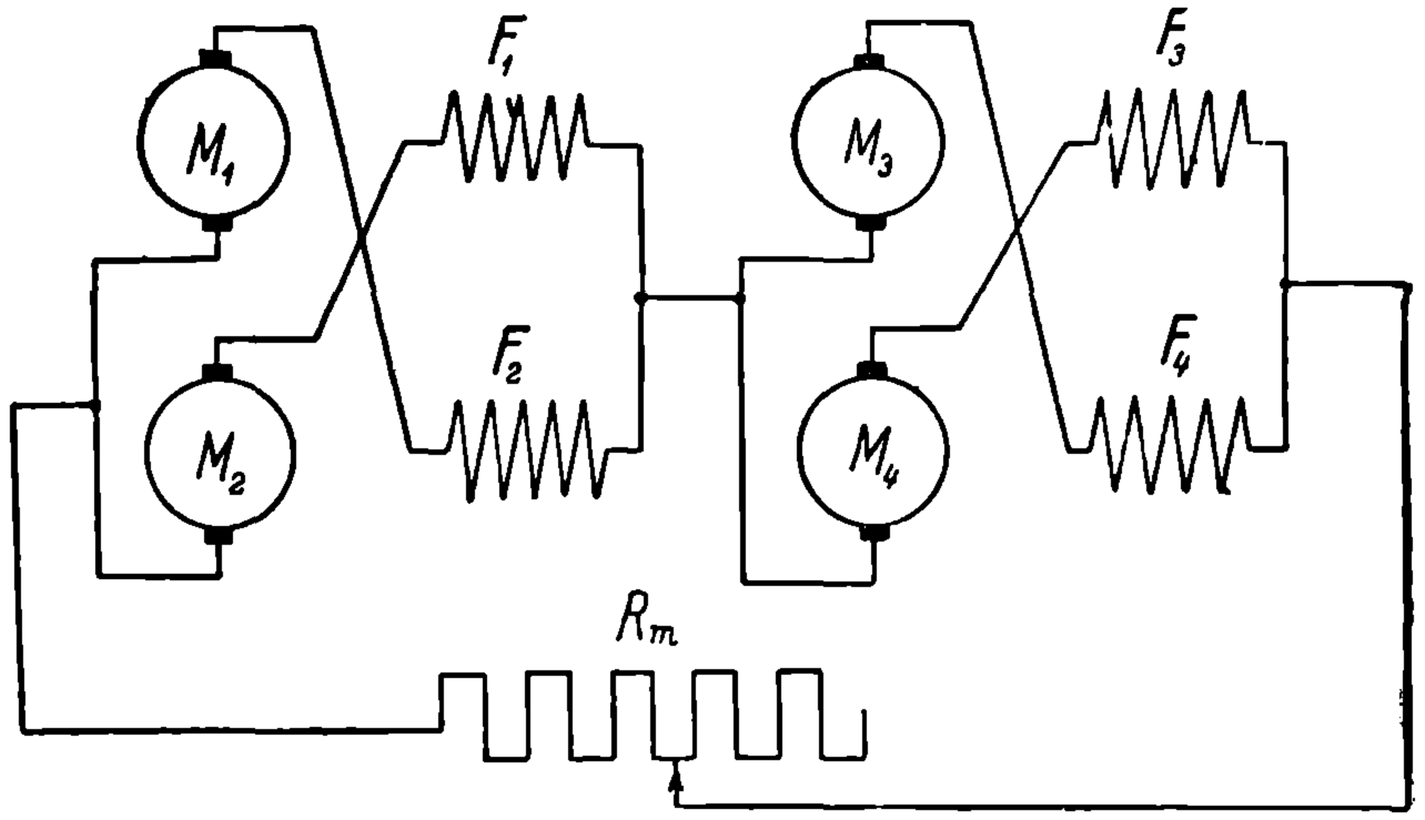


Рис. 263. Перекрестно-последовательная схема электрического торможения.

больше отдельных реостатов. Еще большую устойчивость можно получить, если каждую машину заставлять работать независимо на свой собственный реостат, но практически применению такой схемы препятствуют ее сложность и сложность оборудования. Несколько легче осуществить схему соединений, если применить последовательное соединение отдельных групп двигателей.

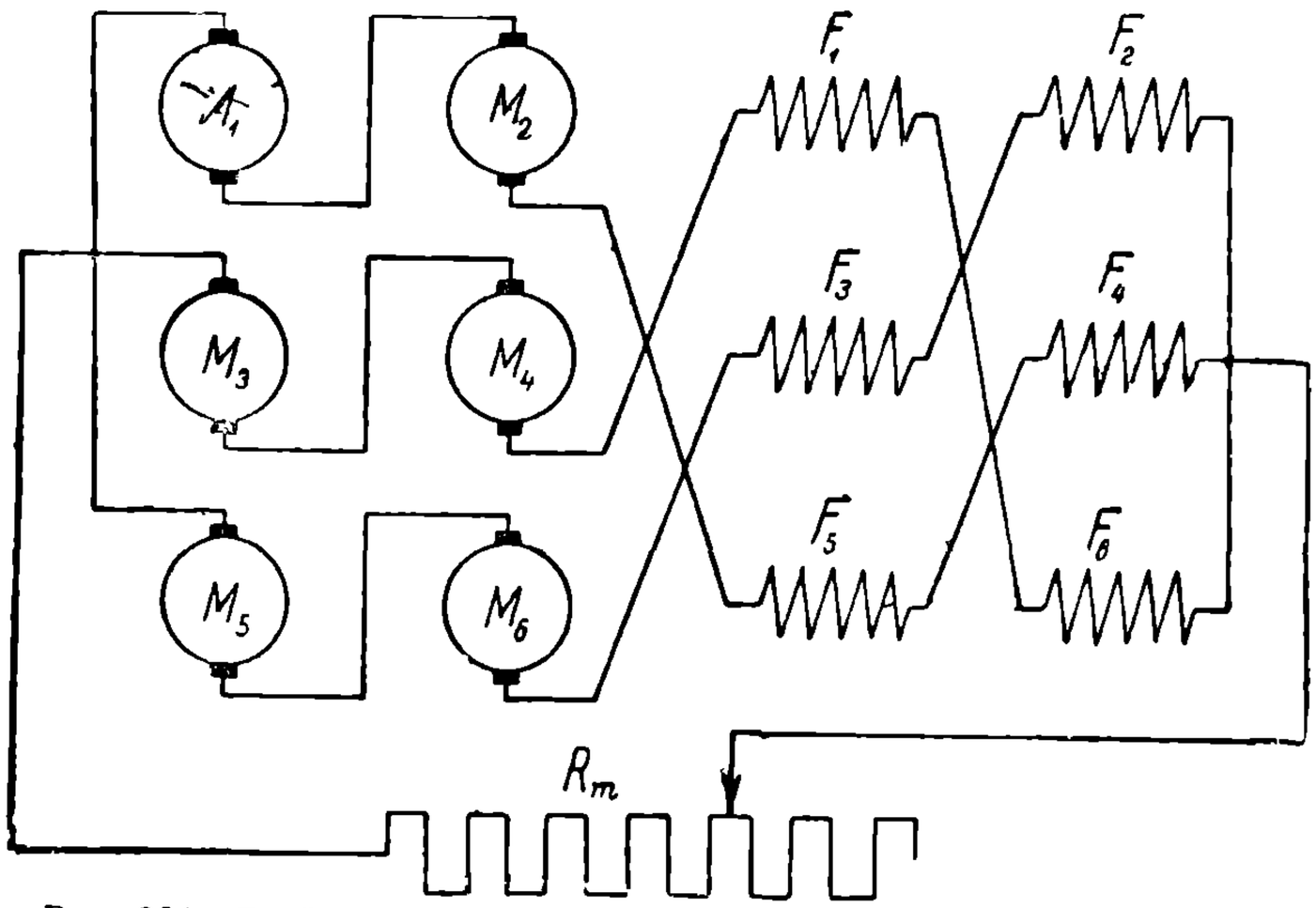


Рис. 264. Двойная циклическая схема электрического торможения при шести двигателях.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

На рис. 263 такая схема дана для четырех машин. Недостаток ее — опасность возникновения значительных напряжений в тормозной цепи, если машины при работе двигателями работают в параллельном соединении. Для шести двигателей достаточно надежные результаты можно ожидать от схемы, представленной на рис. 264, примененной в электровозах СССР типа ВЛ.

2. Расчет тормозных реостатов.

При электрическом торможении поезда машины работают на реостаты, причем предпочтительно пользоваться для этой цели теми же реостатами, которые служат для пуска, вариируя отдельные их ступени. Расчет тормозных реостатов можно в основном вести, руководствуясь теми же принципами, что и при расчете пусковых. Некоторым осложнением здесь является только необходимость построить предварительно тормозные характеристики машин. Заводами обычно даются характеристики машин, как двигателей. Генераторные же характеристики не прилагаются. Для расчета тормозных реостатов в первую очередь необходимо построить характеристику тормозных усилий в функции тормозного тока. Кривая эта может быть построена по силе тяги машины, как двигателя (рис. 265). Если через R_m обозначить тормозные усилия, через F силу тяги машины, как двигателя, и через P_0 в ваттах потери холостого хода при данном токе двигателя и соответствующей ему скорости, то будет иметь место соотношение

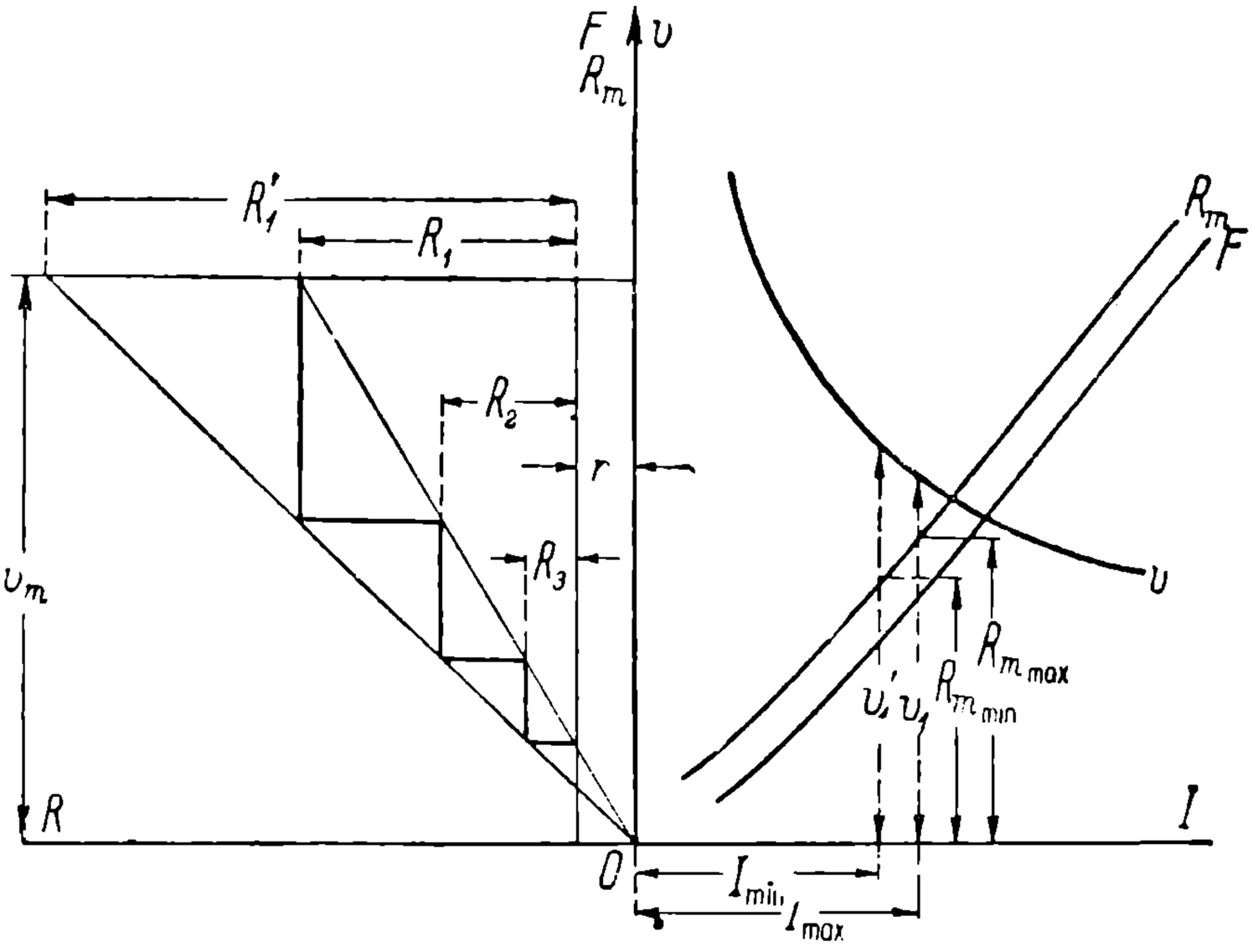


Рис. 265. Диаграмма расчета ступеней реостатов при электрическом торможении.

$$\frac{R_m v}{367} = \frac{Fv}{367} + \frac{2P_0}{1000}. \qquad (196)$$

Это равенство говорит, что тормозная мощность должна быть равна мощности двигателей, сложенной с удвоенным количеством потерь холостого хода машины. Преобразованием данного выражения можно получить:

$$R_m = F + \frac{P_0}{1{,}36v} \qquad (197)$$

Расчет тормозных реостатов начинается с установления потребной тормозной силы R_m. После этого устанавливается соответствующий тормозной силе ток, а также допустимые пределы его колебания I_{max} и I_{min}, причем R_m, взятые из рис. 265, будут предполагаться в дальнейших подсчетах зависящими только от токов.

Предельные прямые (158), между которыми должны заключаться отдельные ступени реостатов при любой тормозной скорости v_y, определяются соотношениями

$$\left.\begin{aligned}(U - I_{max}r)\frac{v_y}{v_1} &= I_{max}(r + R_x')\\ (U - I_{min}r)\frac{v_y}{v_1'} &= I_{min}(r + R_x)\end{aligned}\right\}. \qquad (198)$$

НВ УДУНТ (ДІІТ)

В левых частях приведенных уравнений стоит э. д. с. машин, работающих генераторами при скоростях v_y и токах I_{max} и I_{min}. Конечные точки предельных прямых должны оказаться в начале координат, а начальные при начальной скорости торможения v_m устанавливаются согласно выражениям:

$$\left.\begin{aligned} R_1 + r &= \frac{(U - I_{max} r)\, v_m}{I_{max} v_1} \\ R'_1 + r &= \frac{(U - I_{min} r)\, v_m}{I_{min} v_1'} \end{aligned}\right\}. \qquad (199)$$

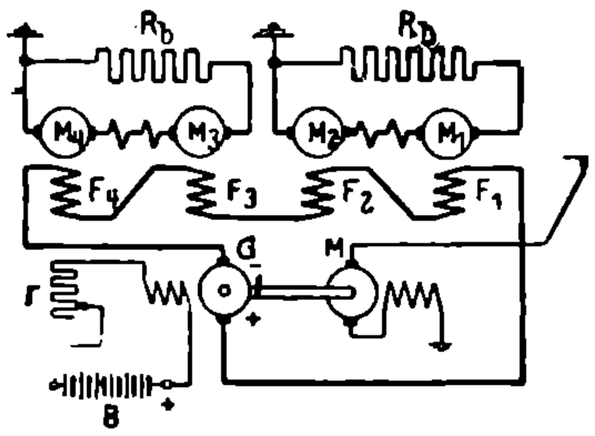


Рис. 266. Схема электрического торможения при независимом возбуждении машин.

Определение отдельных ступеней реостатов видно из рисунка 265. При двух параллельно работающих машинах полученные величины ступеней следует делить на два, при четырех — на четыре и т. д.

Все разобранные случаи электрического торможения поезда предполагали работу тяговых двигателей в качестве последовательных генераторов. Однако, имеются случаи, правда единичные, когда машины при электрическом торможении работают как шунтовые с независимым возбуждением. Примером может служить схема торможения примененная на нидерландских электровозах (рис. 266).

3. Преимущества и недостатки электрического торможения.

Одним из важных преимуществ электрического торможения по сравнению с механическим является самоосвобождение колес от скольжения. От чрезмерной тормозной силы колеса могут застопориться и при электрическом тормозе, но, как только это произойдет, тормозная сила исчезнет, и колеса снова получат возможность вращаться. В процессе нарастания их угловой скорости тормозное усилие машин снова может возрасти сверх нормы, и колеса опять могут застопориться. Это может продолжаться до тех пор, пока. не будет достигнута такая скорость поезда, при которой тормозное усилие сделается меньше силы сцепления. Такой процесс скольжения колес получается при теоретическом предположении, что колеса при переходе тормозной силы за предел сцепления мгновенно прекращают свое вращательное движение. Однако, есть основание полагать, что в действительности при нарушении сцепления, благодаря деформации материала рельсов и бандажей, колеса, хотя и очень быстро, но все-таки до известной степени постепенно начинают замедлять скорость своего вращения. В связи с этим замедлением начинает падать и тормозная сила, развиваемая за счет вращения колес тяговыми машинами. В таком процессе понижения скорости вращения и тормозной силы может наступить момент равенства последней и силы сцепления. Как только это наступит, причина, порождающая замедление скорости вращения колеса, исчезает. Если скорость спустится ниже данного предела, колеса начинают увеличивать скорость вращения. Но как только он будет снова превзойден, скорость начинает падать. В результате колеса, не застопориваясь до окончательного прекращения вращения, будут скользить и одновременно поворачиваться вокруг своей оси со скоростью, в среднем равной указанной критической скорости. Такой процесс будет иметь место до момента, пока скорость поступательного движения поезда не сделается равной критической скорости скольжения. После этого скольжение прекращается, и дальнейшее торможение идет при нормальном вращении колес. При механических тормозах машинист для прекращения скольжения должен сам отпустить колодки, при электрическом торможении скольжение прекращается само собой. Опыты, произведенные автором на ленинградском трамвае, показали, что несмотря на скольжение колес, электрическое торможение идет энергично, не обнаруживая такого уменьшения интенсивности, какое имеет место при скольжении колес в случае механических тормозов (Л. 129).

Значительным преимуществом электрического торможения является более дешевая эксплоатация. Пневматические тормоза, особенно в холодное время года, требуют очень тщательного ухода за собою, и неисправность их часто является причиной крупнейших аварий. Упразднение колодок имеет для эксплоатации весьма большое значение. Помимо значительной стоимости их содержания, они

НТБ УИИНТ (ДІІТ)

являются источником увеличения потребления энергии на движение. Как указывает Volkers, колодки очень часто задевают за бандажи, что значительно увеличивает сопротивления движению (Л. 137).

В отношении интенсивности торможения электрический тормоз также превосходит воздушный, причем это, главным образом, относится к высоким скоростям, при которых как было отмечено, коэфициент трения колодок о бандажи сильно понижается. При низких скоростях воздушный тормоз превосходит электрический. На рис. 267 приведены опытные кривые экстренного торможения, полученные автором в Ленинграде, и для сравнения кривые, принятые в качестве образцовых на Мюнхенском интернациональном трамвайном конгрессе. Кривая I относится к воздушному тормозу, II — к электрическому и III—также к электрическому, но по данным конгресса.

Недостатком электрического тормоза следует считать прекращение его действия при скоростях ниже тех, при которых возникает самовозбуждение машин. На горизонтальных участках, или близких к ним по уклону, это практического значения не имеет, и поезд останавливается без всяких добавочных тормозов, но на скатах, превосходящих по силе уклона сопротивление движения самого поезда, остановить его можно только добавочными тормозами, например ручными. Правда, поезд будет итти очень медленно, но все-таки остановиться сам по себе не сможет. Кроме того, при применении рабочего электрического торможения, естественно, утяжеляется работа тяговых машин Нагревание их растет, и потому приходится увеличивать их мощность. Порядок увеличения мощности может достигать 15—25%. Не следует также упускать из виду, что при интенсивных электрических торможениях машинам приходится выдерживать высокие перенапряжения и токи, а также и большие механические воздействия на зубчатые колеса и валы.

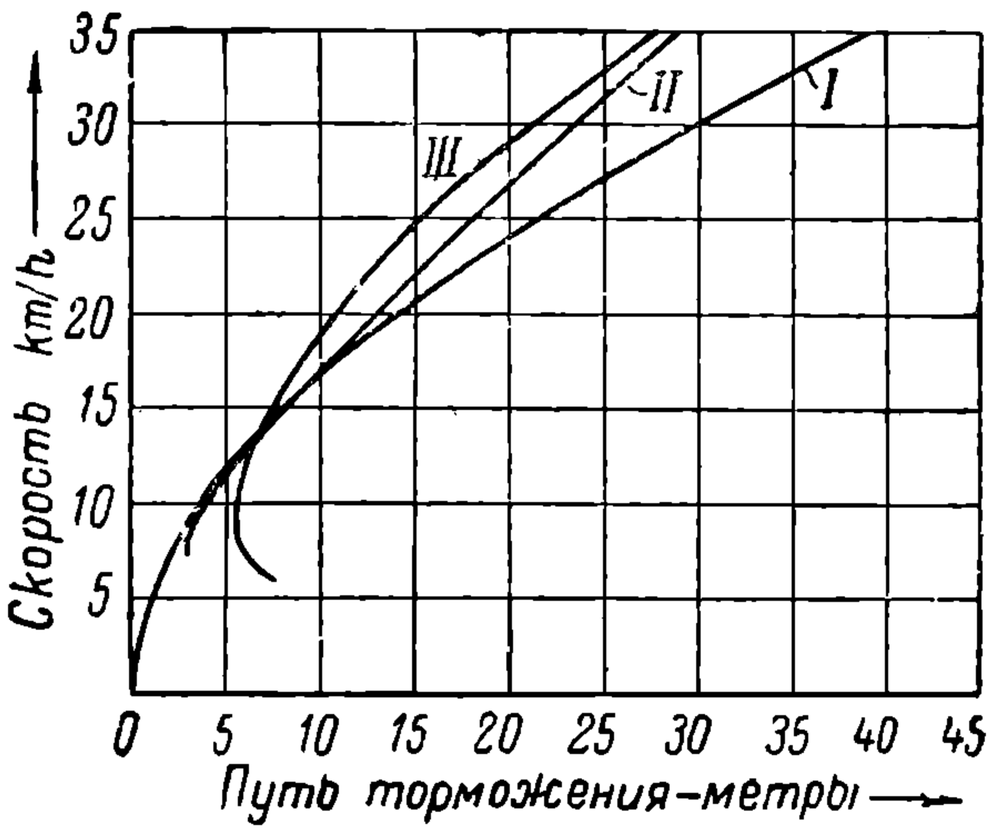


Рис. 267. Кривые торможения поезда в условиях трамвайного движения.

До сих пор при рассмотрении электрического торможения имелся в виду подвижной состав, оборудованный двигателями постоянного тока. Такое же торможение может быть осуществлено, хотя на практике применяется редко, при однофазных коллекторных машинах. Последовательные однофазные двигатели можно заставить работать в качестве последовательных генераторов постоянного тока. Можно так же, как это сделано на электровозах Rätische Bahn, обращать их в генераторы постоянного тока с независимым возбуждением. При асинхронных двигателях элек, трическое торможение с работой на реостаты неосуществимо. Асинхронная машина в качестве генератора тока практически может работать только на сеть в токе которой имеется реактивная составляющая, необходимая для создания нужного машине намагничивающего тока. В реальных условиях это осуществимо, если к сети, помимо асинхронных машин, приключены в том или другом виде машины синхронные.

III. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ СОЛЕНОИДНЫЙ ТОРМОЗ.

Идея этого тормоза состоит в применении соленоида, внутри которого передвигается стальной поршень, через рычажную передачу приводящий в движение колодки (рис. 268). Усилия, развиваемые соленоидами, в зависимости от веса вагонов, при современных типах конструкции колеблются в пределах от 250 до 850 kg. Ход поршня чаще всего берется в пределах от 135 до 150 mm. Обмотки тормозов рассчитываются, главным образом, на кратковременный ток. Так, например, тормоза AEG при четырехминутном токе порядка 70—90 A выдерживают длительный ток около 11 A. Передаточные числа рычажных передач берутся в пределах от 1/8 до 1/15. Приведенные кривые (рис. 269) характеризуют изменение тормозной силы тяги на колодках в зависимости от величины междужелезного пространства

НБ УПУНТ (ДІІТ)

соленоида. Кривая *A* дается при токе соленоида в 90 А, кривая *B* — при токе в 70 А, кривая *C* — при токе в 50 А и *D* — при токе в 30 А. Кривая *K* характеризует точки maximum'а тяговых усилий соленоида при различных токах соленоида.

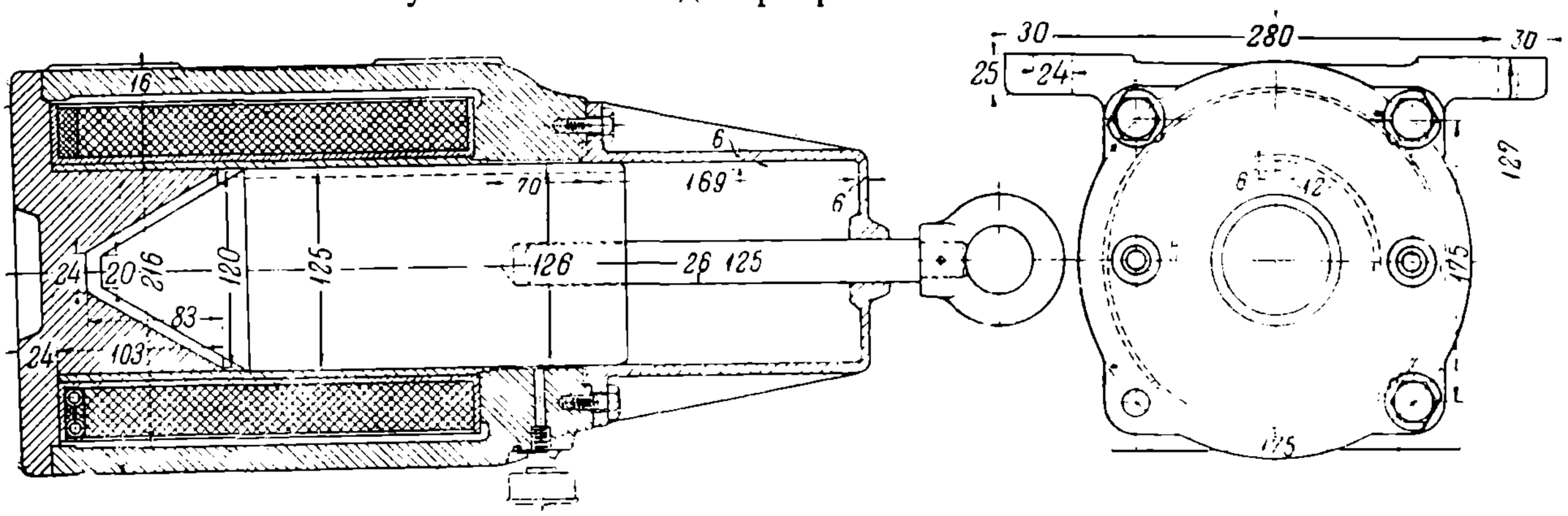


Рис. 268. Соленоидный тормоз SSW с ходом поршня 160 mm.

Работа соленоидных тормозов нормально производится за счет тока, производимого тяговыми машинами в процессе электрического торможения. Для случаев применения соленоидного торможении в нескольких вагонах поезда предпочтительно параллельное соединение отдельных соленоидов, чтобы при неисправности одного из них прочие не прекращали своей работы (рис. 270). Довольно часто при наличии моторного и прицепных вагонов в первом торможение производится только электрическим способом, а в прочих — соленоидным. Иногда соленоидные тормоза питаются по смешанному способу. Одна обмотка, как это нормально, питается от тяговых машин, а вторая — от сети. Последняя обмотка, выполняемая в большин-

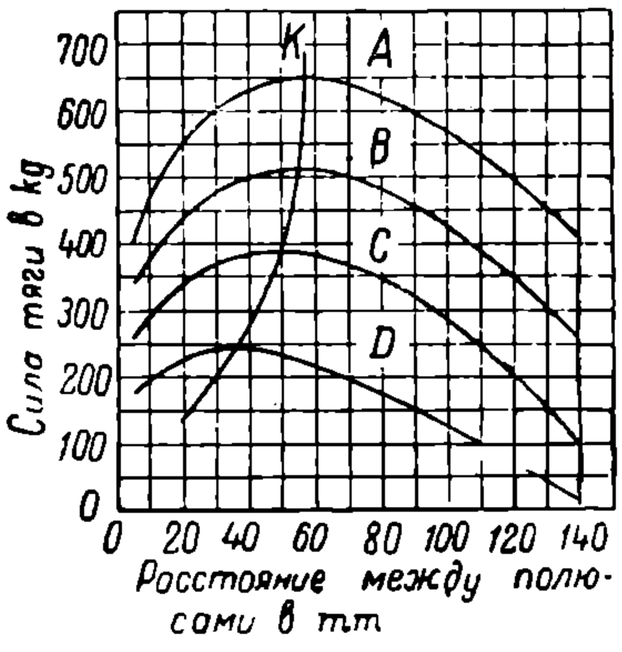


Рис. 269. Характеристики соленоидного тормоза.

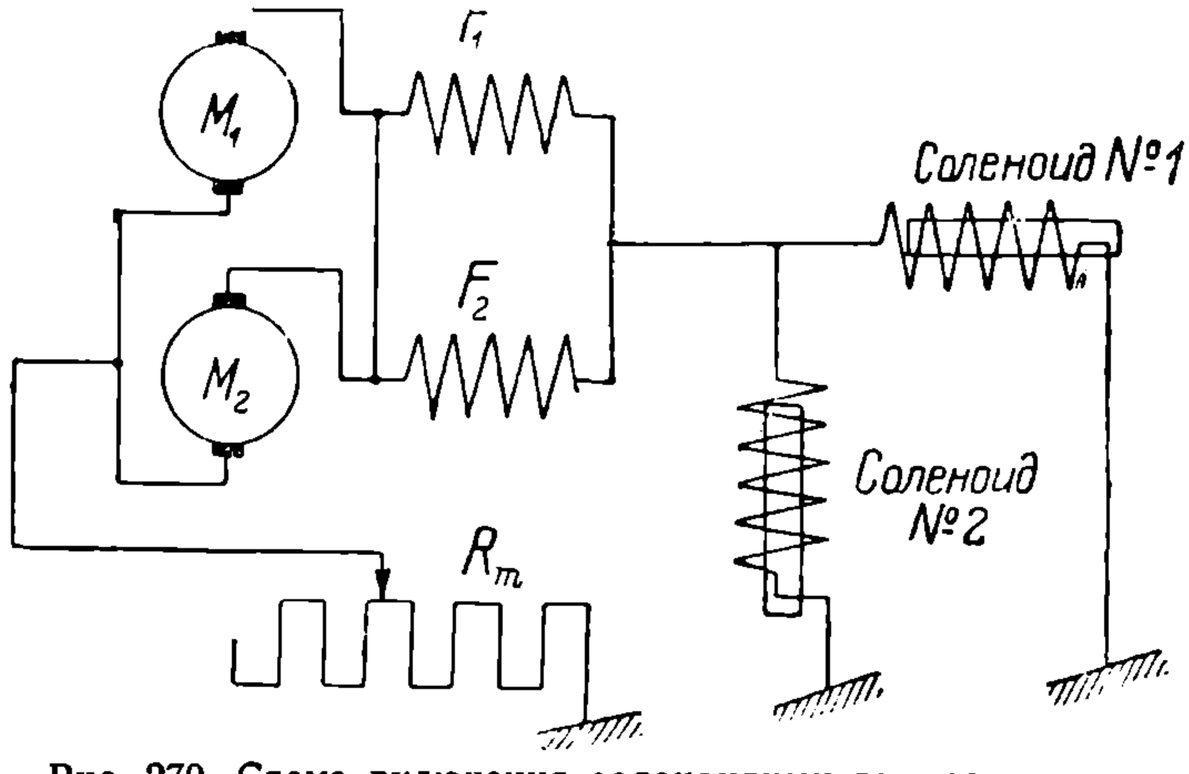


Рис. 270. Схема включения соленоидных тормозов.

стве случаев из тонкого провода с большим числом витков, вступает в действие тогда, когда по тем или другим причинам основная тормозная цепь отказывается работать.

Преимущество соленоидного торможения — в уменьшении нагрузки машин, так как поезд тормозится не только в силу генераторного эффекта их, но и благодаря использованию тормозного тока для приведения в движение и нажатия колодок. Особенно значительные преимущества соленоидный тормоз приобретает у прицепных вагонов, которые при электрическом торможении часто не тормозятся и потому набегают на моторные вагоны.

IV. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РЕЛЬСОВЫЙ ТОРМОЗ.

Идея рельсового тормоза состоит в подвеске башмаков с электромагнитами к раме подвижного состава (рис. 271). В нормальном положении пружины оттягивают башмаки от рельсов. Для торможения же магниты возбуждаются, башмаки при-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

тягиваются к рельсам, и получающиеся при движении их по рельсам силы трения производят тормозящий эффект. Иногда схема осложняется одновременно нажа-

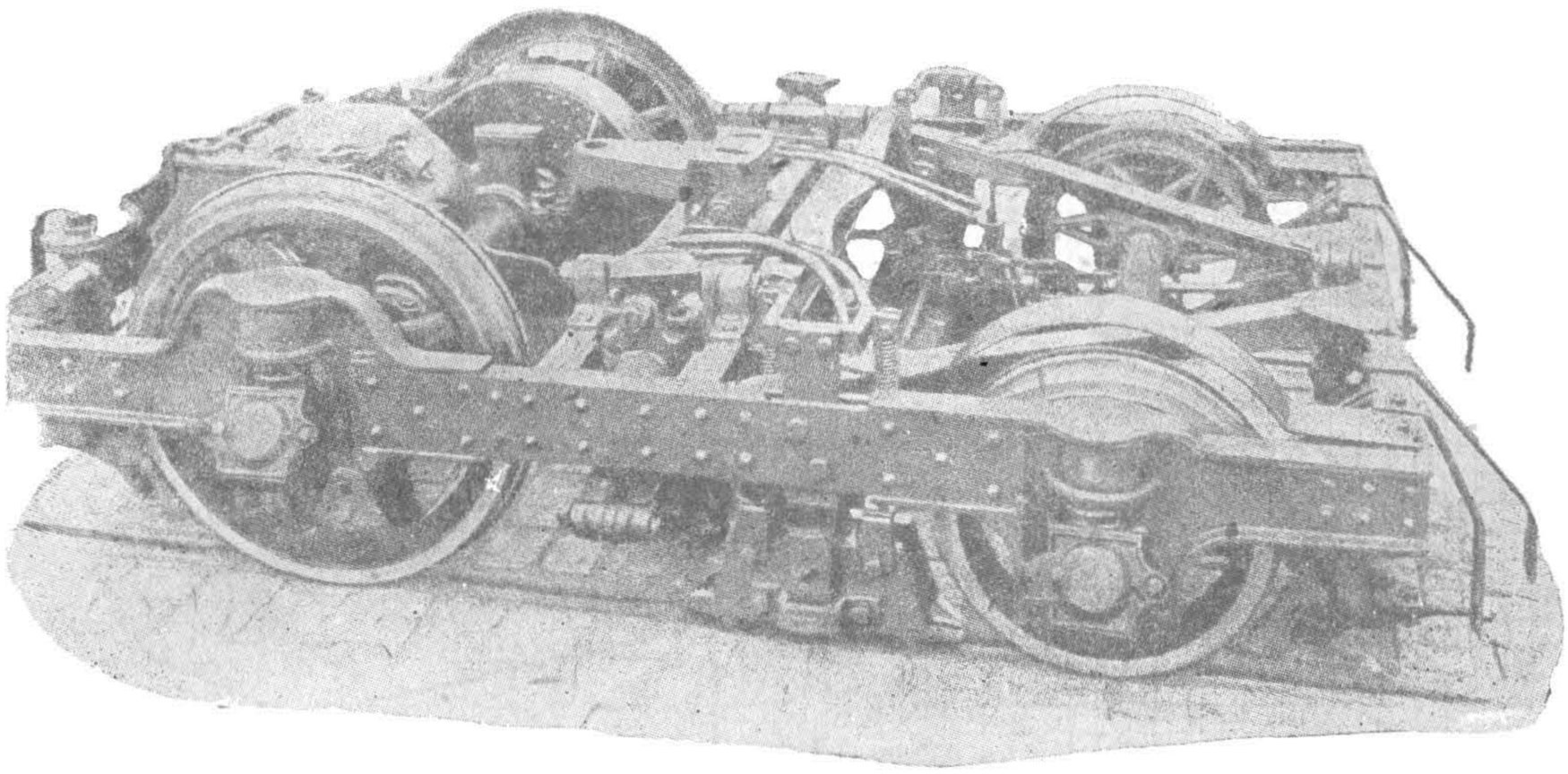


Рис. 271. Общий вид рельсового электромагнитного тормоза.

тием опускающихся башмаков с помощью соединенных с ними колодок на бандажи. Тормозной эффект при рельсовом торможении усиливается несколько и вследствие увеличения давления подвижного состава на путь, вызываемого притяжением магнитов и связанных с ними рам к рельсам.

Рельсовые тормоза выполняются или с продольным относительно рельсов направлением магнитного потока (рис. 272), или с поперечным (рис. 273). Вторая система дает возможность при одной и той же длине башмака дать бо́льшие усилия. При продольной системе по данным Seefehlner'a один погонный метр башмака дает силу притяжения около 2 300—3 000 kg, а при поперечном эта цифра поднимается до 3 750—4 450 kg. Характеристики рельсового тормоза применительно к продольной системе даны на рис. 274. Коэфициент трения башмаков по рельсу колеблется очень сильно в зависимости от состояния погоды—от 1/30 до 1/7.

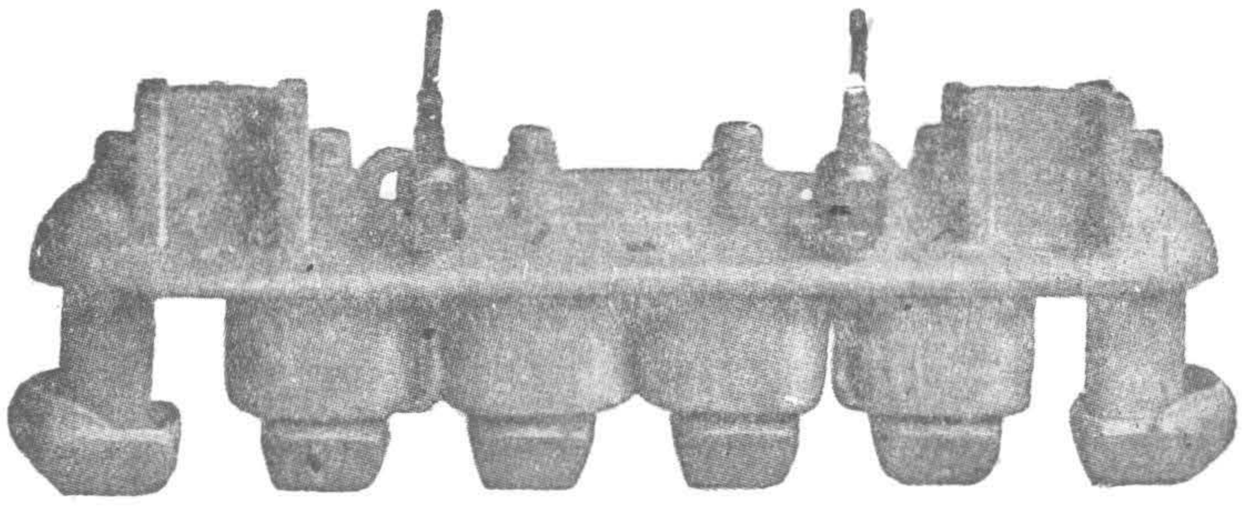


Рис. 272. Рельсовый электромагнитный тормоз продольным потоком AEG.

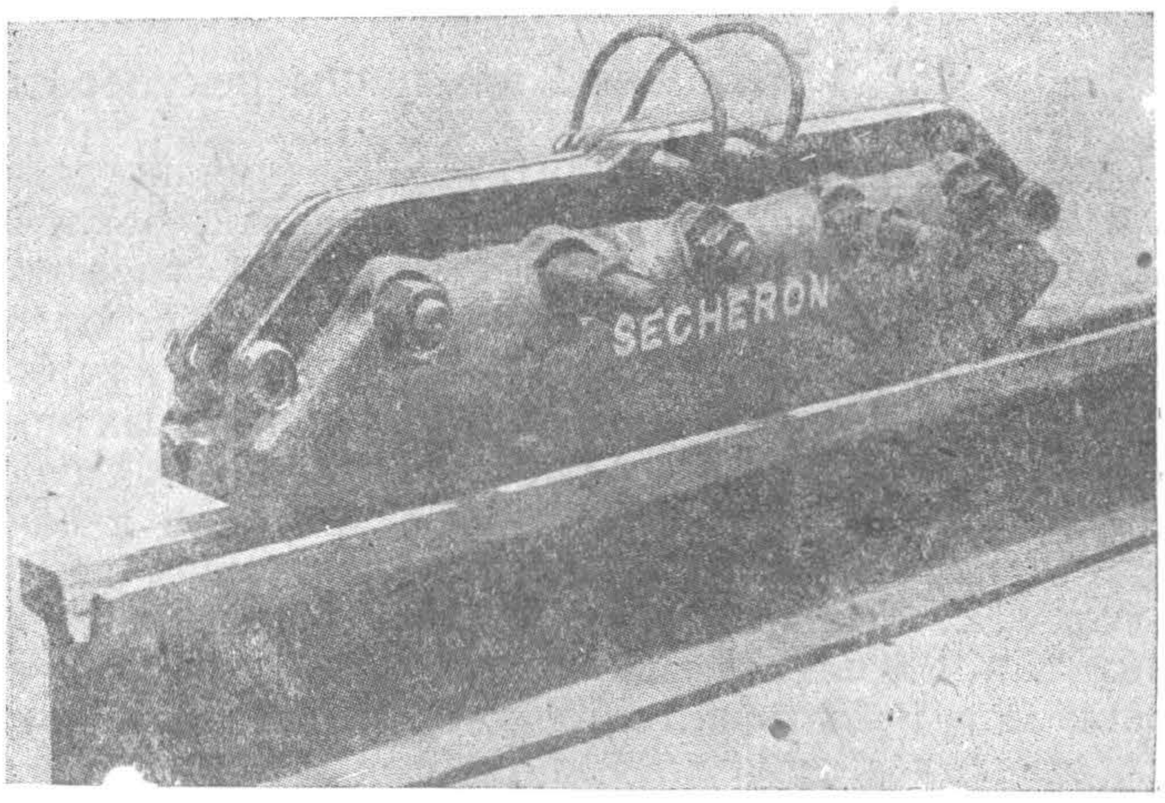


Рис. 273. Рельсовый электромагнитный тормоз с поперечным магнитным потоком Sécheron.

При работе рельсовых тормозов приходится считаться с рядом затруднений. Желательно длину башмаков брать по возможности малой — это облегчает проход по кривым и стрелкам. Ввиду этого предпочтительна система поперечных потоков. Очень тщательно следует следить за расстоянием между рельсом и башмаком при поднятом положении последнего. Высота эта должна быть порядка 5—6 mm.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Двигаясь по рельсам, башмак часто задевает их выступающие грани. При интенсивном торможении нередко сильно перекашиваются рамы подвижного состава, что часто влечет за собой сход поезда с рельсов. Однако, рельсовый тормоз имеет и очень большие достоинства. Главное его преимущество — в том, что интенсивность торможения при нем не связана со скольжением колес. Теоретически ее можно доводить до каких угодно пределов, чего нельзя сделать при выше разобранных системах тормозов.

Питание электромагнитов рельсового тормоза можно производить или от тяговых машин, или от сети. Для большей гарантии безопасности нередко применяют смешанный способ питания.

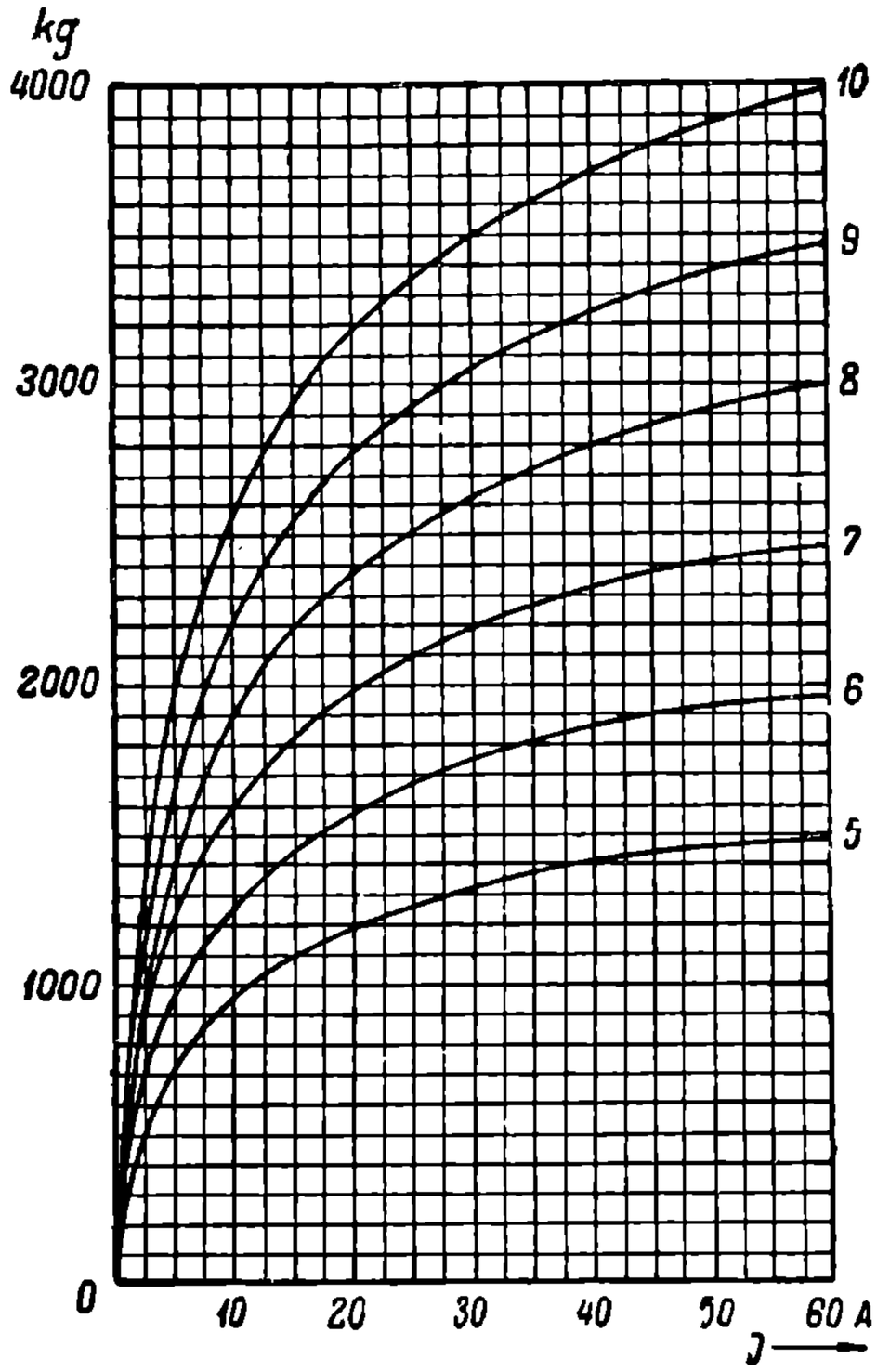


Рис. 274. Характеристики рельсового электромагнитного тормоза типа рис. 272 при числах полюсов от 5 до 10.

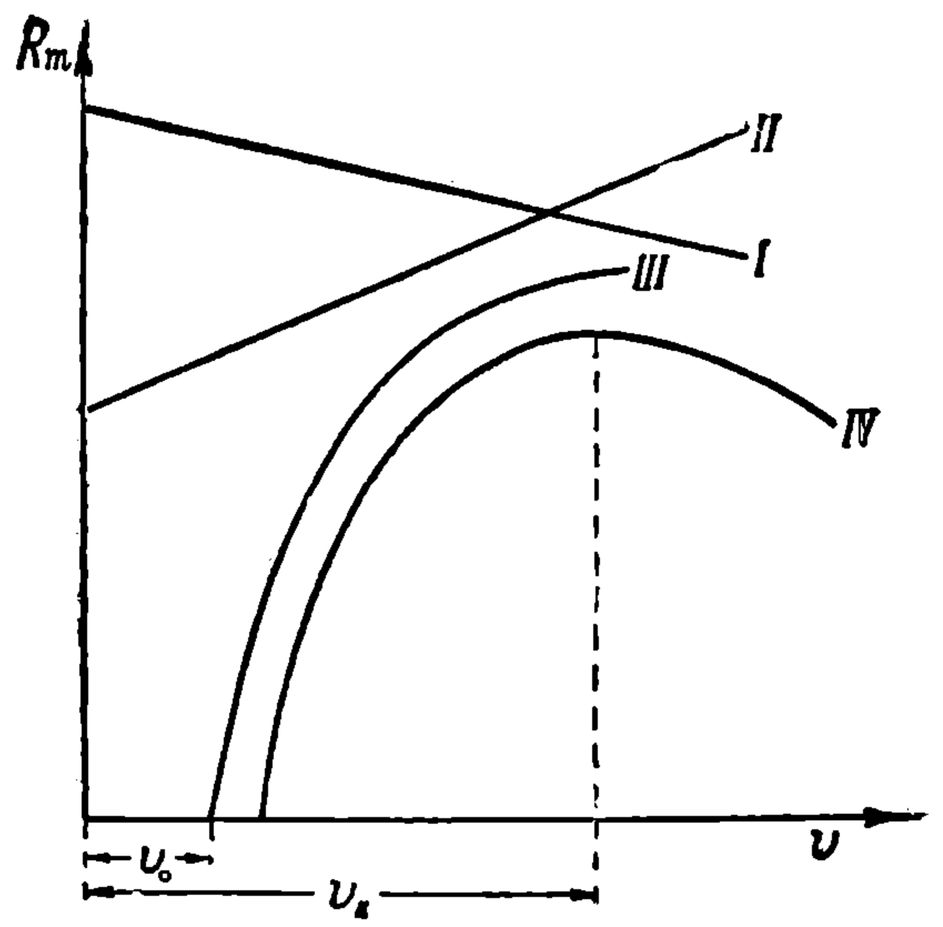


Рис. 275. Механические характеристики торможения.

V. РЕКУПЕРАТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ТОРМОЖЕНИЯ ПОЕЗДА.

1. Основные принципы рекуперативного торможения.

Сущность рекуперативного торможения поезда или, как часто его называют, торможения поезда с рекуперацией энергии, заключается в том, что энергия, вырабатываемая машинами при электрическом торможении, вместо того, чтобы теряться непроизводительно в тормозных реостатах, отдается в сеть. При рекуперативном торможении поезда представляют собою как бы перемещающиеся электрические станции, механическими двигателями которых являются силы уклонов местности и силы инерции поездных масс. Естественно, что количество энергии, отдаваемой в сеть, тем больше, чем значительнее по величине и по протяженности уклоны. Горные дороги должны в этом отношении давать наибольший эффект. Однако, и в условиях равнинного профиля рекуперация возможна, так как силы инерции поезда, преодолеваемые при торможении, особенно при большом количестве остановок могут быть источниками значительной отдачи энергии в сеть. Опыты ряда итальянских и других трамвайных предприятий, а также парижского метрополитена показывают, что рекуперативное торможение возможно не только на горных дорогах тяжелого типа, но и на дорогах типа городского. В последнем случае предпочтительно только применение таких схем рекуперации, при которых отдача энергии в сеть имела бы место в возможно широком диапазоне скоростей, вплоть до величин близких к нулю. При таких условиях силы инерции могут быть использованы в наибольшей степени.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

При выполнении схем рекуперации приходится считаться с рядом технических требований. Прежде всего по условиям безопасности движения процесс рекуперативного торможения, как и процесс реостатного торможения, должен отличаться механической устойчивостью. Сущность этого требования сводится к тому, чтобы в период действия тормозов при увеличении скорости движения поезда тормозной эффект усиливался, кладя предел опасному увеличению скорости. Очень важно, чтобы такое увеличение тормозного усилия происходило автоматически, по крайней мере в определенных интервалах изменения тормозных усилий. В большинстве существующих схем рекуперативного торможения данное требование в большей или меньшей степени удовлетворяется. При таких условиях торможение приобретает значительное преимущество перед торможением колодками, при котором с увеличением скорости вследствие уменьшения коэфициента трения колодок о бандажи тормозной эффект падает, и машинист, чтобы предотвращать благодаря этому опасное нарастание скорости, должен каждый раз особо воздействовать на колодки.

На рис. 275 приведены типы механических характеристик рекуперативного торможения, дающих зависимость тормозных условий R_m от скорости v. Кривая I дает неустойчивый режим торможения. Кривая II представляет образец умеренной устойчивости. Кривая III дает устойчивость резко выраженную. Характерно, что первые две кривые обеспечивают торможение до нулевых скоростей, третья же кривая начинает давать тормозный эффект только после некоторой скорости v_0. Кривая IV дает тип торможения, при котором режим устойчивости получается только до определенной критической скорости v_k. В существующих схемах рекуперации такой тип кривых встречается довольно часто. В подобных случаях рабочая часть кривых нормально должна не выходить за пределы устойчивости характеристик.

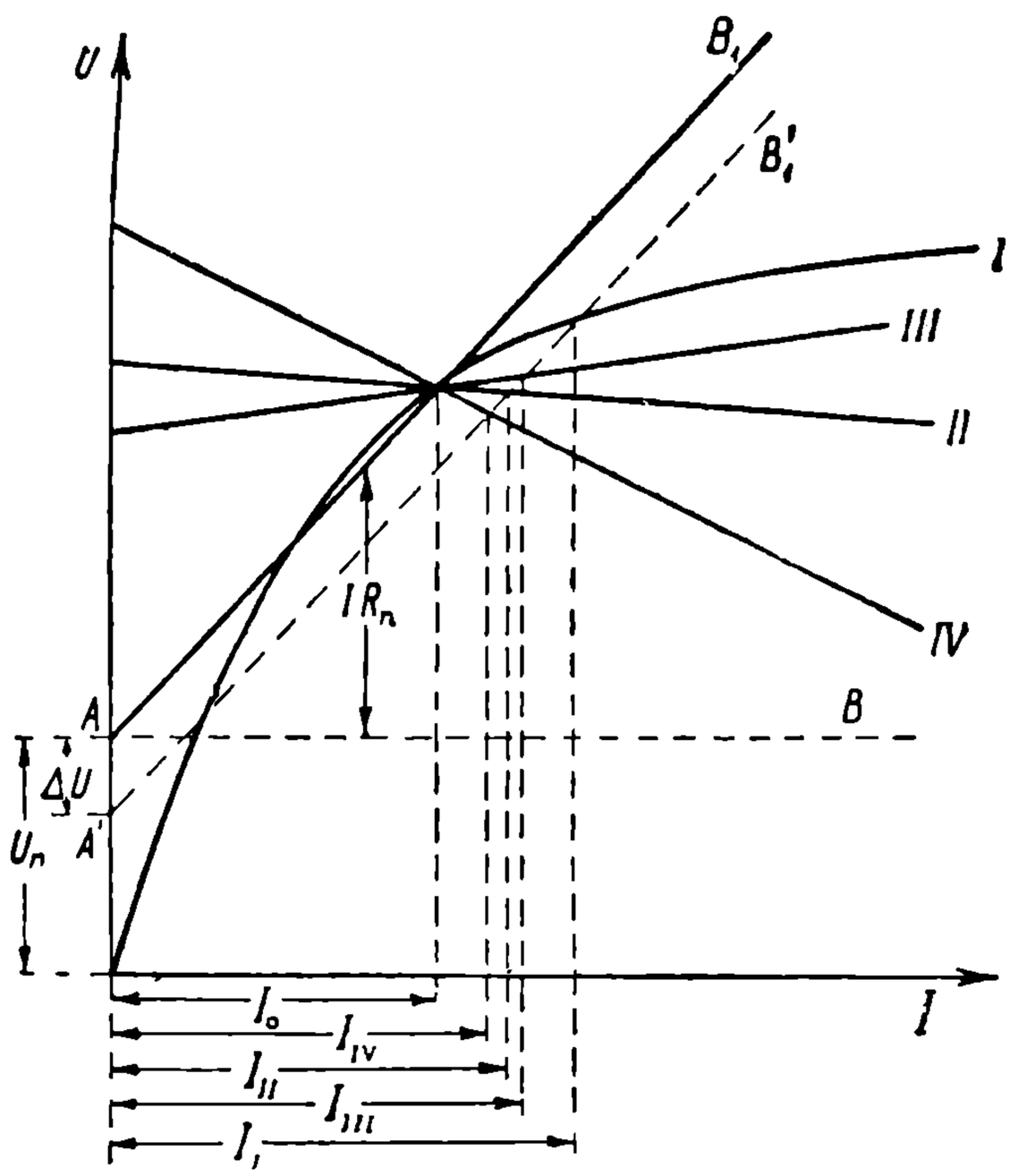


Рис. 276. Диаграмма электрической устойчивости рекуперативного торможения при различных характеристиках генераторов.

Кроме механической устойчивости, при рекуперативном торможении важно обеспечить электрическую устойчивость. При торможении важно, чтобы всякие изменения рекуперативного тока, вызываемые колебаниями напряжения в линии, были ограничены по возможности узкими пределами. При работе генератора на сеть, чем выше напряжение сети, тем меньше при прочих равных условиях генерируемый ток, и, наоборот, при понижении напряжения ток должен возрастать. При больших падениях напряжений, допускаемых в контактных сетях, колебания рекуперируемого тока могут достигнуть недопускаемой величины, если сама характеристика рекуперации не будет содержать в себе элементов, ограничивающих эти колебания.

В отношении работы электрических машин на сеть следует различать машины последовательные, шунтовые, компаундные и противокомпаундные. По степени электрической устойчивости эти четыре основных типа сильно отличаются друг от друга. На рис. 276 кривая I изображает внешнюю характеристику последовательного генератора, кривая II — шунтового, кривая III — компаундного и кривая IV — противокомпаундного. Точка работы генератора на сеть должна определяться пересечением с приведенными характеристиками линии напряжения сети *AB*. Если в главной цепи машин имеется добавочное сопротивление R_r, то к напряжению

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

сети еще прибавляется добавочное падение напряжения $IR_д$, в результате чего получается вместо прямой AB новая линия AB_1. Если предположить, что напряжение в сети упадет на величину ΔU, то вместо одного и того же тока I_o, отдаваемого всеми четырьмя типами машин, получатся соответственно разные токи I_I, I_{II}, I_{III} и I_{IV}.

Из схемы видно, что особенно сильного возрастания тока нужно ждать в последовательном генераторе, который, вообще говоря, совершенно не гарантирует надежной устойчивости работы. Практически мало пригодным является также компаундный генератор. Шунтовый генератор обеспечивает достаточную устойчивость. Наилучшими свойствами обладает противокомпаундная характеристика, что и является причиной наиболее частого ее применения во всех ответственных случаях работы. Нужно, однако, иметь в виду, что при противокомпаундной системе возможна механическая неустойчивость торможения при чрезмерных ослаблениях магнитного потока машин. Ввиду этого, при расчете рекуперации необходимо планировать ее на тех частях характеристик, которые дают устойчивый режим в механическом отношении. Противокомпаундирование генераторов на практике производится разными методами. В частности при постоянном токе, где противокомпаундирование находит себе особенно широкое применение, нужный эффект ослабления поля с возрастанием тока достигается или применением специальных возбудителей с диференциальным возбуждением, примером чего может служить ниже приведенная система GEC, или же изменением тока возбудителя с помощью специальных стабилизирующих реостатов, как это достигается в приводимой ниже системе Вестингауза. Другое решение вопроса, начинающее также получать распространение, — это применение специальных тяговых машин со смешанным возбуждением, работающих двигателями с компаундным включением обмоток, а генераторами с противокомпаундным. Следует также отметить, что включение добавочного сопротивления $R_д$ в главную цепь усиливает противокомпаундирование системы, в чем нетрудно убедиться, определяя на рис. 276 приращения токов для данных ΔU при увеличении $R_д$ и его уменьшении.

2. Рекуперативное торможение при постоянном токе.

Системы с последовательным соединением якорных и возбудительных обмоток тяговых машин. Отдача энергии в сеть с помощью последовательных генераторов по причине сложности их самовозбуждения и малой устойчивости работы представляет большие практические затруднения и требует применения специальных искусственных схем.

Одной из них является схема, представленная на рис. 277. При работе по этой схеме, пока напряжение у машин ниже напряжения линии, реле *b* отключает их от сети и они работают как при нормальном электрическом торможении через реле *a* на реостаты. В тот же момент, когда напряжение линии оказывается превзойденным, реле *b* автоматически включает машины на сеть. В дальнейшем, как только ток, отдаваемый в сеть, достигает определенной величины, реле *a* выключает реостаты, и машины начинают полностью работать на сеть. Прекращение отдачи энергии, связанное с уменьшением скорости поезда, наступает, когда ток рекуперации и напряжение машин падают ниже той нормы, на которую отрегулированы реле *a* и *b*. Тогда сначала реле *a* включает реостат, а потом при дальнейшем падении э. д. с. машин реле *b* отъединяет всю тормозную цепь от сети.

Данная система была испытана на дороге Cassel — Wilhelmshöhe и дала в общем приемлемые результаты. Однако, эту систему нельзя считать достаточно совершенной. Регулировать при ней отдачу энергии, а также и связанное с этим замедление при торможении практически весьма трудно, так как для этого требуется значительно осложнить общую схему. Кроме того, эта система не обладает достаточной электрической устойчивостью. При резких колебаниях напряжения на токоприемнике токи рекуперации могут чрезмерно возрастать. Для защиты машин от этих токов, очевидно, систему нужно еще снабдить добавочными максимальными реле. Возможная область применения разобранной системы должна ограничиться, повидимому, относительно легкими поездами из моторных и прицепных вагонов и, главным образом, на линиях, где не имеется значительного колебания напряжения на токоприемниках.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Более совершенными схемами рекуперации следует считать те системы, где в цепь главных генераторов последовательно включаются добавочные машины, задача которых независимо от скорости движения поезда регулировать рекуперируемый ток в заранее намеченных пределах. Примером такой схемы является выше приведенная система парижского метрополитена, которая, как было уже указано, помимо безреостатного пуска, преследует и цель рекуперации энергии (рис. 159).

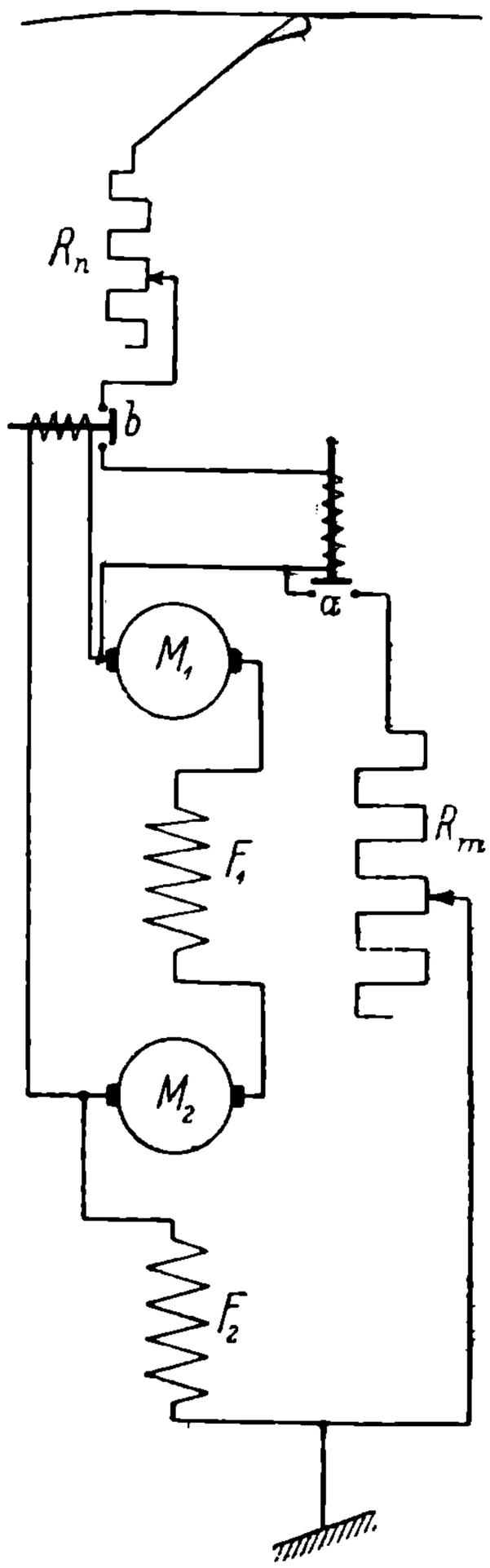


Рис. 277. Схема рекуперации энергии при последовательных генераторах.

Для выяснения рассматриваемого вопроса необходимо вспомнить, что разбираемая схема вагона содержит два главных двигателя M_1 и M_2. Кроме того, для осуществления разгона поезда без потерь в реостатах и для рекуперации энергии, имеется вспомогательный агрегат, состоящий из компаундной машины m_1, шунтовой m_2 с диференциальным возбуждением и небольшой третьей машины m_3, также с диференциальным возбуждением и включаемой только для рекуперации. В начале процесса рекуперирования энергии машина m_1 работает двигателем, а m_2 — генератором. Обмотки E и H дают при этом такой результирующий поток, при котором э. д. с. машины m_2 без участия главных электродвигателей M_1 и M_2 дала бы в сеть желательный ток. Как только цепь замыкается, электродвигатели M_1 и M_2 начинают быстро возбуждаться и брать на себя часть напряжения сети, до их возбуждения приходившиеся полностью на машину m_2. По мере возрастания напряжения на зажимах главных электродвигателей, напряжение на зажимах машины m_2 падает, поток обмотки E слабеет. При равенстве ампервитков обмоток E и H, машина m_2 никакой э. д. с. не дает. Все почти напряжение сети берут на себя главные машины, причем на долю каждой приходится около половины нормального рабочего напряжения. В дальнейшем ампервитки обмотки E становятся меньше ампервитков обмотки H, машина m_2 переходит к работе двигателем. Э. д. с. машин M_1 и M_2 будут расти, компенсируя напряжение сети и э. д. с. двигателя m_2. Режим регулируется так, что при наибольшей возможной скорости поезда, при которой начинается рекуперация, э. д. с. машин M_1 и M_2 достигают своей нормальной величины, равняясь каждая приблизительно полному напряжению сети.

Таким будет процесс возбуждения в том случае, если возрастанию э. д. с. главных генераторов точно будет соответствовать падение напряжения на зажимах машины m_2. Тогда ток, отдаваемый системой в сеть, все время будет оставаться постоянным по величине. В действительности же этого не будет. Так как самоиндукция у обмотки E больше, чем у обмоток возбуждения главных электродвигателей, то падение э. д. с. машины m_2 будет запаздывать, и в результате могут получиться чрезмерные токи отдачи. Для предотвращения этого ускоренный рост э. д. с. главных электродвигателей ослабляется путем шунтирования их обмоток возбуждения вспомогательной машиной m_3, одна из обмоток возбуждения которой приключена к зажимам машины m_2. В начальной стадии рекуперации э. д. с. машина m_3 регулируется таким образом, что в случае запаздывания падения напряжения на зажимах m_2 относительно роста э. д. с. главных электродвигателей часть тока главных обмоток возбуждения ответвляется в якорь машины m_3. Рост основных э. д. с. задерживается до тех пор, пока э. д. с. машины m_2 не упадет, что повлечет за собой уменьшение э. д. с. машины m_3 и благодаря этому переход соответствующей части ранее ответвленного рабочего тока из шунта в главную цепь. В период, когда э. д. с. машины m_2 равна нулю, ток в якоре m_3 также равен нулю. В дальнейшем ток машины m_3 меняет свое направление и на протяжении всей второй стадии работы рекуперации, когда машина m_2 работает двигателем, он складывается в главных возбудительных обмотках с основным рабочим током. При замедлении

НТБ УГУНТ (ДІІТ)

поезда процесс идет обратным порядком—машина m_2 переходит от работы двигателем к работе генератором. Процесс рекуперации может продолжаться до самой остановки поезда. Соотношения постоянных машин подобраны так, что разгон поезда и рекуперация совершаются с полной автоматичностью при постоянных двигательном и тормозящем моментах. Разобранная схема была применена на вагонах весом в 28 t, оборудованных двумя электродвигателями по 175 PS каждый. Увеличение веса вагонов, вызванное приведенным оборудованием, определилось в 1,4 t. Экономия энергии, благодаря отсутствию потерь в реостатах и благодаря рекуперации, достигла 20%.

Система парижского метрополитена до настоящего времени не получила распространения. Главная причина — ее сложность и значительные затруднения по точной балансировке отдельных ее элементов.

Значительным распространением в настоящее время начинает пользоваться система рекуперации по схеме Somaini, уже разобранной выше с точки зрения пускового процесса. На рис. 161 видно, каким образом включаются машины при разгоне поезда. На том же самом принципе основана и рекуперация. Только в данном случае отдельные части динамотора работают в обратном порядке. Те его части, которые присоединены непосредственно к зажимам главных машин, работают в качестве двигателей, а присоединенные к сети — в качестве генераторов.

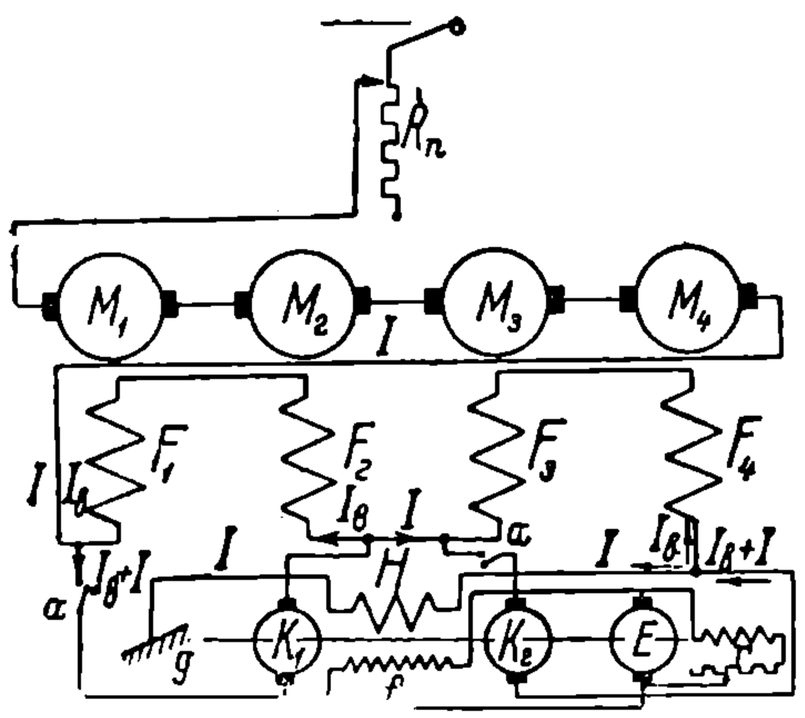


Рис. 278. Схема рекуперации энергии GEC.

При рекуперации так же, как и при разгоне, во избежание бросков токов при переходах с одного положения на другое, Somaini применяет включение в главную цепь небольших сопротивлений, которые затем автоматически выключаются с помощью реле. Точно так же производится на каждой ступени и регулировка цепи возбуждения, но только в обратном порядке по сравнению с работой при разгоне. С помощью шунтовых сопротивлений здесь в начальной стадии работы каждой ступени ток в обмотке возбуждения уменьшается, а затем при понижении скорости для поддержания постоянства рекупируемого тока увеличивается.

Система Somaini применена на ряде трамвайных вагонов Рима, Милана, Бари и Болоньи. Экономия энергии при испытаниях была получена от 21% до 26,5%, причем из общей экономии около $^1/_4$ приходится на безреостатный пуск и около $^3/_4$ на рекуперацию. Следует также отметить применение системы Somaini и на пригородных дорогах, например на линии Verseli — Tripo, работающей при напряжении в 2400 V.

Рекуперативное торможение при независимом возбуждении тяговых машин. Преимущества работы шунтовой машины на сеть заставляют и при рекуперации чаще обращаться вместо последовательного к шунтовому включению. Для этого тяговые последовательные двигатели обращаются в генераторы с независимым возбуждением, причем, как уже было указано, в большинстве случаев система рекуперации снабжается противокомпаундным приспособлением.

Одной из первых схем с независимым возбуждением нужно считать систему GEC, примененную этой фирмой на ряде электровозов дороги Ch. M. St. P. R. (рис. 278). Данная схема представлена для одной половины электровоза, имеющего восемь индивидуальных тяговых двигателей. Вспомогательный агрегат, применяющийся для рекуперации, состоит из двухколлекторного генератора $K_1 — K_2$, возбудителя E и приводящего их в действие двухколлекторного электродвигателя на 3000 V, работающего непосредственно от сети и здесь не показанного. Машина $K_1 — K_2$ имеет диференциальное возбуждение. Одна обмотка H питается главным рабочим током, вторая же f — от возбудителя, который одновременно дает ток для освещения и управления электровоза. Для перевода машин от работы двигателями к работе генераторами включаются контакторы $a — a$. Машина E регулируется таким образом, что ток возбуждения электродвигателей $M_1 — M_4$ начинает увеличиваться за счет тока машины $K_1 — K_2$. Электродвижущие силы машин $M_1 — M_4$ начинают возрастать, и, как только сумма их сделается больше напряжения сети,

НТБ УГУНТ (ДІІТ)

машины переходят к генераторной работе. Главный ток во всей цепи, за исключением главных обмоток возбуждения, меняет свое направление, и через якорь машины $K_1 — K_2$ начинает переходить ток, равный сумме главного тока и тока возбуждения.

Начальный желательный режим работы устанавливается соответствующей регулировкой машины E, причем переход на рекуперацию происходит без перерыва цепи. Поддержание же раз установленного режима при изменении линейного напряжения производится автоматически, благодаря диференциально включенным обмоткам H и f. В самом деле, если предположить, что при подходе поезда к подстанции, как это обычно бывает, напряжение линии начинает возрастать, то при отсутствии автоматизации отдаваемый в линию ток упал бы, и скорость поезда начала бы возрастать. При данной же схеме уменьшению рабочего тока противодействует возрастающее преобладание ампервитков обмотки f над ампервитками обмотки H, причем действие это еще усиливается благодаря увеличению э. д. с. машины E, а следовательно, и главного возбудительного тока, вследствие возрастания скорости движения всего агрегата, происходящего от увеличения напряжения у зажимов его двигателя. При соответствующем подборе постоянных машин получается почти полная автоматизация процесса.

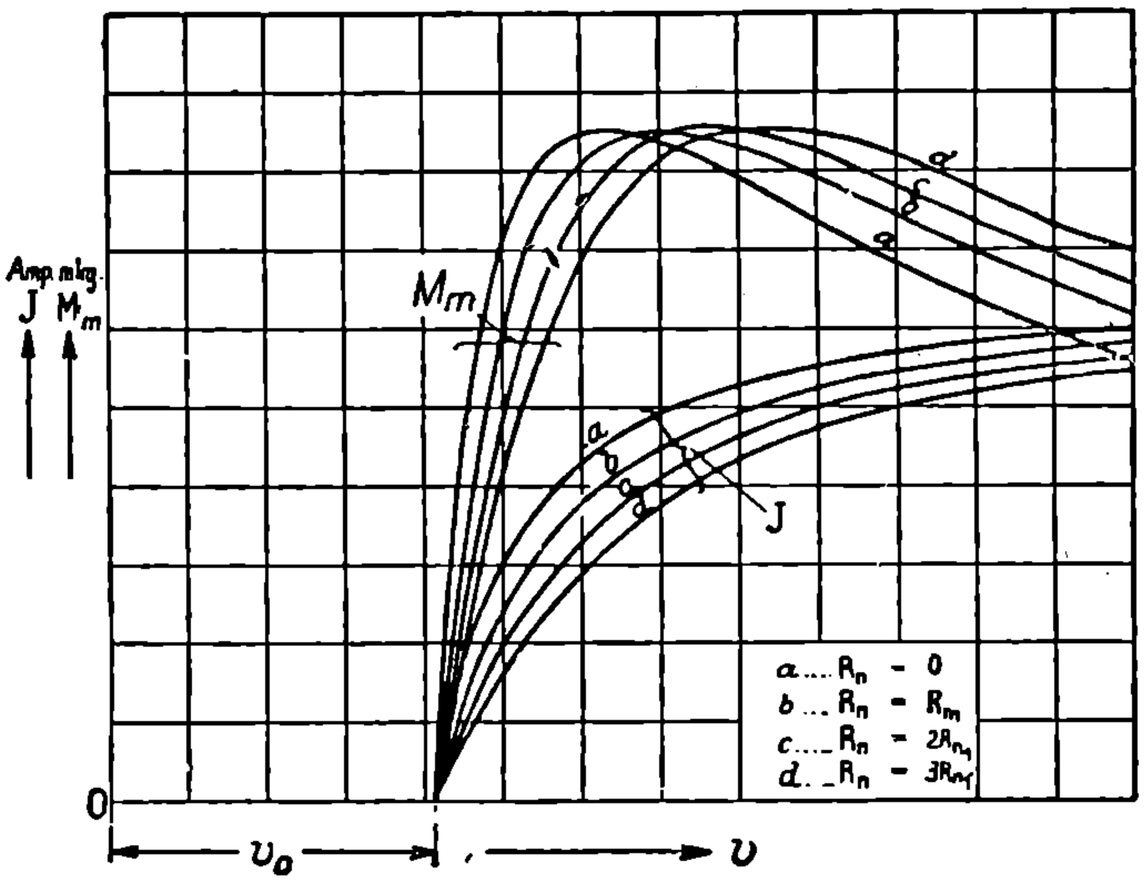


Рис. 279. Рекуперативные характеристики системы рекуперации GEC.

На рис. 279 приведены рекуперативные характеристики системы GEC. Они показывают зависимость токов рекуперации и тормозных моментов M_m от скорости поезда v при различных сопротивлениях внешней цепи R_n. Как видно из них, рекуперация возможна только до скорости v_0, величина которой в данном случае около 10 km/h. Весьма значительным недостатком подобных схем является наличие критической точки устойчивости их работы. Кривые тормозных моментов после некоторой критической скорости при дальнейшем ее возрастании дают понижение своих значений. Это объясняется диференциальным возбуждением. После критической скорости, несмотря на дальнейшее увеличение тока рекуперации, ток возбуждения настолько сильно уменьшается, что в результате тормозной момент, пропорциональный рекуперируемому току и потоку, понижается. Чтобы поезд не попадал в зону неустойчивого движения, необходимо очень внимательно следить за режимом рекуперации. В случае нужды следует прибегать к увеличению возбуждения возбудителя E, что может повысить критическую скорость, характеризующую устойчивость рекуперации.

Вторым вариантом применения независимого возбуждения при рекуперации является схема Вестингауза (рис. 280). Характерная ее особенность—возбудитель E и так называемое стабилизирующее сопротивление R_r, имеющее назначением обеспечивать устойчивость режима рекуперации в отношении рекуперируемых токов. При работе главных машин двигателями схема работает при включенном контакторе a и выключенных b и C. При рекуперации включаются b и C, а a выключается. При переходе с тягового положения на тормозное система может работать без разрыва в главной цепи. Процесс обеспечения устойчивости работы системы в отношении отдаваемых токов может быть проанализирован на основании уравнения:

$$E_в = I_в (R_в + R_e + R_r) + IR_r, \qquad (200)$$

обмоток возбуждения

противоположное изменение $I_в$. Если бы по тем или другим причинам ток рекуперации I всзрос, то это вызвало бы понижение возбуждения тока $I_в$. В результате получилось бы уменьшение э. д. с. главных машин, а следовательно, возросшего перед этим тока I. В случае понижения тока I имела бы место картина обратная, в результате которой ток рекуперации снова был бы сведен до величины, близкой к заданной. Кривые работы системы Вестингауза применительно к электровозам дороги P. L. M. приведены на рис. 281. В данном случае рекуперация осуществляется при трех основных ступенях включения: последовательного соединения двигателей, последовательно - параллельного и параллельного.

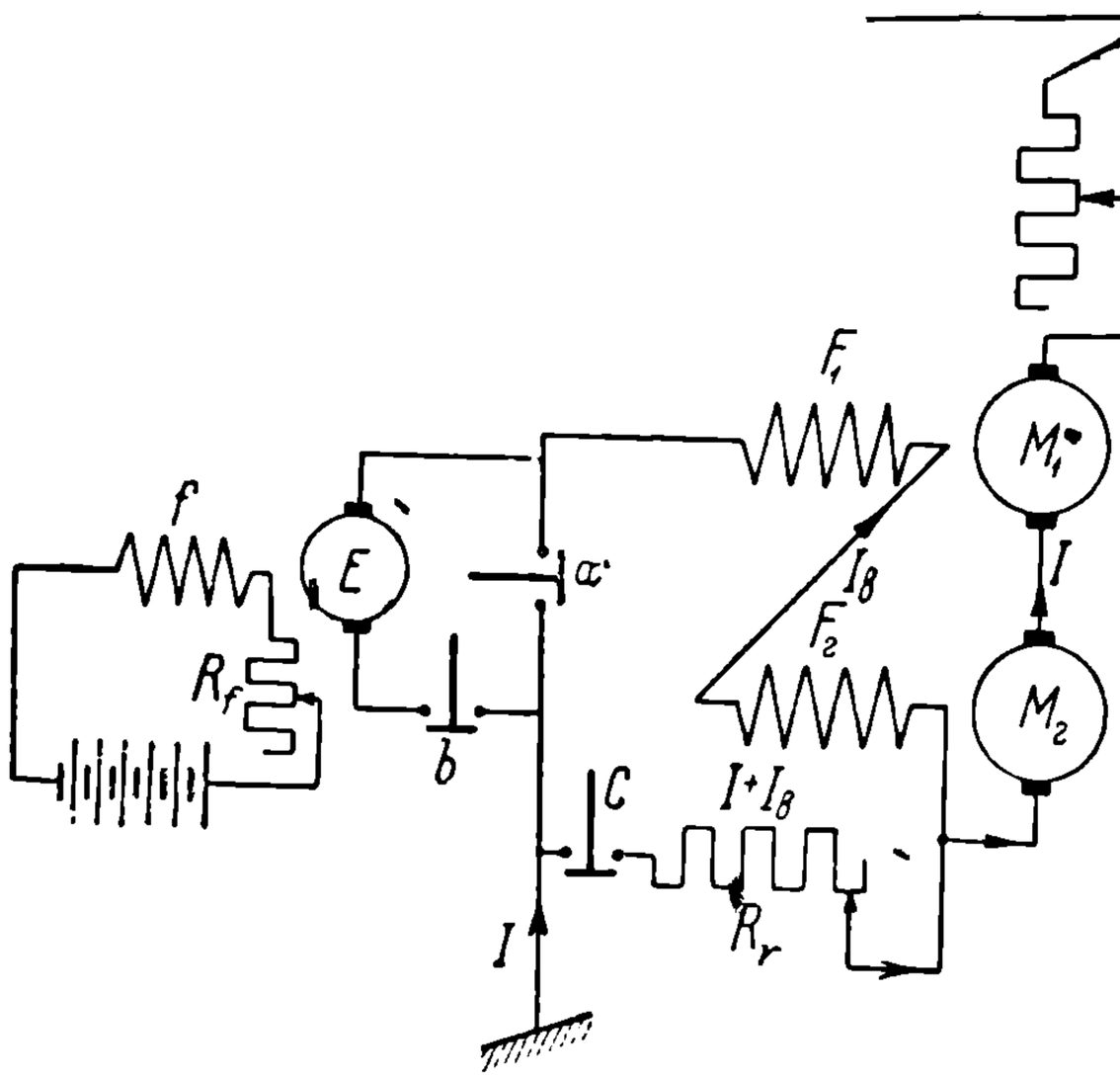


Рис. 280. Схема рекуперации энергии Вестингауза со стабилизирующим сопротивлением.

При резких колебаниях рекуперируемого тока в системе Вестингауза могут получиться некоторые осложнения. В схеме имеются две параллельных цепи, из которых одна содержит обмотки возбуждения главных машин и якорь возбудителя, вторая—только одно сопротивление R_r. Первая цепь обладает большой самоиндукцией, вторая почти безиндукционна. При резких изменениях напряжения в линии может происходить очень быстрое нарастание тока I в цепи R_r, между тем как ток $I_в$, благодаря самоиндукции своей цепи, будет понижаться замедленным темпом. В результате токи рекуперации могут достигнуть недопустимой величины. Для их ослабления иногда применяется включение последовательно с R_r добавочной катушки самоиндукции, или же само сопротивление R_r выполняется в виде индуктивного. Фирма BBC вместо этого рекомендует включать в цепь R_r небольшой добавочный последовательный двигатель со слабым насыщением m_r (рис. 282). В отношении своего действия на цепь этот двигатель при нормальной работе ведет себя как активное сопротивление, действующее совместно с R_r. При резких же колебаниях нагрузки самоиндукция якорной и возбудительной обмоток его выравнивает темпы

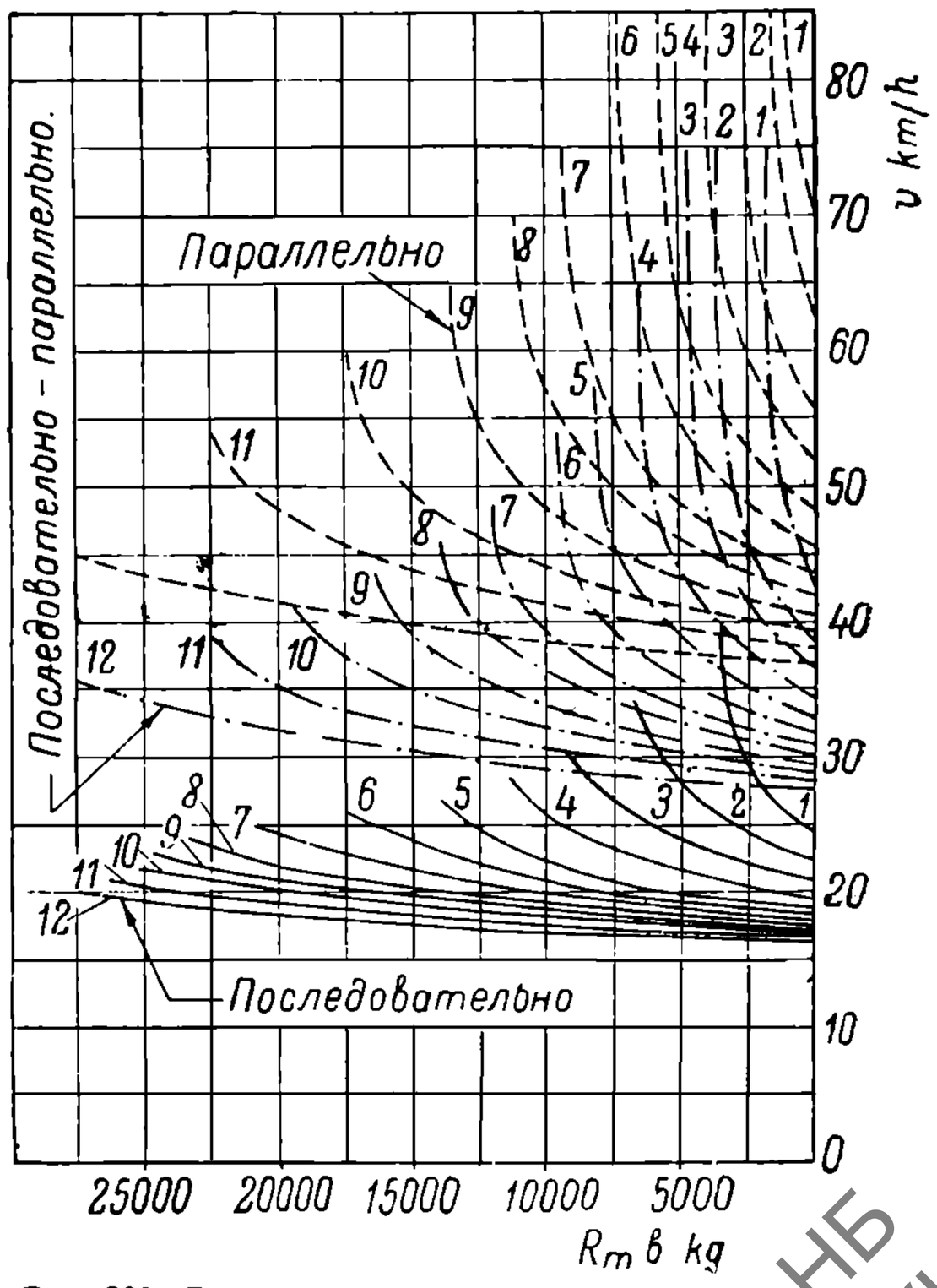


Рис. 281. Рекуперативные характеристики системы рекуперации со стабилизирующим сопротивлением дороги P. L. M.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

изменения токов в обеих цепях. Двигатель этот насаживается на один вал с возбудителем E и помогает приводить его в движение, что несколько понижает те потери, которые нормально приходится нести в реостатах R_r.

Система рекуперации Вестингауза в различных ее вариантах пользуется теперь наиболее широким распространением. Преимущество ее перед схемой GEC в том, что при ней через главный возбудитель E проходит только ток возбуждения $I_в$, тогда как через возбудители GEC проникает сумма токов I и $I_в$. Это сильно удорожает систему GEC, являющуюся, к тому же, и вообще более сложной и тяжелой. В настоящее время GEC также предпочитает работать на схемах со стабилизирующим сопротивлением. Такую же схему имеют и электровозы СССР.

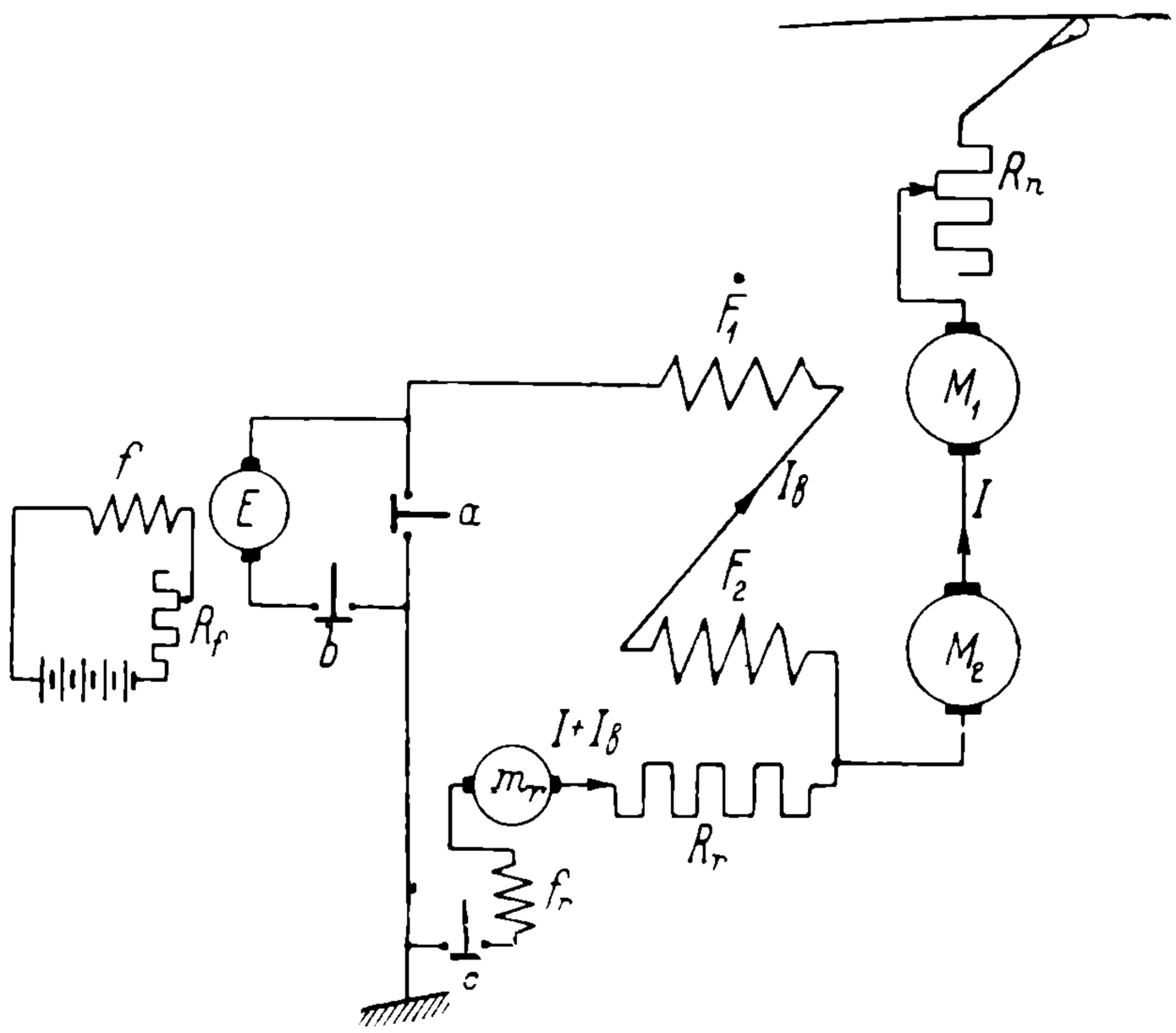


Рис. 282. Схема рекуперативного торможения ВВС со стабилизирующими сопротивлением и двигателем.

Из прочих схем рекуперации энергии нужно обратить внимание на систему рис. 283. Здесь обмотки возбуждения непосредственно не связаны с главной цепью и питаются от вспомогательного возбудителя, имеющего диференциальное включение для обеспечения устойчивости режима.

Все приведенные схемы рекуперации с противокомпаундным включением, как уже отмечалось, имеют предел механической устойчивости торможения. У них нормально имеется критическая точка скорости, до которой тормозная сила растет. При дальнейшем же повышении скорости сила торможения падает. Для повышения критической скорости и, следовательно, увеличения диапазона механической устойчивости можно применять так называемый осевой возбудитель. Его удобнее всего приводить в движение от бегунковой оси электровоза через зубчатую передачу. Повышение устойчивости здесь достигается тем, что с увеличением скорости, в противовес усиливающемуся противокомпаундному действию рекуперативного тока, возрастает и э. д. с. возбудителя. Это вызывает возрастание тока возбуждения, что и противодействует усиливающемуся эффекту размагничивания главного тока. Такой возбудитель можно мыслить себе применительно к схеме GEC, а также и к схеме Вестингауза. Недостаток осевого возбудителя, как относительно тихоходной машины,— его большой вес. Кроме того, при нем следует ожидать некоторого понижения нижнего предела скорости, при котором еще возможна рекуперация.

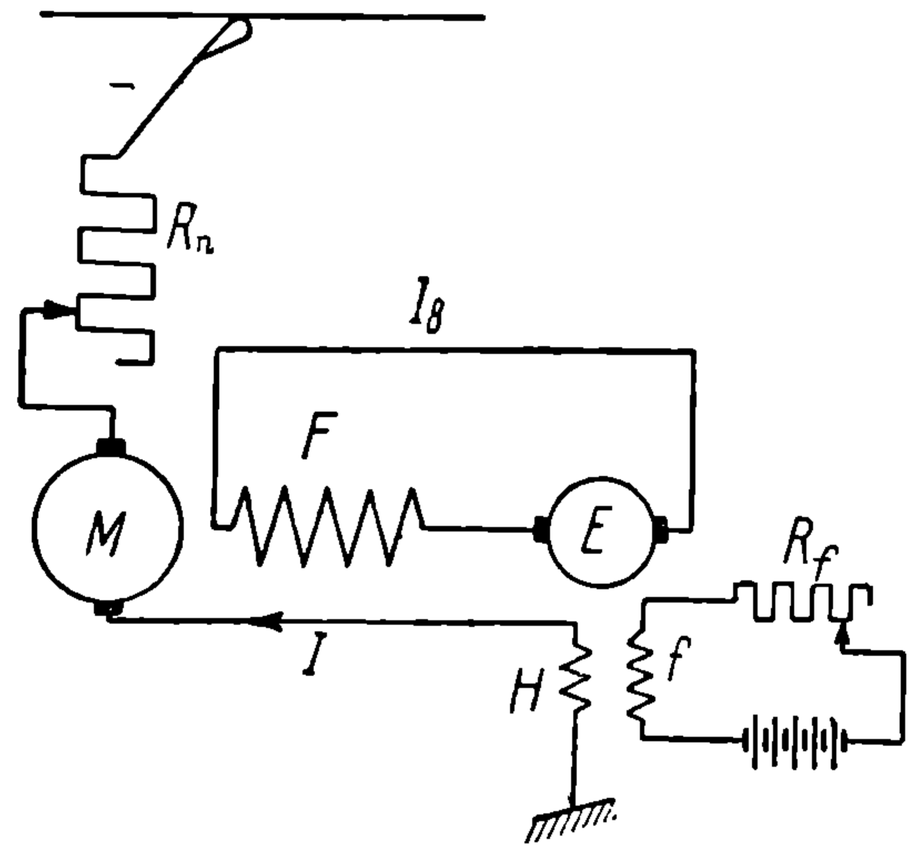


Рис. 283. Схема рекуперации с независимой цепью возбуждения тяговых двигателей.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

Очень устойчива схема рекуперации, если противокомпаундный эффект получать с помощью особого противокомпаундирующего сопротивления, включаемого в главную цепь машин. На приведенных выше рисунках можно для этого воспользоваться реостатом $R_п$. При таком включении чрезмерному возрастанию тока рекуперации противодействует падение напряжения, вызываемое таким реостатом. Схема обладает устойчивостью без критической точки. Существенный недостаток ее — значительные потери в противокомпаундирующем реостате.

В случае наличия нескольких двигателей в электровозе рекуперация энергии нормально осуществляется при различных группировках двигателей. Чаще всего применяются две или три группировки. Так, например, при шести двигателях у электровозов постоянного тока на 3000 V довольно часто применяют включение в три группы. Можно все машины включать последовательно, можно в две группы по три последовательно и, наконец, в три группы по две последовательно. При таком методе включения приходится опасаться, что нагрузка между отдельными группами, работающими параллельно, распределится неправильно вследствие возможного расхождения между характеристиками отдельных двигателей. Для того, чтобы выравнять эти нагрузки, нужно иметь возможность регулировать ток возбуждения для каждой отдельной группы. По существу, здесь нужно иметь три отдельных возбудителя, из которых каждый должен работать на одну группу двигателей. Однако, такое решение вопроса очень сильно удорожает оборудование. Фирма GEC в своей схеме для двух группировок нашла выход из этого затруднения в применении возбудителя с двумя обмотками на якоре (рис. 278). В схеме Вестингауза можно обходиться только одним нормальным возбудителем, но применяя отдельные стабилизирующие

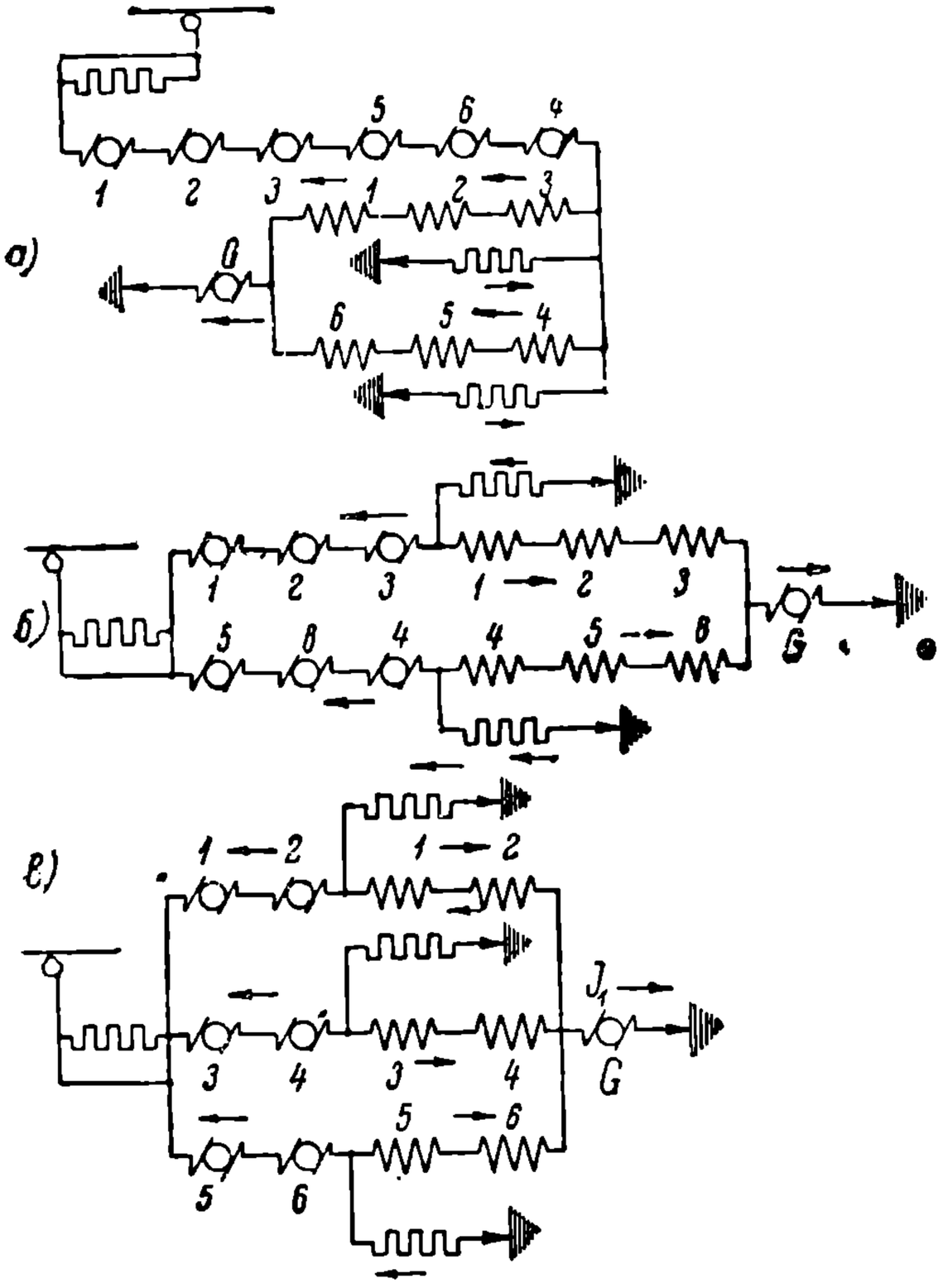


Рис. 284. Схема рекуперации при трех ступенях скоростей со стабилизирующими сопротивлениями.

реостаты для каждой группы машин. Выравнивание нагрузок в отдельных цепях достигается регулированием этих реостатов. Примером такой схемы при шести двигателях и трех группировках может служить рис. 284. В таком виде схема применена для Сурамских электровозов.

Особый класс рекуперативных схем составляют системы, в которых вместо специальных возбудителей используется часть главных тяговых двигателей. Примером таких систем может служить схема GEC, применяемая на одном из типов электровозов дороги Ch. M. St. P. R. (рис. 285). Здесь три двигателя M_1, M_2 и M_3 используются в качестве главных генераторов, а M_4 — в качестве возбудителя. Сопротивление $R_в$ служит для регулирования возбуждения M_4, а $R_г$ исполняет функции регулятора устойчивости режима. Недостатки последней схемы — неодинаковая нагрузка отдельных машин и неполное использование тормозных возможностей электровоза. Преимущества системы — в отсутствии специального возбудительного агрегата.

Другой пример схем рекуперации без специального возбудителя дает система AEG, примененная на моторных вагонах японских ж. д. (рис. 286). Недостаток этой схемы, помимо пониженной электрической устойчивости,—уменьшение коэфициента полез-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ного действия, так как в цепи обмоток возбуждения приходится терять большое количество энергии в реостатах, которые, в силу относительно малых сопротивлений обмоток возбуждения, должны для ограничения тока иметь большие сопротивления.

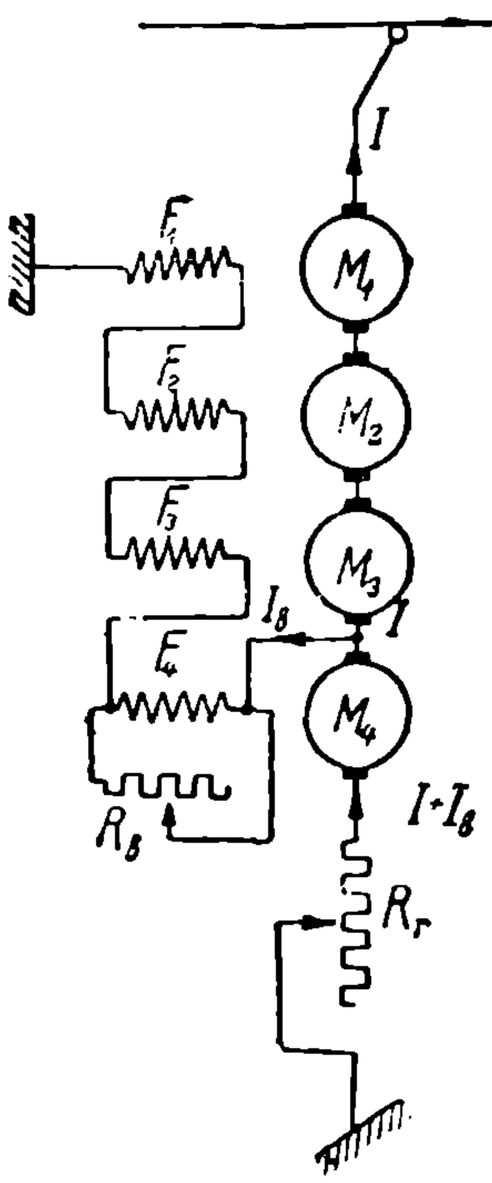


Рис. 285. Схема рекуперативного торможения при использовании в качестве возбудителя одного из тяговых двигателей.

Стремление избавиться от специальных возбудителей для рекуперации, сильно осложняющих оборудование электровозов, вызвало ряд патентных предложений, например Santuri, но эти предложения, главным образом, из-за сложности, не получили пока практического применения (Л. 128).

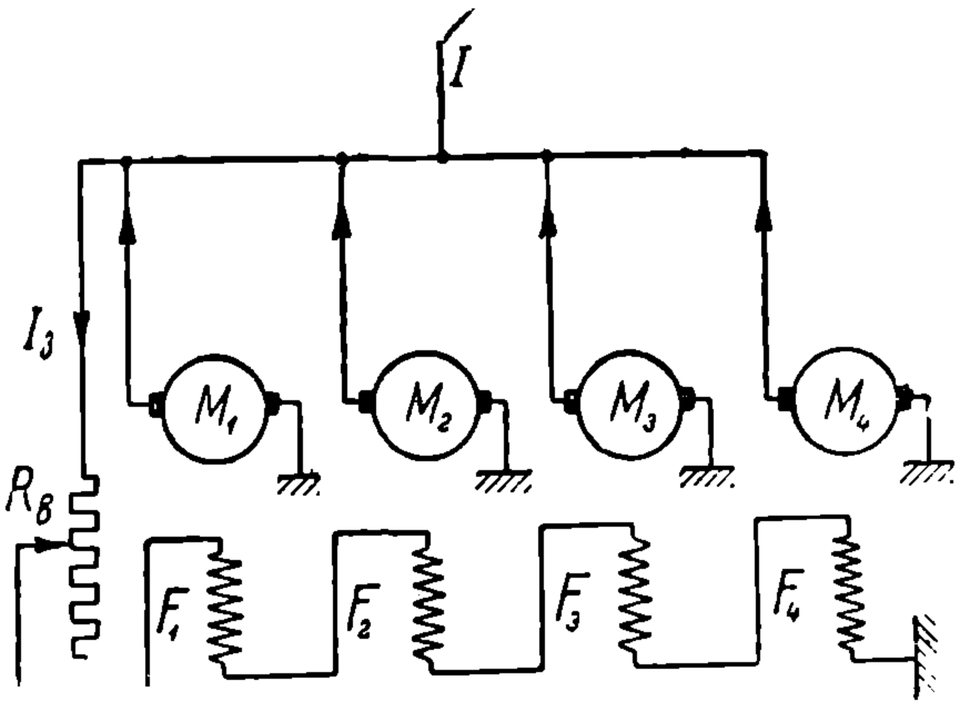


Рис. 286. Схема рекуперативного торможения с независимым возбуждением от сети.

Рекуперация энергии с противокомпаундными генераторами. Как уже было отмечено при осуществлении рассматриваемой системы, тяговые машины в качестве двигателей работают с обмотками возбуждения, создающими потоки в одном направлении, что приближает двигатели к последовательным, а при работе генераторами обмотки включаются диференциально. В качестве примера применения подобной системы может служить опытный вагон манчестерского трамвая. Вагон весом около 11 t оборудован двумя двигателями со смешенным возбуждением, мощностью каждый 37 kW. Двигатели перемотаны из последовательных нормального трамвайного типа. Управление поездом осуществляется с помощью контакторного контроллера (рис. 287 и 288). Обмотками шунтовыми являются обмотки f_1 и f_2, а последовательными — F_1 и F_2. Реостат $r_в$ служит для регулирования цепей возбуждения. Включаются и выключаются отдельные его ступени с помощью того же основного контроллера. Сопротивления r_1 и r_2 являются блокировочными для защиты шунтовых катушек возбуждения от явлений экстра-тока размыкания. Для защиты цепи освещения от перенапряжений, возможных в моменты отрыва токоприемника, когда генераторы начинают работать без нагрузки, и, следовательно, без противокомпаундного действия, схема снабжена реле перенапряжения R, включающим в нужные моменты защитные реостаты.

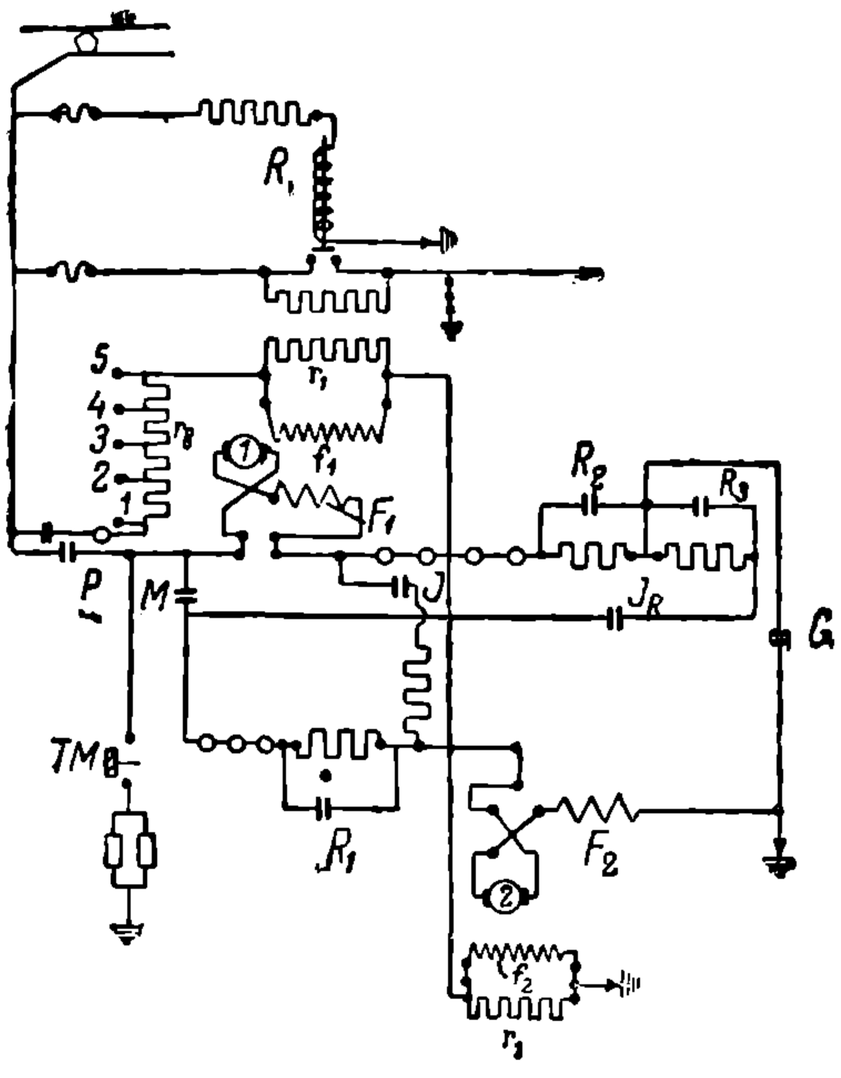


Рис. 287. Схема соединений рекуперативного торможения манчестерского трамвая при двигателях со смешанным возбуждением.

	Положение	R	M	J_R	J	G	R_1	R_2	R_3	Соединение точки 1 с точкой
Послед	1	●		●					●	5
	2	●		●			●		●	5
	3	●		●			●	●	●	4
	4	●		●				●	●	3
	5	●		●			●	●	●	2
		●			●				●	2
		●	●		●				●	2
		●	●			●			●	2
Паралл	6	●	●			●			●	5
	7	●	●			●	●		●	5
	8	●	●			●	●		●	4
	9	●	●			●	●		●	3
	10	●	●			●	●		●	2
	11	●	●			●	●		●	1
Реост. торм	1			●					●	3
	2			●					●	3
	3			●		●	●		●	3

Рис. 288. Указатель включений к схеме рис. 287.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Двигатели работают при последовательном и параллельном включении. Переход от одного из этих положений к последующему осуществляется методом мостика, так как применение метода короткого замыкания при шунтовом возбуждении в машине, замыкаемой накоротко, может вызвать большие генераторные токи. Все основные, положения работы показаны на графике включения. При работе машин в качестве двигателей ток в обмотках возбуждения в целях возрастания скорости уменьшается с помощью реостата $r_в$. Для рекуперации пользуются тем же реостатом, причем ручку контроллера нужно поворачивать в обратном направлении. Чем меньше скорость при рекуперации, тем больше должен быть ток возбуждения. При достижении некоторой критической скорости рекуперация прекращается. После этого машины отключаются от сети и замыкаются на реостаты, и окончательная остановка поезда производится по методу обычного электрического торможения. При регулировании отдачи энергии в сеть с помощью реостата $r_в$, а также и при необходимости выключить ток, что требует поворота ручки контроллера также в сторону уменьшения сопротивления $r_в$, необходимо во избежания чрезмерных рекуперационных токов поворот производить достаточно медленно.

Опыты манчестерского трамвая показали, что процент рекуперируемой энергии колеблется в зависимости от профиля от 8 до 55%, причем в среднем для всего предприятия на основании опытов можно ожидать экономии около 15—25%. Кроме манчестерского трамвая, подобные же опыты, с некоторым только видоизменением схем производил марсельский трамвай, а также и парижский, получавшие экономию от 20 до 30%. Ввиду удачных опытов в Париже предлагается применять рекуперацию в широком практическом масштабе. В СССР вопрос о рациональности применения рекуперации при компаундных двигателях ставится на очередь, и уже производится ряд опытов с этой системой.

3. Рекуперативное торможение при однофазной тяге.

Схемы при последовательном соединении роторных и возбудительных обмоток. Для перевода коллекторной последовательной машины без изменения направления ее вращения от работы двигателем на работу генератором достаточно переключить зажимы возбудительной или роторной ее обмоток. Простейшая схема включения последовательного генератора однофазного тока приведена на рис. 289. В главе о коллекторных однофазных двигателях были даны диаграммы э. д. с. и рабочих токов коллекторных машин с указанием областей генераторной их работы (рис. 52 и 53). При работе последовательных генераторов на сеть приходится преодолевать значительные затруднения. Такая работа может сопровождаться образованием режима так называемых собственных колебаний системы. Сущность этого процесса сводится к появлению в цепи наряду с токами и э. д. с., определяемыми параметрами сети, токов и э. д. с. с частотами, сильно отличающимися от сетевой. Наиболее ясное представление о данном явлении можно получить путем анализа диференциальных уравнений системы.

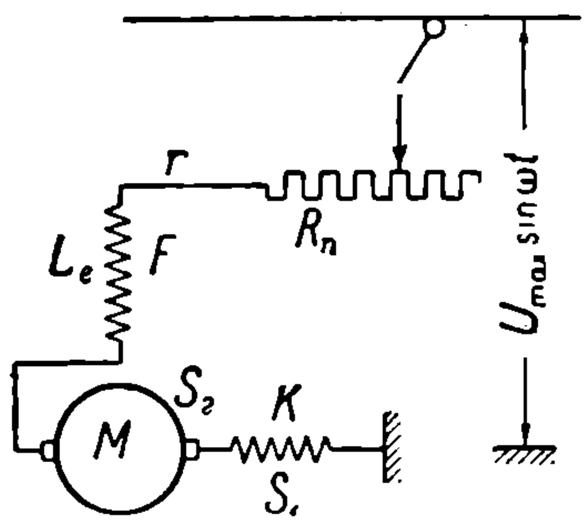


Рис. 289. Простейшая схема включения последовательной коллекторной однофазной машины на сеть.

Как следует из рис. 289, диференциальное уравнение э. д. с. и напряжения, действующих в цепи коллекторной последовательной машины, при пренебрежении насыщением магнитной системы должно получить вид:

$$U_{max}\sin 2\pi\nu t = (L_e + S_1 + S_2)\frac{di}{dt} + (r + R_n \pm nN)i. \qquad (201)$$

Здесь $U_{max}\sin 2\pi\nu t$ — мгновенное значение приложенного напряжения при условии синусоидальной формы его изменения, L_e — коэфициент самоиндукции обмотки возбуждения, S_1 и S_2 — коэфициенты самоиндукции рассеяния компенсационной и роторной обмотки, r — сумма сопротивлений обмоток самого двигателя, R_n — добавочное сопротивление и $\pm N$ — величина э. д. с. вращения машины на 1 А и 1 об/мин. Знак перед N берется в зависимости от того, работает ли машина двигателем или генератором. Отсюда вытекает, что выражение $\pm nNi$ представляет э.д.с. вращения машины. Физически приведенное уравнение показывает, что в каждый данный момент

НВ УПУНТ (ДІТ)

приложенное напряжение сети уравновешивается активным и реактивным падениями напряжения, к которым при движении присоединяется еще и э.д.с. вращения.

Общий интеграл рассматриваемого уравнения должен иметь форму:

$$i = Ce^{-\frac{r+R_n \pm nN}{L_e+S_1+S_2}t} + A\sin 2\pi\nu t + B\cos 2\pi\nu t. \qquad (202)$$

Второй и третий члены правой части полученного уравнения дают составляющие тока с частотой сети и являются результатом возбуждающего эффекта сети. Первый член определяется исключительно самой машиной и представляет собою составляющую свободных колебаний системы. При нормальной работе свободные колебания не могут быть допущены в сеть. В частных случаях они могут представлять большую опасность для различных механизмов, приключенных к сети. Например, свободные колебания в виде постоянного или в виде низкочастотных переменных токов могут угрожать трансформаторам, рассчитанным на нормальную частоту сети. С указанной точки зрения допускать образование свободных колебаний не представляется возможным. Для предотвращения их появления постоянные, входящие в диференциальное уравнение, должны быть подчинены соотношению:

$$\frac{r+R_n \pm nN}{L_e+S_1+S_2} > 0. \qquad (203)$$

При соблюдении этого неравенства режим свободных колебаний будет всегда затухающим и, если даже образуется, то затем сам собой прекратится.

Для выяснения физического значения неравенства (203) рационально преобразовать его путем умножения всех членов числителя на i^2:

$$i^2(r+R_n) \pm nNi^2 > 0$$

или

$$i^2(r+R_n) \pm e_в i > 0. \qquad (204)$$

Первый член неравенства представляет джоулевы потери, а второй — мощность, развиваемую машиной. При ее работе двигателем потери и мощность покрываются сетью. Следовательно, они должны быть одного знака. При положительном значении джоулевых потерь нужно и перед мошностью ставить знак плюс. Это указывает, что при работе машины двигателем э.д.с. вращения необходимо считать положительной. При генераторном же режиме потери покрываются самой машиной, и потому перед мощностью должен стоять знак, противоположный знаку перед потерями. Таким образом, при работе машины двигателем нужно брать в неравенстве перед мощностью знак плюс, а при работе генератором — минус.

При соблюдении выясненного правила знаков можно решить вопрос и о свободных колебаниях. Очевидно, что для двигателя режим свободных колебаний будет всегда затухающим, так как левая часть неравенства при обоих положительных членах будет всегда больше нуля. При работе же генератором это будет иметь место только при условии:

$$i^2(r+R_n) > e_в i. \qquad (205)$$

Это неравенство говорит что режим собственных колебаний будет затухающим до тех пор, пока джоулевы потери будут больше мощности машины. Нетрудно конечно, сообразить, что при таких условиях не может быть генераторного режима с отдачей энергии в сеть. Рекуперирo-

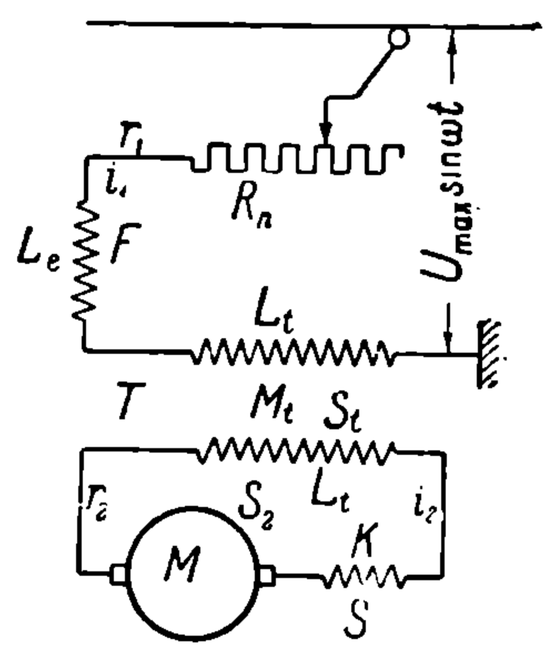


Рис. 290. Схема рекуперативного торможения при последовательной коллекторной машине однофазного тока.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

только наличием трансформаторной связи между возбудительной и роторной цепями. Коэфициенты самоиндукции обмоток промежуточного трансформатора в предположении коэфициента трансформации, равного единице, приняты равными L_t, коэфициент взаимоиндукции между обмотками M_t и коэфициент самоиндукции от потоков рассеяния S_t.

На основании рис. 290 диференциальное уравнение для первичной цепи:

$$U_{\max} \sin 2\pi\nu t = (L_e + L_t)\frac{di_1}{dt} + M_t\frac{di_2}{dt} + i_1(r_1 + R_n), \tag{206}$$

для вторичной цепи:

$$0 = (L_t + S_1 + S_2)\frac{di_2}{dt} + M_t\frac{di_1}{dt} + i_2 r_2 \pm nNi_1 = 0. \tag{207}$$

Путем исключения одного из неизвестных оба полученные уравнения сводятся к одному:

$$\left[(L_e + L_t)(L_t + S_1 + S_2) - M_t^2\right]\frac{di_1^2}{dt^2} + \left[(L_e + L_t)r_2 + \right.$$

$$\left. + (r_1 + R_n)(L_t + S_1 + S_2) \mp M_t nN\right]\frac{di_1}{dt} + (r_1 + R_n)r_2 i_1 =$$

$$= A_1 \sin 2\pi\nu t + B_1 \cos 2\pi\nu t. \tag{208}$$

Решение диференциального уравнения вида

$$A\frac{d^2 i_1}{dt^2} + B\frac{di_1}{dt} + Ci_1 = A_1 \sin 2\pi\nu t + B_1 \cos 2\pi\nu t,$$

в зависимости от соотношения постоянных коэфициентов, может принять три основные формы:

при неравных корнях характеристического уравнения:

$$i_1 = A_2 \sin 2\pi\nu t + B_2 \cos 2\pi\nu t + C_1 e^{\frac{-B+\sqrt{B^2-4AC}}{2A}t} + C_2 e^{\frac{-B-\sqrt{B^2-4AC}}{2A}t}, \tag{209}$$

при равных:

$$i_1 = A'_2 \sin 2\pi\nu t + B'_2 \cos 2\pi\nu t + e^{-\frac{B}{2A}t}(C'_1 + C'_2 t), \tag{210}$$

при мнимых:

$$i_1 = A''_2 \sin 2\pi\nu t + B''_2 \cos 2\pi\nu t + e^{-\frac{B}{2A}t}(C''_1 \sin 2\pi\nu_1 t + C''_2 \cos 2\pi\nu_1 t), \tag{211}$$

где

$$2\pi\nu_1 = \frac{\sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}. \tag{212}$$

Два первых члена выражений для i_1 во всех трех случаях дают составляющую переменного тока с частотой сети. Остальные члены дают токи, подчиненные другой закономерности, чем ток сети. Они непосредственно не зависят от режима сети и представляют собой токи свободных колебаний. Согласно уравнениям (209), (210) и (211) свободные колебания дают неустойчивый режим, возрастающий или затухающий, в зависимости от постоянных A, B и C. Уравнение (211) показывает, что при $\frac{B}{2A} = 0$ могут иметь место свободные колебания в виде переменного тока с некоторой частотой ν, вообще говоря, сильно отличающейся от частоты сети.

Как следует из предыдущего, работа на сеть по приведенным уравнениям возможна только тогда, если в сеть не будут допущены собственные колебания машины, к какой бы из перечисленных форм они ни принадлежали. Для выполнения этого требования, уравнения (209), (210) и (211) при положительных A и C требуют соответственно условий:

$$C_1 e^{\frac{-B+\sqrt{B^2-4AC}}{2A}t} + C_2 e^{\frac{-B-\sqrt{B^2-4AC}}{2A}t} = 0,$$

$$e^{-\frac{B}{2A}t}(C'_1 + C'_2 t) = 0,$$

$$e^{-\frac{B}{2A}t}(C''_1 \sin 2\pi\nu_1 t + C''_2 \cos 2\pi\nu_1 t) = 0.$$

Все эти условия удовлетворяются при $B > 0$. Для основного уравнения (208) это условие имеет вид:

$$(L_e + L_t)r_2 + (L_t + S_1 + S_2)(r_1 + R_n) \mp M_t nN > 0. \tag{213}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Так как коэфициенты трансформатора связаны равенством

$$L_t = M_t + S_t,$$

то, умножая неравенство (213) на i_1^2, можно привести его к виду:

$$\frac{(\ _e + S_t) r_2 + (S_1 + S_2 + S_t)(r_1 + R_n)}{M_t} i_1^2 + (r_1 + R_n + r_2) i_1^2 \mp nNi_1^2 > 0. \qquad (214)$$

Здесь

$\mp nNi_1^2 = \mp e_s i_1 = \mp P$ — мощность, развиваемая машиной;

$(r_1 + R_n + r_2) i_1^2 = P_{джс}$ — потери на нагревание током в машине и баластном реостате.

Первый член неравенства (214) в дальнейшем для краткости будет обозначаться также одной буквой:

$$P_z = \frac{(\ _e + S_t) r_2 + (S_1 + S_2 + S_t)(r_1 + R_n)}{M_t} i_1^2. \qquad (215)$$

Выражение (214) одинаково справедливо и при работе машины двигателем и при работе ее генератором. Переход от двигателя к генератору будет сказываться на выражении (214) в перемене знака перед P. Что касается $P_{джс}$ и P_z, то они могут быть только положительны, так как все составные части их — величины положительные. При работе машины двигателем как мощность P, так и потери $P_{джс}$ покрываются сетью. Это указывает на то, что при исследовании работы машины двигателем коэфициент N должен быть взят отрицательным, так как при этом условии знаки P и $P_{джс}$ будут одинаковы. Для двигателя неравенство (214) примет вид:

$$P_z + P_{джс} + P > 0. \qquad (216)$$

Ясно, что при работе машины двигателем условие (216) всегда будет соблюдено. Следовательно, опасаться в данном случае возникновения свободных колебаний не приходится.

На основании предыдущих рассуждений нетрудно притти к заключению, что условие (214) при работе машины генератором должно принять форму:

$$P_z + P_{джс} - P > 0. \qquad (217)$$

Если в полученном выражении $P_{джс}$ больше P, то, конечно, не может быть речи о полезной отдаче энергии в сеть. Машина в данном случае работает, как тормоз, с затратой из сети добавочной энергии на покрытие разности между $P_{джс}$ и P.

Если P больше $P_{джс}$, то машина работает с полезной отдачей в сеть. Без доказательства очевидно, что P может превышать $P_{джс}$ только при наличии члена P_z в неравенстве (217). Чем больше P_z по сравнению с $P_{джс}$, тем большая мощность P может быть допущена в пределах условия (217), что влечет за собой, конечно, и увеличение отдачи энергии в сеть. Для лучшего использования машины нужно стараться так регулировать работу, чтобы неравенство (217) по возможности приблизить к равенству. При таком приближении величина P_z будет с большой точностью выражать ту энергию, которую машина отдает в сеть.

Таким образом, разбор последней схемы показывает, что и при последовательных однофазных коллекторных генераторах отдача энергии в сеть возможна. Однако, отдаваемую мощность приходится ограничивать пределом возникновения свободных колебаний. Недостатки этой схемы—плохие $\cos\varphi$ и к.п.д. Положительная сторона ее в том, что процесс рекуперативного торможения можно вести до низких скоростей поезда. Схема эта была испытана на электровозе фирмы Tohomson-Houston Южно-французских железных дорог.

В отношении других типов коллекторных однофазных двигателей нужно указать, что рекуперация возможна и при всех типах репульсионных машин. Ввиду того, что в них и без всяких добавочных приспособлений трансформаторная связь между цепями обеспечена, они могут включаться по своей нормальной схеме. Однако, и при них свободные колебания могут возникать, а потому рекуперирование энергии можно вести только до критической точки их возникновения (Л. 144).

Рекуперация энергии при независимом возбуждении однофазных коллекторных машин. Простейшую схему такого включения дал Behn-Eschenburg (рис. 291). При ней коллекторная машина получает возбуждение от

НБ УИУНТ (ДІТ)

пониженного напряжения сети $U_в$. В главную цепь Behn-Eschenburg включает особую катушку самоиндукции L, назначение которой будет выяснено из дальнейшего рассмотрения системы.

Векторная диаграмма э. д. с. и напряжения машины построена на рис. 292. В цепи возбуждения вектор напряжения уравновешивается активным и реактивным падениями напряжения $I_в r_в$ и $I_в x_в$. Ток возбуждения, благодаря большой самоиндукции обмотки возбуждения машины, отстает от образующего его напряжения на угол, близкий к 90°. Поток $Ф_в$, образуемый током возбуждения $I_в$, создает в роторе при вращении машины э.д.с. $E_в$. Напряжение сети U, приложенное к ротору машины, должно уравновешиваться указанной э.д.с. вращения, а также активным и реактивным падениями напряжения в рабочей цепи $I(r+r_L)$ и $I(x+x_L)$. Если рассматривать изменение положения конца вектора напряжения сети U, то, как было выяснено автором, он будет при $I=\text{const}$ перемещаться по окружности, рабочая же диаграмма, дающая изменение I при $U=\text{const}$, будет прямой линией (Л. 147).

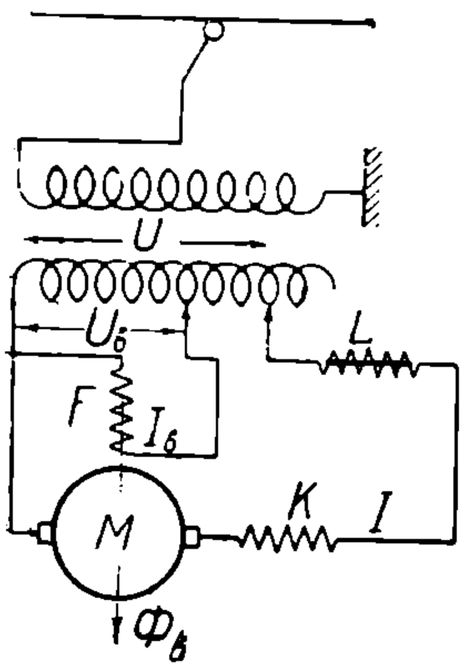


Рис. 291. Схема рекуперативного торможения при независимом возбуждении по системе Behn-Eschenburg'a.

Из построенной диаграммы видно невыгодное взаимное расположение векторов напряжения и э.д.с. вращения. При нормальной работе генератора на сеть угол между ними должен быть близким к 180°, между тем как здесь он близок к 90°. Это влечет за собой чрезмерное значение падения напряжения в цепи машины, по величине превосходящее как $E_в$, так и U. В таких условиях при относительно небольшом сопротивлении рабочих обмоток машины ток I может достигнуть очень большой силы. Для ограничения его и применяется катушка L.

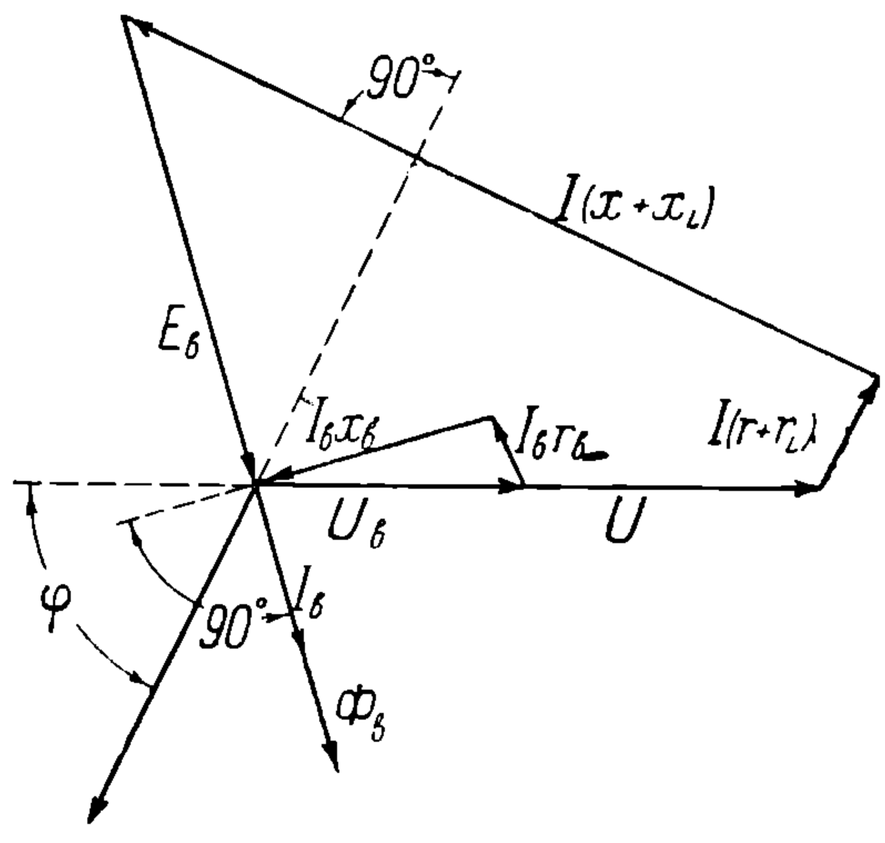


Рис. 292. Векторная диаграмма рекуперативного торможения Behn-Eschenburg'a.

Из диаграммы видно, что коэфициент мощности в системе Behn-Eschenburg'a должен иметь малые значения. Катушка L и в этом отношении оказывает благотворное влияние. С увеличением ее самоиндукции, как не трудно видеть, $\cos\varphi$ несколько улучшается. Процесс торможения поезда здесь можно производить до очень низких скоростей, так как катушка L может держать силу главного тока в допустимых пределах даже при скорости, равной нулю.

Недостатки системы Behn-Eschenburg'a—плохие $\cos\varphi$ и к.п.д. Машины и сеть сильно перегружаются реактивными токами. Катушка самоиндукции по своим KVA должна быть больше отдельно взятых и генератора и трансформатора. Поэтому она должна получаться очень тяжелой, достигая при приемлемых $\cos\varphi$ по крайней мере половины или даже двух третей веса главного трансформатора. Схема Behn-Eschenburg'a разработана заводом Oerlikon'a и осуществлена на электровозах швейцарских государственных железных дорог. Результаты испытаний подтвердили очень низкие $\cos\varphi$ и к.п.д. Табл. 41 дает представление об их значениях.

Нужно считать, что в тех случаях. когда особенно важно получить большой эффект от рекуперации энергии, схема Behn-Eschenburg'a не может считаться приемлемой. Она может быть пригодна, когда энергия дешева, и когда важно только вместо торможения колодками применять торможение электрическое.

Для устранения принципиального недостатка схемы Behn-Eschenburg'a необходимо изменить фазу между напряжением сети и э.д.с. вращения. Для этой цели нужно применить такой способ питания обмоток возбуждения главных машин, при котором ток возбуждения $I_в$ был бы сдвинут относительно напряжения сети на угол близкий не к 90°, а к 180°. Наиболее часто решение этой задачи в основе достигается использованием для главного возбуждения одного из тяговых двигателей,

НВ УДУНТ (ДІІТ)

ТАБЛИЦА 41.
Опытные данные по рекуперации энергии дорог S. S. B.

Вес поезда в t	Уклон в ‰	Скорость в km/h	Сеть					Вторичные зажимы трансформатора				
			U	*I*	cos φ	*KW*	η	*U*	*I*	cos φ	η	Уклоны
							%				%	
113	27	42	16 000	40	0,82	535	82	470	1 130	0,91	87	Подъем
310	15	39	16 000	60	0,88	870	74	570	1 580	0,92	77	„
310	27	37	16 000	90	0,92	1 260	78	620	2 000	0,92	81	„
113	27	27	16 000	50	0,28	220	66	490	900	0,60	74	Спуск
310	15	48,5	15 000	45	0,21	135	50	280	950	0,60	66	„
310	27	67	15 000	122	0,46	825	77	930	1 730	0,56	82	„
310	27	66,5	16 000	110	0,55	920	77	740	1 800	0,78	81	„

в данном случае M_1 (рис. 293). Векторная диаграмма э.д.с. и напряжения разбираемой системы приведены на рис. 294. Напряжение, приложенное к зажимам обмотки возбуждения M_1, создает ток I_1. Пренебрегая гистерезисом, поток возбуждения Φ_1 можно считать в фазе с этим током. При вращении машины поток Φ_1 создает в роторе M_1 э.д.с. вращения $E_{в_1}$, которая, действуя в цепи возбуждения главного генератора M_2, производит основной ток возбуждения $I_в$. Токи I_1 и $I_в$, благодаря большим э.д.с. самоиндукции возбудительных цепей, отстают от производящих их напряжений на углы, близкие к 90°. Образовавшийся ток возбуждения $I_в$ создает рабочий поток $\Phi_д$, который и производит в роторе главной машины M_2 основную э.д.с. вращения $E_в$. При наличии последней в главной цепи имеет место соотношение векторов:

$$\bar{E}_в = \bar{U} + \bar{I}r + \bar{I}x. \qquad (218)$$

Как видно из равенства (218), э.д.с. вращения, являющаяся источником возникновения тока рекуперации I, уравновешивается напряжением сети и падениями напряжения в рабочих обмотках машины. Регулировать систему в данном случае практически можно только изменяя возбуждение возбудителя. Недостатком приведенной схемы являются затруднения по регулированию коэфициента мощности сети. Благоприятные соотношения cos φ могут получаться только при определенных на-

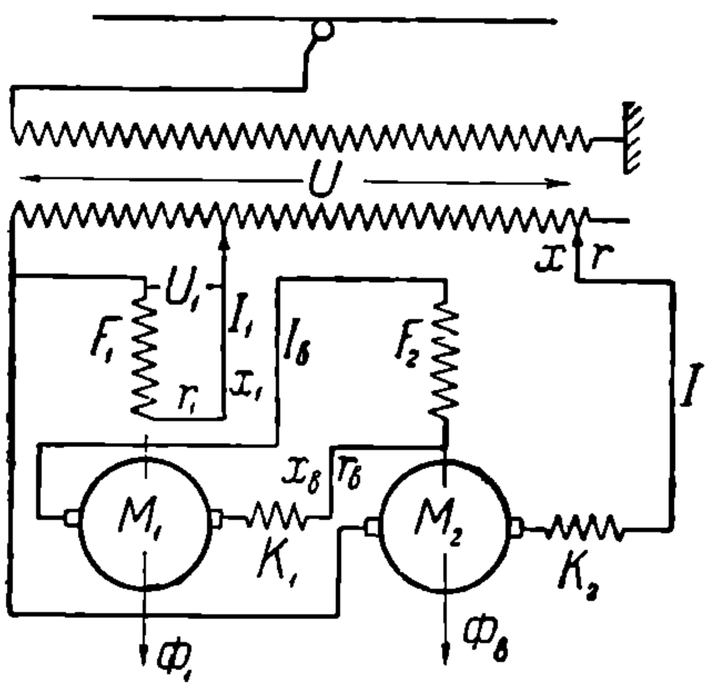


Рис. 293. Схема рекуперации энергии при фазном возбуждении главной машины.

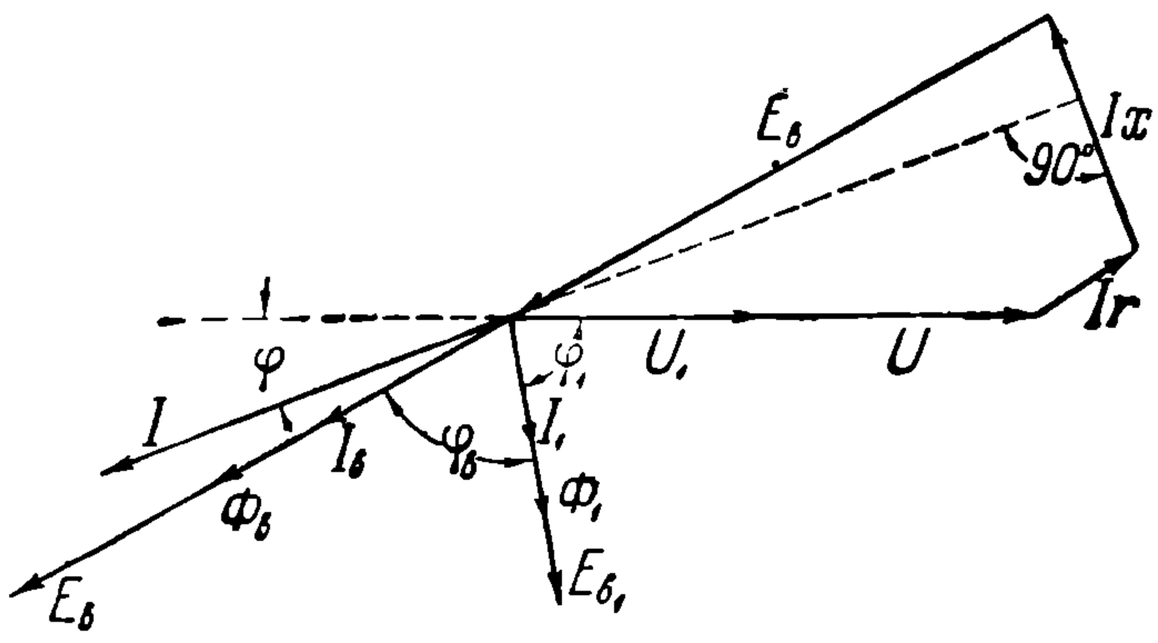


Рис. 294. Векторная диаграмма при рекуперации энергии по системе фазного возбуждения.

грузках. Впервые разобранная система была применена Вестингаузом на пробных электровозах Южно-Французских железных дорог (Л. 148).

Для улучшения системы фазного возбуждения имеются различные схемы. Простейшей из них следует считать приведенную Hellmund'ом (рис. 295). Отличается она от предыдущей только введением в цепь главного возбуждения небольшого добавочного напряжения сети $U_в$. При таком условии ток $I_в$ будет создаваться э.д.с. E_1, результирующей э.д.с. $E_{в_1}$ и напряжения $U_в$ (рис. 296). Меняя величину $U_в$, можно менять и фазу тока $I_в$, а следовательно, и фазу $E_в$. Регулированием напряжения $U_в$

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

можно заставлять основную э.д.с. $E_в$ занимать во времени такое положение, при котором машина ожет работать на сеть отстающими и упреждающими токами, а также и при $\cos\varphi = 1$. Следует отметить, что в части напряжения $U_в$ возбудитель M_1 в зависимости от способа присоединения зажимов его роторной цепи к зажимам трансформатора может работать двигателем и генератором. Теоретически при работе возбудителя двигателем процесс рекуперации, с точки зрения отдачи энергии, ухудшается. Однако, ввиду малых значений $U_в$ практически это не имеет существенного значения. На диаграмме для работы возбудителя двигателем принят знак минус, а для работы генератором плюс (Л. 155).

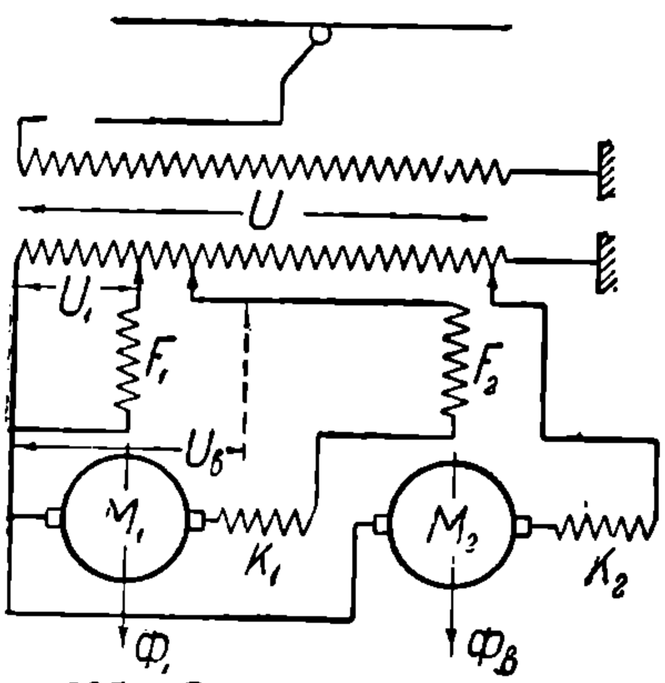


Рис. 295. Схема рекуперации при однофазных коллекторных машинах с введением в цепь главного возбуждения регулирующего напряжения.

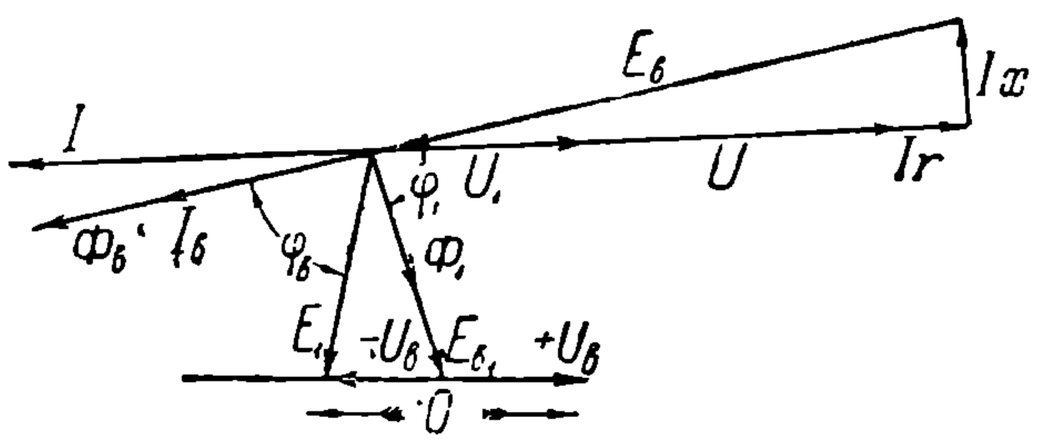


Рис. 296. Векторная диаграмма к схеме рис. 295.

Несколько иначе к вопросу об улучшении $\cos\varphi$ подходит AEG (рис. 297). Здесь для повышения $\cos\varphi$ цепь главного возбуждения связывается с цепью возбуждения возбудителя трансформатором T_1. При таком условии (рис. 298) в цепи обмотки возбуждения возбудителя ток I_1 состоит из намагничивающего тока трансформатора I_0 и тока вторичной цепи I'_{2k}:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}'_{2k}.$$

При вращении системы ток I_1, создавая поток Φ_1, производит в роторе машины M_1 э. д. с. вращения $E_{в1}$, которая создает ток I_a В результате общий возбудительный ток главной машины $I_в$ представляет собою сумму тока трансформации I_{2k} и тока I_a:

$$\bar{I}_в = \bar{I}_{2k} + \bar{I}_a.$$

Ток $I_в$ образует основной магнитный поток $\Phi_в$, с линией действия которого совпадает и э.д.с. вращения рекуперирующей машины $E_в$. В главной цепи при токе рекуперации I имеет место соотношение векторов:

$$\bar{E}_a = \bar{U} + \bar{I}r + \bar{I}x.$$

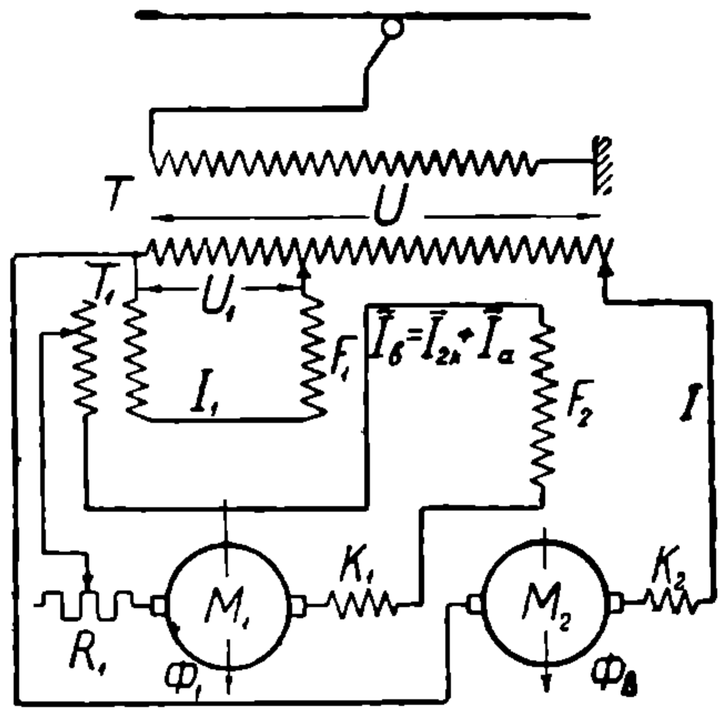


Рис. 297. Схема рекуперативного торможения при однофазных коллекторных двигателях по схеме AEG.

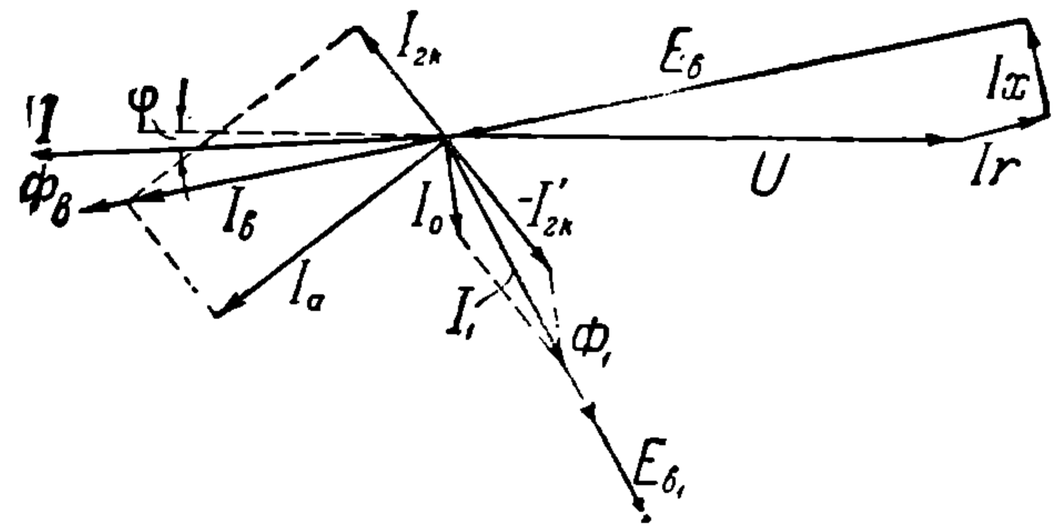


Рис. 298. Векторная диаграмма к схеме рекуперации AEG.

Регулирование системы производится изменением постоянных трансформатора T_1, главным образом — коэфициента трансформации. Весьма важно отметить, что при

НБ УДУНТ (ДІІТ)

надлежащем подборе постоянных машин и трансформатора T_1 можно добиться поддержания $\cos\varphi$ близким к единице в очень широком диапазоне скоростей без всякого последующего регулирования. Изменение тока I при $U = \text{const}$ и при неизменном соотношении постоянных T_1 подчиняется сложной зависимости — кривой высшего порядка типа строхоиды (Л. 156).

Другим вариантом решения вопроса о фазном питании обмоток возбуждения главных генераторов является применение специальных возбудителей. Наиболее простым типом такого возбудителя может быть однофазная асинхронная машина с короткозамкнутым ротором и двухфазной обмоткой на статоре, применяемая ВВС (рис. 299) При рассмотрении работы однофазной асинхронной машины для данного случая наиболее рационально исходить из теории поперечного поля. Согласно этой теории короткозамкнутый или вообще многофазный ротор машины можно рассматривать как бы состоящим из двух обмоток, замыкающихся короткозамкнутыми щетками подобно щеткам репульсионного двигателя. Положение одной пары щеток должно соответствовать линии действия потока статора Φ_1, а положение второй пары щеток должно мыслиться перпендикулярным к первому. Как известно, ток в роторе однофазной асинхронной машины имеет частоту, меняющуюся со скоростью его вращения. При состоянии покоя частота эта соответствует частоте

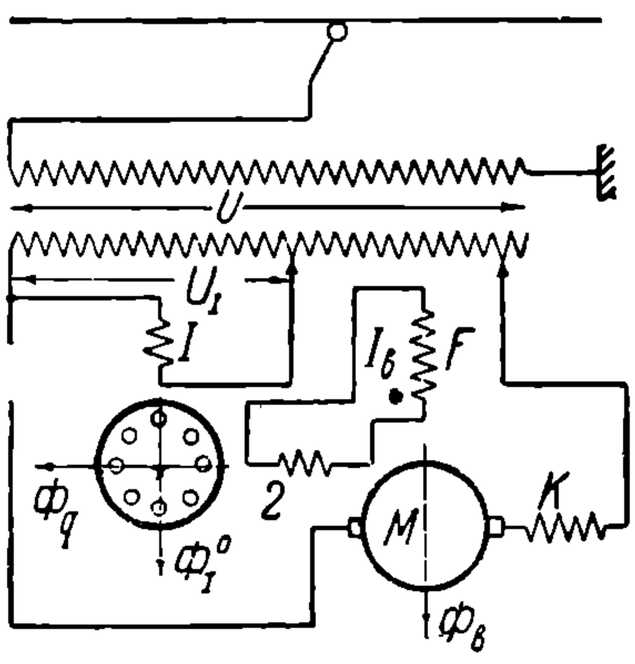


Рис. 299. Схема рекуперации энергии при однофазных коллекторных машинах с асинхронным возбудителем.

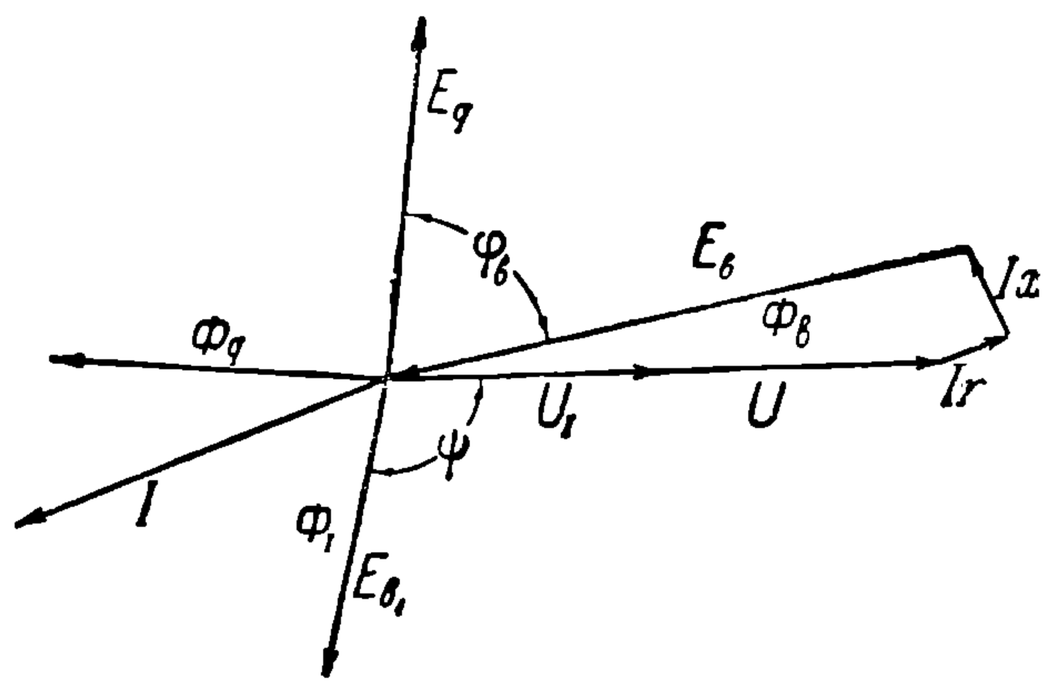


Рис. 300. Векторная диаграмма к схеме рекуперации по рис. 299.

сети. При идеально синхронной скорости по величине она удваивается. Вообще процесс изменения роторного тока весьма сложный. Однако, по теории поперечного поля конечный эффект, производимый ротором в отношении потоков, пронизывающих статор и в отношении э. д. с., в нем индуктируемых, получается совершенно таким, который имеет место, если ротор мыслить себе с двумя указанными выше обмотками и если предположить, что по этим обмоткам циркулируют токи с частотой сети. Такая эквивалентная схема замещения ротора весьма удобна и показательна при изучении действия асинхронной однофазной машины вообще и особенно при изучении процесса работы ее преобразователем фаз. При указанной трактовке принципов действия однофазной асинхронной машины векторная диаграмма э. д. с. и напряжения для рассматриваемой системы реконструкции может быть представлена, как это показано на рис. 300.

Как видно из диаграммы, напряжение сети U_1 создает в обмотке асинхронного преобразователя I поток Φ_1, отстающий от него, как и во всяком трансформаторе, на угол ψ, несколько больший 90°. Поток Φ_1 при вращении ротора создает в нем э. д. с. вращения $E_{в_1}$. Последняя производит в роторе намагничивающий ток I_q, создающий поток Φ_q. Этот поток путем трансформации воздействует на обмотку статора 2 и индуктирует в ней э. д. с. E_q. Эта э. д. с. и служит для питания основных обмоток возбуждения. Она вызывает в цепи возбуждения ток $I_в$ и, как следствие его, основной рабочий поток $\Phi_в$. Последний производит в роторе главной машины основную э. д. с. вращения $E_в$, вступающую во взаимодействие с напряжением сети U. Путем переключения зажимов обмоток возбуждения главных генераторов направление

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

тока $I_в$, а следовательно, и $E_в$ всегда можно подобрать таким образом, чтобы направление U и $E_в$ соответствовало нормальным условиям параллельной работы. Векторная диаграмма э. д. с. и напряжений главной цепи приведена на рис. 300.

Для улучшения $\cos\varphi$ асинхронный преобразователь можно снабдить на роторе добавочной обмоткой, питаемой от постоянного тока. Тогда получается синхронизированная машина, позволяющая, как и обычный синхронный двигатель, регулировать возбуждением постоянного тока коэфициент мощности всего электровоза. Асинхронный преобразователь запускается, как однофазный асинхронный двигатель от вспомогательной фазной обмотки, с включением в нее соответствующей самоиндукции.

Теперь следует ответить на вопрос, являются ли схемы рекуперации энергии при независимом возбуждении представляющими опасность в отношении возможности появления свободных колебаний. Анализ этого вопроса показывает, что опасаться их не приходится. Из числа разобранных схем в этом отношении может представлять некоторую опасность система AEG. В ней возбудитель имеет электромагнитную связь между роторной и возбудительной цепями, что имеет аналогию с разобранной выше схемой рис. 290. Поэтому теоретически возбудитель в схеме AEG склонен к образованию режима собственных колебаний. Практически, однако, при схеме AEG очень легко принять предупредительные меры, так как они должны касаться только возбудителя. Для этого достаточно включить в цепь главного возбуждения соответственно подобранные реостаты R_1 (рис. 297).

4. Рекуперация энергии при трехфазной тяге.

Рекуперация энергии при трехфазной тяге осуществляется наиболее просто, не гребуя почти никаких особых осложнений схемы управления. Трехфазные асинхронные машины без всяких переключений автоматически переходят от работы двигателями к работе генераторами. Как только при движении на скате скорость поезда превосходит синхронную, машины начинают генерировать энергию в сеть. Процесс этой работы можно проследить на вышеприведенной круговой диаграмме асинхронной машины (рис. 97).

Большим недостатком рекуперативного торможения при трехфазной тяге является трудность регулирования процесса отдачи энергии в сеть. Рекуперация энергии на каждом данном уклоне совершается при вполне определенной скорости, регулировать которую экономическим способом невозможно. Постепенно переходить от одной скорости рекуперации к другой практически возможно только при помощи механических тормозов. Применение переключения полюсов и каскадного включения несколько повышает эффект рекуперации, обеспечивая ряд скоростей, при которых возможно рекуперировать энергию. При каскадном включении двигателей по диаграмме рис. 106, как было уже указано, рекуперировать энергию можно в двух интервалах: в пределах скоростей каскада от A_0^I до A_0^{II} и при скоростях, порядка их при параллельном включении, от A_0^{III} до A^{IV}. Следует указать, что для сближения этих двух периодов работы можно включать в последнее звено каскада активное сопротивление. Этим достигается сближение точек A_0^{II} и A_0^{III}, что дает возможность, при переходе от работы каскадом к параллельной работе, снижать длительность работы механических тормозов и увеличивать общий эффект отдачи. Благодаря простоте схемы рекуперация энергии при трехфазной тяге находит себе исключительно широкое применение. Как общее правило, все электровозы трехфазного тока горных железных дорог работают с рекуперацией энергии.

VI. ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ О СИСТЕМАХ ТОРМОЖЕНИЯ ПОЕЗДА.

Всякий современный электрический поезд должен обладать вполне надежной системой тормозов. По условиям безопасности в каждом поезде должно быть не меньше двух независимых тормозов. Чаще всего комбинация эта складывается или из тормоза воздушного и ручного, или из электрического и ручного.

На дорогах тяжелого типа основным тормозом нормально служит воздушный тормоз автоматического типа. В качестве же запасного и вспомогательного берется тормоз ручной. Электрическое торможение на реостаты при дальнем движении, а также и пригородном применяется редко по причине осложнения схемы упра-

БНТУ УЛУНТ (ДІТ)

вления поездом и возможности больших перенапряжений в тормозной цепи. Однако, благодаря ряду преимуществ, свойственных электрическому торможению, оно начинает проникать и в электровозы. В качестве примера может служить электровоз СССР типа ВЛ. На дорогах трамвайного типа воздушный тормоз, как рабочий, также пока имеет доминирующее применение. На трамваях преобладают тормоза прямодействующих типов. В качестве запасного берется тормоз ручной. Очень часто на трамваях имеется еще третий тормоз — электрический. Последний при таких условиях является тормозом запасным. В некоторых трамвайных предприятиях предписывается вожатым пользоваться им в качестве экстренного тормоза, пуская его в ход одновременно с воздушным в случае крайней опасности. Однако, такой способ торможения требует большой осмотрительности и опытности от вагоновожатого. При неумелых манипуляциях легко может возникнуть скольжение колес, что может повлечь за собой не увеличение интенсивности замедления поезда, а, наоборот, ее понижение. В Америке к электрическому тормозу прибегают значительно реже, чем в Европе.

Как было уже указано, теперь намечается широкое примение электрического тормоза в качестве рабочего, при запасном ручном. В эксплоатационном отношении это часто дает значительные преимущества. Широко начинают также применяться тормоза электромагнитные соленоидного типа.

Большим распространением в настоящее время пользуется рекуперативное торможение. В предыдущих главах было указано, что даже на трамваях этот метод торможения начинает получать практическое применение. Но особенно он широко применяется на горных железных дорогах тяжелого типа. При более или менее подходящем профиле рекуперативное торможение может дать значительную экономию энергии. Примером работы поезда при рекуперации энергии могут служить данные рекуперативного торможения электровоза дороги Ch. M. St. P. R., приведенные в таблице 42.

ТАБЛИЦА 42.

Данные о рекуперации энергии дороги Ch. M. St. P. R.

Вес поезда в t	Уклон в ‰	Скорость в km/h	Мощность, отдаваемая в сеть в kW	Выработ. энергия в kWh
1 000	7	64,5	600	300
1 000	10	56,5	939	530
1 000	15	48,3	1 360	900
1 000	20	48,3	1 920	1 280
2 720	7	40	2 030	820
2 720	10	24,2	1 450	1 900
2 720	15	24,2	2 500	3 300
2 720	30	27,4	3 000	3 500

Общее количество энергии, которое можно экономить при рекуперации, зависит от профиля дороги. Например, дорога Ch. M. St. P. R. посредством рекуперации экономит около 15% от всей энергии, ею потребляемой. Очень часто при рекуперативном торможении могут быть случаи избыточной рекуперации. Может оказаться, что на данной дороге или на отдельных ее участках рекуперируется больше энергии, чем ее потребляется. В том случае, когда избыток энергии получается подстанциями с обратимыми агрегатами, трансформаторами, мотор-генераторами, одноякорными преобразователями, он передается через подстанции в линию передачи, где и используется соответствующими потребителями.

Затруднения с избыточной рекуперацией получаются тогда, когда дорога имеет свою собственную электрическую станцию, работающую исключительно на нужды дороги. Те же затруднения могут иметь место и при подстанциях, работающих на ртутных выпрямителях, так как последние без наличия специального, пока только еще входящего в практику устройства, не обладают свойством обратимости и могут только преобразовывать переменный ток в постоянный. В подобных случаях приходится принимать специальные меры защиты станций и подстанций от избыточной энергии. Общий принцип решения такой защиты базируется на приключении к их шинам особых балластных реостатов, включаемых через реле напряжения или

НБ УГУНТ (ДІІТ)

обратной мощности. Примером таких установок может служить дорога Busallo—Pontedecimo. Поезда этой линии возвращают в сеть до 30—35% от всей потребляемой энергии. Использовать дороге удается только около 15%. Остальную же энергию приходится поглощать в балластных реостатах станции.

Практически при рекуперативном торможении приходится считаться с ограничениями в отношении скорости движения рекуперирующих поездов. Помимо соблюдения общих правил по безопасности движения, скорости поездов при рекуперации ограничиваются условиями работы тяговых машин. Наибольшие осложнения здесь следует предвидеть в отношении машин постоянного тока. При работе с ними возникает необходимость при заданном токе рекуперации по мере увеличения скорости рекуперирующего поезда все сильнее и сильнее ослаблять у них магнитное поле. В главе о тяговых электродвигателях уже отмечалось, что чрезмерное ослабление поля машин, особенно работающих без компенсационных обмоток, может повлечь за собой, помимо недопустимого искрения, круговой огонь по коллектору. Ввиду этого рационально ток в обмотке возбуждения не ослаблять ниже 50% по сравнению с якорным. Это требование и является причиной ограничения скорости поезда при рекуперации. В машинах постоянного тока, работающих с компенсационными обмотками, а также в однофазных коллекторных двигателях, снабженных, как общее правило, такими обмотками, ограничение скорости при рекуперации зависит главным образом от явлений коммутации непосредственно под щеткой и нагрева машин. При асинхронных машинах это ограничение определяется пределом устойчивости работы машин, а также и температурой их нагрева.

Вопрос о рациональности применения рекуперации энергии следует решать для каждого конкретного случая экономическим подсчетом. Для этого необходимо подсчитать, с одной стороны, экономию в энергии и на колодки, а с другой стороны—удорожание подвижного состава и несколько более дорогой его ремонт. Следует помнить, что увеличение стоимости подвижного состава может зависеть не только от добавочного оборудования, но и от необходимости в некоторых случаях повышать мощность электровозов. Ориентировочно удорожание электровоза, вызываемое введением рекуперации, определяется в 5—15% от его полной стоимости.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ОТДЕЛ ПЯТЫЙ.

ОСОБЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ.

I. ОДНОФАЗНО-МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ ТЯГИ.

1. Американская система расщепленной фазы.

В основе данной системы лежит однофазный ток в контактном проводе с преобразованием его на электровозе в многофазный. В качестве преобразователя здесь принят асинхронный преобразователь. Простейшая схема такой системы приведена на рис. 301. Она построена на принципе преобразования однофазного тока в двухфазный. Тяговые двигатели здесь также двухфазные.

Как видно из приведенной схемы, преобразователь американской расщепленной фазы представляет собой однофазный короткозамкнутый асинхронный двигатель, имеющий на статоре, кроме основной первичной обмотки I, еще перпендикулярно к ней расположенную обмотку II. Такая машина в основе была уже рассмотрена в отделе рекуперации. Пренебрегая падением напряжения, диаграмму ее э.д.с. и напряжения можно изобразить, как показано на рис. 302. Напряжение сети или вторичной обмотки трансформатора U_I создает в обмотке преобразователя I намагничивающий ток, производящий поток Φ_I. Ротор преобразователя, перерезывая при вращении этот поток, получает э.д.с. вращения E_{q_1}, которая в роторе создает ток I_q и как следствие поток Φ_q. Последний индуктирует в обмотке II э. д. с. E_q, отстающую от него во времени на 90°. В результате действия э. д. с. E_q, полученной указанным способом, на зажимах вторичных фаз тяговых двигателей получается напряжение U_{II}. Как показывает построенная диаграмма, угол сдвига между первичным напряжением U_I и U_{II} получился равным 90°, что дает возможность пользоваться ими для питания двухфазной системы, как это и сделано на приведенной схеме. В данном случае напряжение сети U_I питает фазу 1 двигателей, а э. д. с. E_q — фазу 2. Основное и характерное преимущество американской системы заключается в преобразовании энергии только одной фазы. Фаза 1 тяговых двигателей питается непосредственно от сети, и только для фазы 2 энергия перерабатывается преобразователем, мощность которого благодаря этому должна равняться только половине общей мощности тяговых двигателей (Л. 165 и 167).

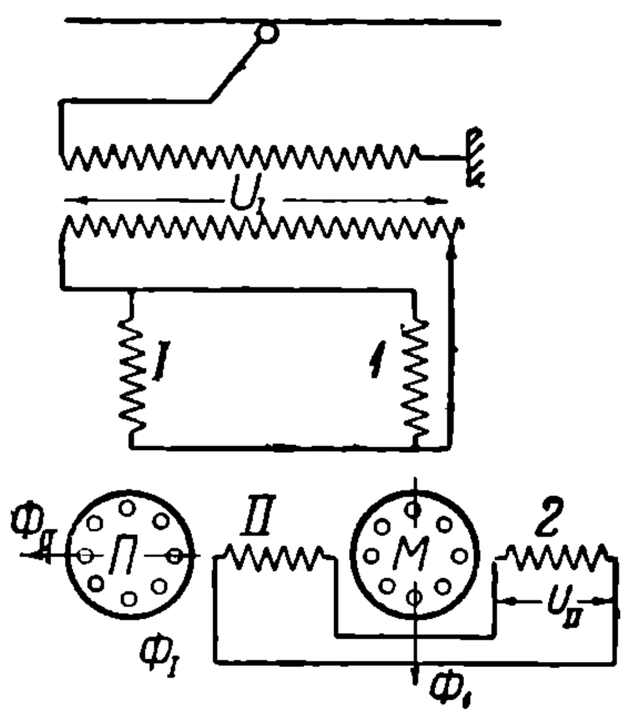


Рис. 301. Схема расщепленной фазы при двухфазных асинхронных тяговых двигателях.

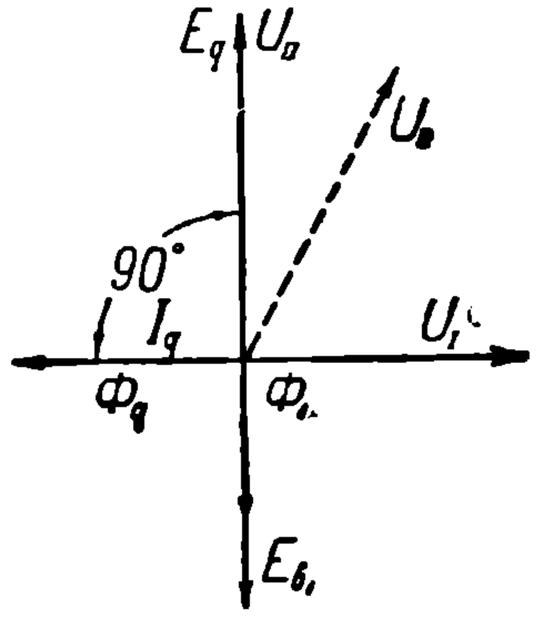


Рис. 302. Векторная диаграмма системы расщепленной фазы при двухфазных асинхронных двигателях.

Затруднения, которые приходится преодолевать при пользовании американской расщепленной фазой, вызываются нарушением картины диаграммы рис. 302 при нагрузках. Если учесть падение напряжения в обмотках преобразователя, то

НБ УДУНТ (ДІІТ)

фактически положение вектора U_{II} определяется пунктирной линией. Угол сдвига между U_I и U_{II} при таком условии значительно отличается от 90°. Система двухфазного тока получает вследствие этого искаженный вид. Несимметричность системы еще усугубляется сильным колебанием величины U_{II}. Если при какой-либо нагрузке добиться равенства U_I и U_{II}, то при других нагрузках это равенство соблюдаться не будет. В силу искажения системы сильно уменьшается вращающий момент тяговых двигателей. Так, например, по данным Alexanderson'a при пусковом режиме расщепленная фаза по сравнению с симметричными системами может гарантировать при одинаковой загрузке двигателей током только 40—50% от момента нормальной многофазной системы (Л. 165 и 167).

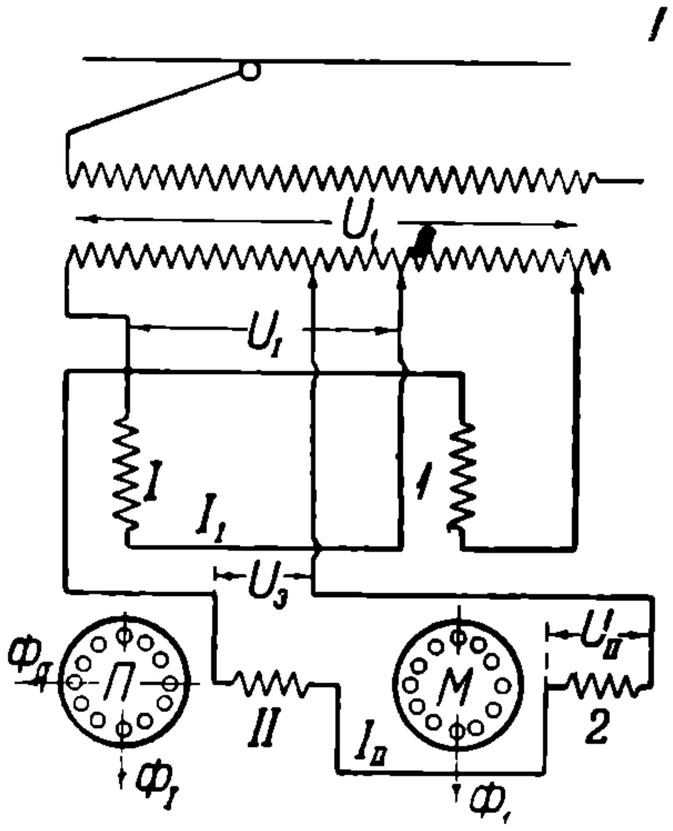


Рис. 303. Схема расщепленной фазы с регулирующим напряжением в отщепленной фазе.

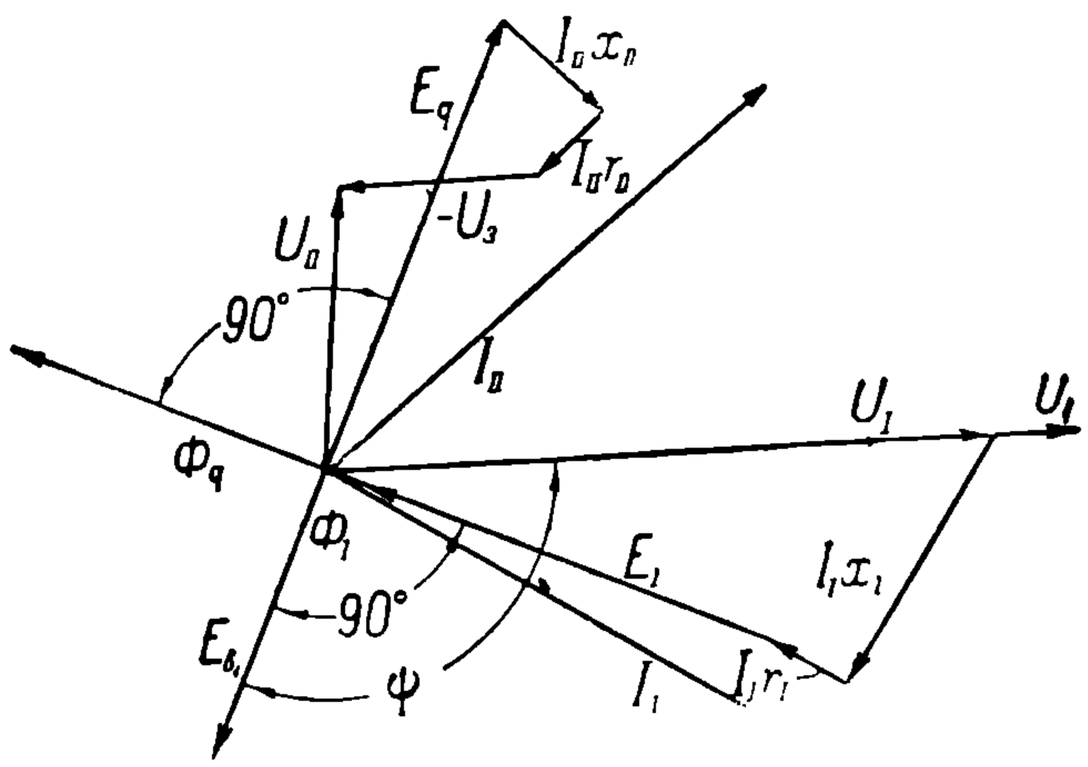


Рис. 304. Векторная диаграмма к схеме рис. 303.

Из методов, применяющихся наиболее часто для устранения или, по крайней мере, ослабления отмеченного недостатка, необходимо указать на введение системы добавочного напряжения U_3 в цепь вторичных фаз (рис. 303). Напряжение U_3 в отношении знака и величины подбирается таким образом, чтобы произвести сдвиг U_{II} в требуемом направлении. Диаграмма напряжений и э. д. с. с учетом падений напряжения в отдельных цепях рассматриваемой схемы изображена на рис. 304. В первичной цепи преобразователя напряжение сети U_I создает ток I_I и уравновешивается э. д. с. самоиндукции E_I и падениями напряжения $I_I r_I$ и $I_I x_I$:

$$\overline{U}_I = \overline{E}_I + \overline{I}_I r_I + \overline{I}_I x_I.$$

Намагничивающий ток, представляющий собою одну из составляющих общего первичного тока I_I, создает поток Φ_I. Э. д. с. вращения $E_{в1}$, образуемая этим потоком в роторе, производит ток I_q и уравновешивается э. д. с. самоиндукции и падением напряжения в роторной обмотке.

Поток Φ_q, создавая уже учтенную э. д. с. самоиндукции, в обмотке II статора образует э. д. с. взаимоиндукции E_q. Последняя, действуя в обмотках вторичных фаз системы, производит ток I_{II}, причем напряжение U_{II}, получаемое на зажимах второй фазы тяговых двигателей, определяется выражением:

$$\overline{U}_{II} = \overline{E}_q - \overline{I}_{II} z_{II} - \overline{U}_3,$$

где z_{II} означает полное сопротивление второй фазы преобразователя.

Как следует из диаграммы, путем подбора величины добавочного напряжения U_3 можно регулировать угол сдвига между U_I и U_{II} на величину, близкую к 90° Однако, данная схема непосредственно не устраняет второй причины несимметрии — сильного уменьшения величины E_q с увеличением нагрузки, вызываемого возрастанием

НБ УГУНТ (ДІІТ)

падения напряжения в обмотках преобразователя. С этим нужно бороться уже другими способами. В частности здесь можно варьировать величины напряжений U_1 и U_I. При увеличении нагрузки, когда E_q начинает падать, можно при данном U_1 увеличивать U_I. Путем соответствующего подбора U_I, значение E_q можно поддерживать приблизительно постоянным.

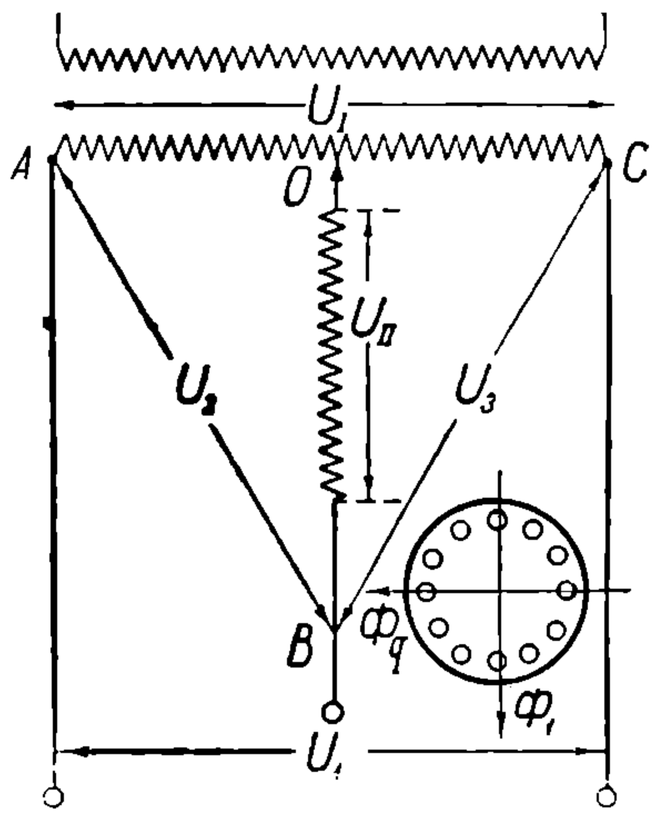


Рис. 305. Схема включения преобразователя расщепленной американской фазы при трехфазных асинхронных двигателях.

При практическом применении расщепленной фазы более рационально с точки зрения производства вместо двухфазных тяговых двигателей применять двигатели трехфазного тока. Для этого приходится пользоваться принципом Scott'a (рис. 305). Напряжения трехфазной цепи, питающей двигатели, составляются из напряжения трансформатора U_1 и напряжения U_{II} второй фазы преобразователя. Напряжения U_1 и U_{II}, образуя двухфазную систему, обращаются в трехфазную с напряжениями U_1, U_2 и U_3. По общему правилу Scott'a для получения симметричной трехфазной системы необходимо подчинить соотношение между напряжениями U_1 и U_{II} условию:

$$U_{II} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_1.$$

Нормально это условие выполняется соответствующим подбором витков второй фазы преобразователя.

Недостатком такой схемы является разобранное уже выше искажение системы при нагрузке. Одним из наиболее распространенных на практике способов борьбы с этим является смещение точки O из центра. Если при холостом ходе или при малых нагрузках падением напряжения пренебречь, диаграмма напряжений рассматриваемой системы принимает вид правильного треугольника ABC (рис. 306). При учете падения напряжений, особенно при больших нагрузках, как уже было выяснено, напряжение U_{II} смещается в сторону. При этом условии диаграмма напряжений

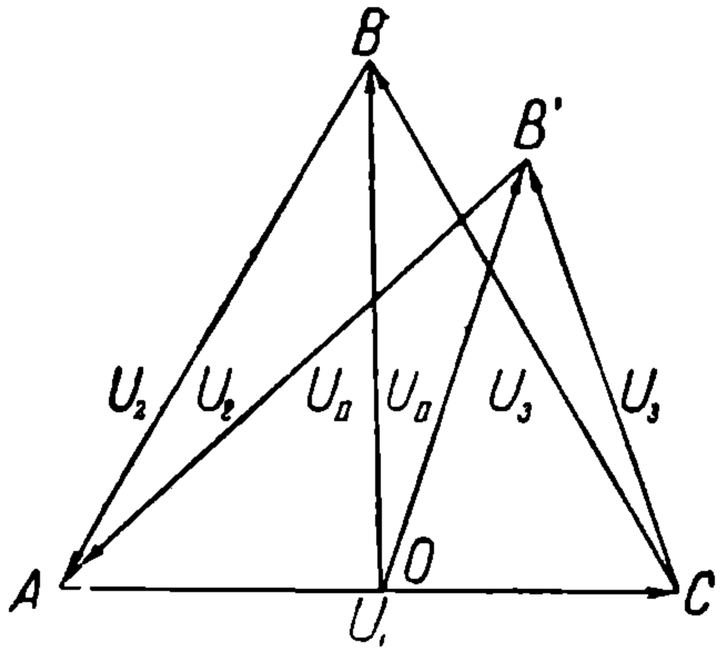


Рис. 306. Векторная диаграмма напряжений между отдельными фазами преобразователя-расщепителя.

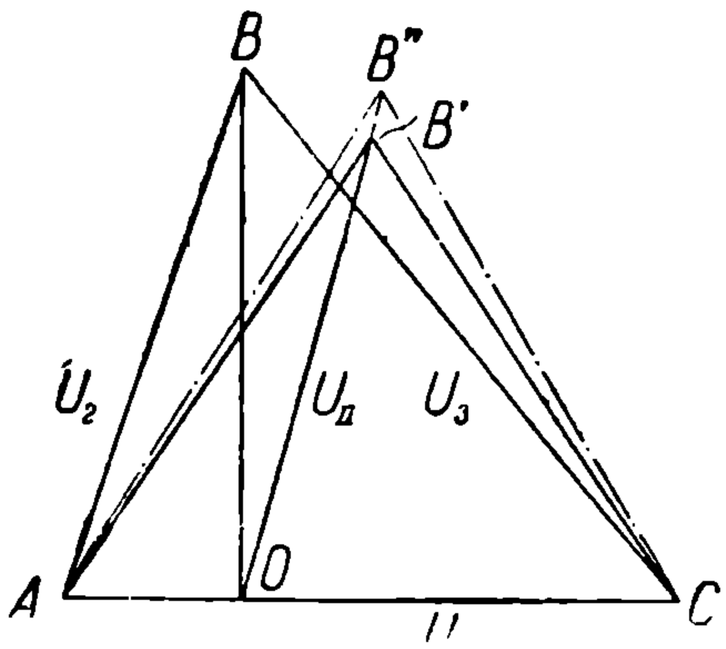


Рис. 307. Диаграмма линейных напряжений в преобразователе расщепленной фазы при применении компенсирующих соединений.

принимает вид наклонного треугольника $AB'C$. Путем соответствующего подбора положения точки O треугольник $AB'C$ можно достаточно приблизить к правильному, что улучшает симметрию системы. На рис. 307 сплошными линиями показано влияние такого сдвига точки O. Однако, такое регулирование обеспечивает симметрию только в очень узких пределах изменения нагрузки. Для расширения диапазона симметрии в американских электровозах, наряду со смещением точки O, применяется способ, позволяющий подводить к преобразователю и тяговым двигателям различные напряжения от сети (рис. 308). В этой схеме тяговые двигатели питаются от зажимов A, B и C, преобразователь же — от A и D. Число витков для

РБ УПУНТ (ДІІТ)

обеих фаз преобразователя W_I и W_{II} берется одинаковым, но напряжение U_I по отношению к U_1 подбирается таким образом, чтобы по возможности получить симметричную трехфазную систему не только при холостой работе, но и при нагрузке. Для этого при холостом ходе преобразователя напряжение U_I делают меньше U_1, а затем с увеличением нагрузки, передвигая зажимы D, его увеличивают. Повышение напряжения U_I с одновременным передвижением точки O дает возможность достигать хорошей симметрии. На рис. 307 показана пунктиром такая регулировка. Следует, однако, указать, что подобный метод не дает идеального решения вопроса в широком диапазоне нагрузок, тем не менее система настолько хорошо балансируется, что вполне пригодна для работы.

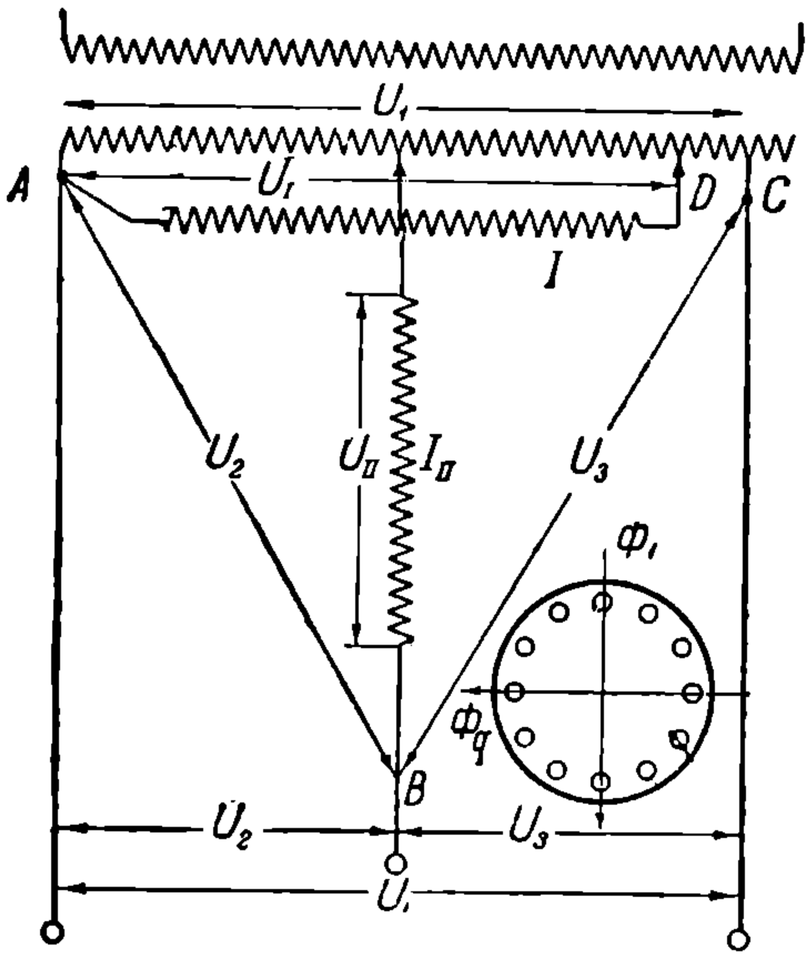


Рис. 308. Схема расщепленной фазы с компенсированием искажения напряжений.

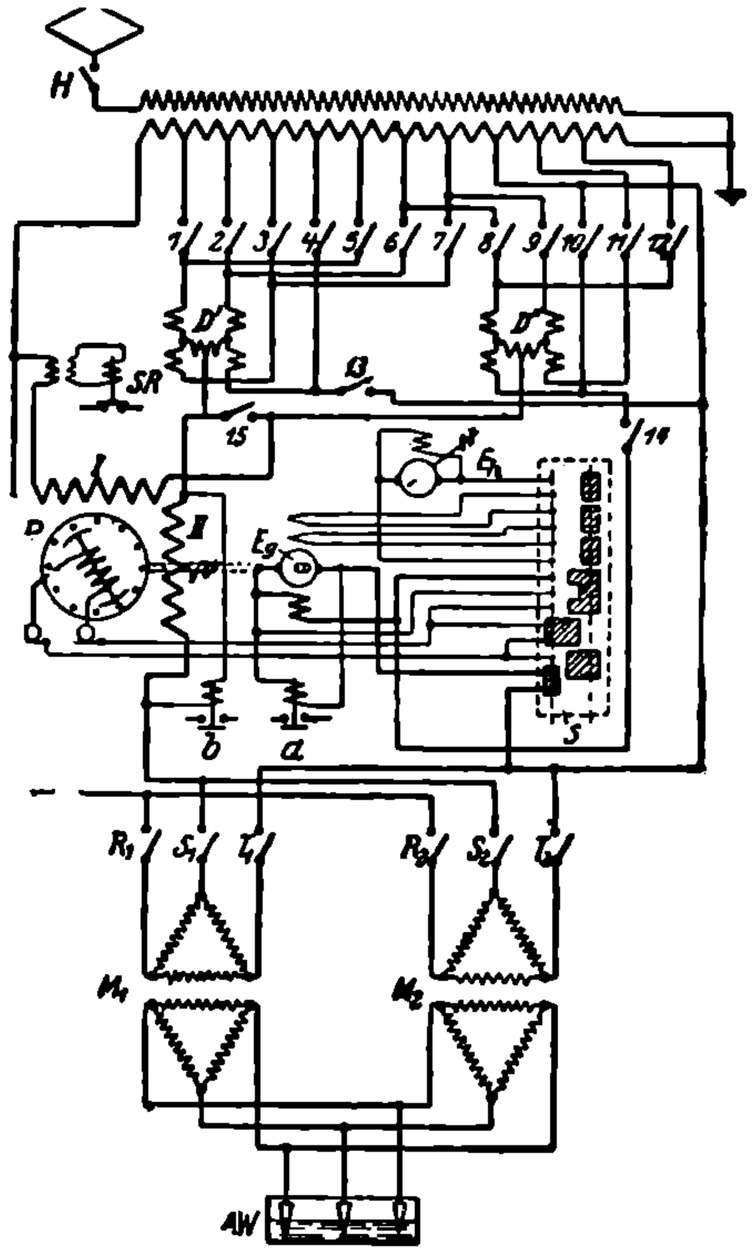


Рис. 309. Схема соединений электровоза Пенсильванских ж. д. при расщепленной фазе.

Примером применения системы американской расщепленной фазы может служить электровоз Пенсильванской железной дороги (рис. 309). Первая фаза преобразователя P питается здесь от зажимов трансформатора, начиная от начального и до 8—12, что дает возможность изменять напряжение U_I. Вторую фазу можно приключать к секциям 1—7, обеспечивая этим передвижение точки O в ту или другую сторону от центра. Для защиты секций трансформатора от коротких замыканий при переходе с одного положения на другое применены защитные катушки D' и D''.

Для улучшения коэфициента мощности электровоза ротор преобразователя, помимо короткозамкнутой обмотки, снабжен добавочной обмоткой, питаемой постоянным током от компаундной машины E_g. Получается синхронизированная асинхронная машина, позволяющая путем регулирования постоянного тока работать с $\cos\varphi \cong 1$, а в случае нужды и с упреждающими токами. Регулирование машины E_g совершается путем изменения тока в ее шунтовой обмотке возбуждения, питаемой от вспомогательного генератора E_h. Разгоняется асинхронный преобразователь с помощью той же машины E_g, сидящей на одном с ним валу. В период пуска преобразователя машина E_g работает в качестве последовательного однофазного двигателя при выключенной шунтовой обмотке (Л. 23).

Расщепленная фаза применена в Америке на дорогах Norfolk-Western и Virginia Ry. Имеется пробный электровоз с расщепленной фазой и на дороге Пенсильванской. Эти дороги работают на токе с частотой 25 Hz при напряжении в контактном проводе в 11 000 V. Следует иметь в виду, что американская расщепленная фаза вполне пригодна и для работы с 50—60 Hz, причем для этих частот стоимость электровоза должна быть даже ниже, чем для 25 Hz. Представление о весовых

РВ УЛУНТ (ДІТ)

соотношениях электровозов с расщепленной фазой может дать опытный локомотив Пенсильванской железной дороги (табл. 43).

ТАБЛИЦА 43.

Данные электровоза Пенсильванской железной дороги.

Мощность	$PS_h = 4\,800$	Вес катушек, защищающих от короткого замыкания секции трансформатора	2,5 t
Мощность .	$PS_\infty = 4\,000$	Вес реостатов с водой. .	5 t
Число двигателей . .	4	Вес аппаратов управления.	3 t
Вес их	32 t	Вес вентиляторов	2 × 1,5 t
Вес трансформатора .	12 t	Вес компрессоров	2 × 3 t
Вес преобразователя со вспомогательными машинами	25 t		

2. Однофазно-трехфазная система Kando.

Данная система основана на применении синхронного преобразователя конструкции Kando (рис. 310). Машина эта имеет одну общую возбудительную систему в виде двухполюсного ротора обычной синхронной машины. Статор же несет две обмотки: однофазную и трехфазную. Первая расположена на двух третях периферии и заложена в утопленных в железо впадинах. Вторая расположена во впадинах всей внутренней периферии. Оба ряда впадин соединены друг с другом узкими щелями, благодаря чему однофазная обмотка обладает большим рассеянием, естественно, вызывающим в ней сильное реактивное падение напряжения. Это дает возможность непосредственно приключать преобразователь к сети и не бояться коротких замыканий. Кроме того, подобная конструкция, как будет объяснено ниже, дает возможность поставить надлежащим образом регулировку работы тяговых двигателей.

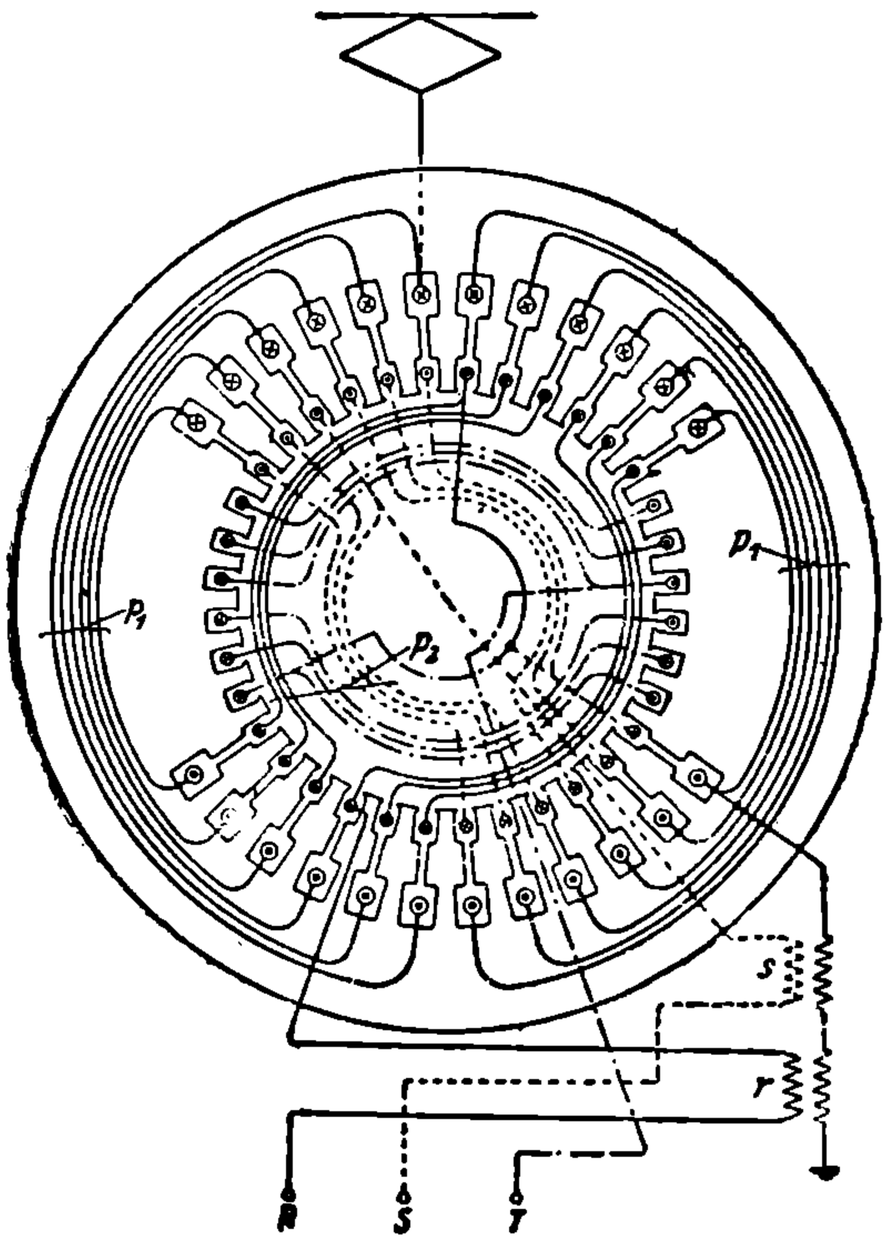


Рис. 310. Фазный преобразователь системы Kando.

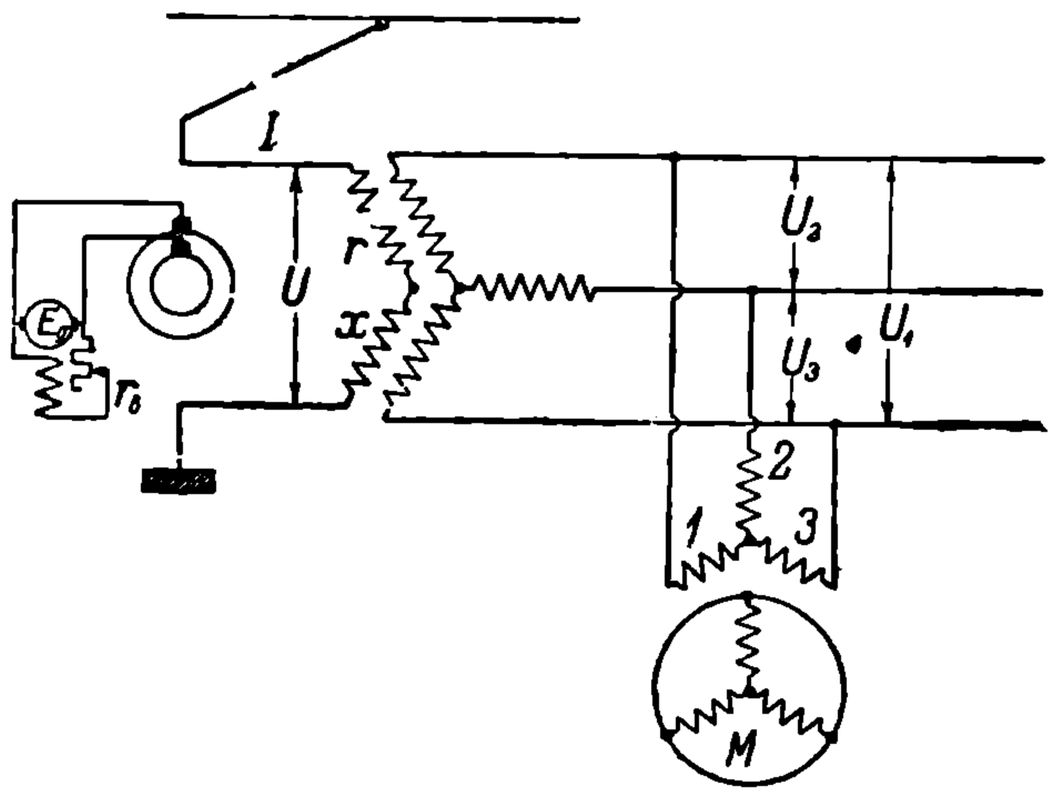


Рис. 311. Принципиальная схема соединений электровоза системы Kando.

Конструктивно преобразователь выполнен на напряжения в 16 000 V.

При принятом расположении однофазной и трехфазной обмоток отдельные фазы трехфазной системы находятся в различных условиях работы. В тех двух фазах, которые расположены под однофазной обмоткой, индуктируются потоками ее рассеяния добавочные э. д. с., которых не имеется в третьей фазе. Для ослабления получающейся при этом несимметрии введена добавочная электромагнитная связь между трехфазной и однофазной обмотками с помощью трансформаторов *r* и *s*. Постоянные трансформаторов и направление токов в них подбираются так, что индукти-

НБ УПУНТ (ДІТ)

руемые ими добавочные э. д. с. в обмотках трехфазной системы компенсируют э. д. с., происходящие от потоков рассеяния однофазной системы.

Общая схема системы Kando приведена на рис. 311. Сущность ее сводится к тому, что однофазной своей частью преобразователь работает в качестве синхронного двигателя, а трехфазной в качестве трехфазного генератора. Возбуждение трехфазный преобразователь получает от специального возбудителя $E_в$. Векторная диаграмма напряжения для первичной части преобразователя приведена на рис. 312. Напряжение сети U уравновешивается здесь э. д. с. синхронного двигателя $E_в$ активным падением напряжения Ir и реактивным Ix.

В результате вращения синхронного дви-

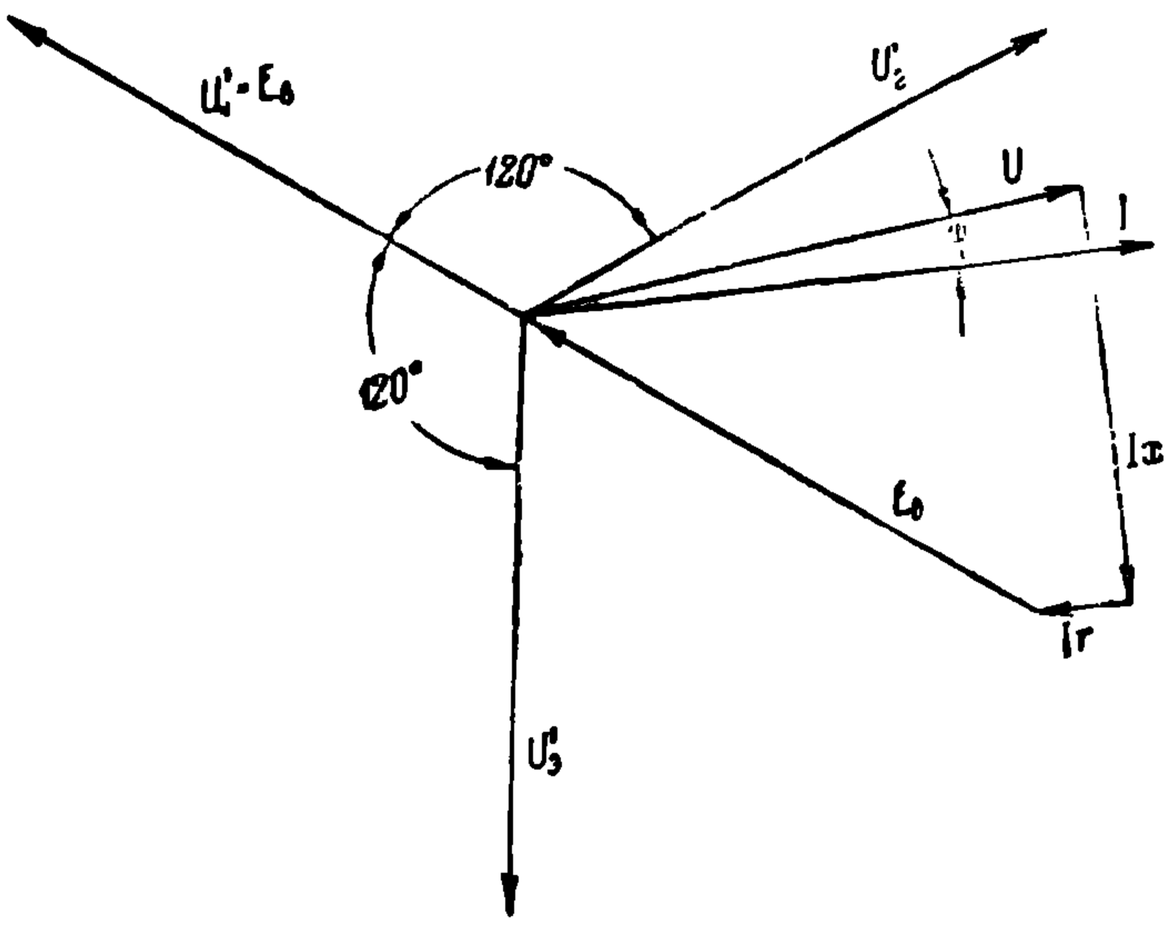


Рис. 312. Векторная диаграмма системы Kando.

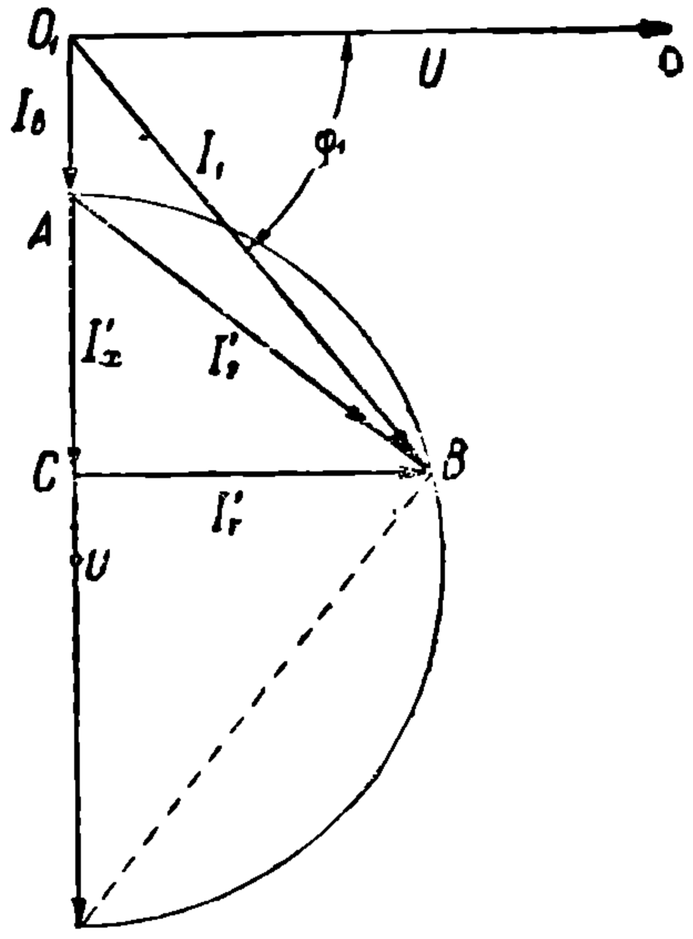


Рис. 313. Диаграмма для вывода основных законов регулирования η и cos φ в системе Kando.

гателя на зажимах трехфазной генераторной обмотки получаются напряжения U_1, U_2 и U_3, которые и подводятся к тяговым двигателям. Влияние потоков рассеяния однофазной обмотки на трехфазную и компенсирующее действие трансформаторов r и s в приведенной схеме не учтены, как имеющие второстепенное значение.

При выполнении своей схемы электровоза Kando задался целью применить наиболее рациональные методы регулирования работы тяговых двигателей. Была поставлена задача получить как можно более высокие к. д. п. двигателей и cos φ сети в широких пределах нагрузки. Теоретическое обоснование такой регулировки, вводя фазное выражение величин, можно вывести из упрощенной круговой диаграммы асинхронных многофазных машин (рис. 313). В данной диаграмме предполагается, что намагничивающий ток и э. д. с. асинхронных двигателей E_1 остаются величинами, не зависящими от нагрузки. При последующих выкладках прежде всего необходимо иметь в виду основное соотношение первичных и вторичных токов асинхронной машины:

$$\overline{I}_1 = \overline{I}_в + \overline{I}_2'.$$

Если сопоставить диаграмму рис. 313 и написанное равенство, то, очевидно, отрезки AB будут изображать приведенные вторичные токи машины.

При установлении наивыгоднейшего режима асинхронного двигателя в отношении к. п. д. нужно исходить из условия наименьших потерь. Приближенно изобразить их можно в виде:

$$P_п = a + bE^2_1 + m_1 I^2_1 r_1 + m_2 I^2_2 r_2. \qquad (219)$$

Первый член изображает потери механические, второй — потери в железе, принимаемые при $b = \text{const}$ пропорциональными квадрату потока или, как это сделано здесь, квадрату E_1, третий член дает потери в меди первичной обмотки, а последний—потери в меди обмотки ротора. Из диаграммы можно написать следующие соотношения:

$$I_1^2 = I_r'^2 + (I_в + I_x')^2;$$
$$I_2'^2 = I_r'^2 + I_x'^2.$$

НВ УДУНТ (ДІІТ)

При обозначении мощности двигателя через P в приведенных равенствах можно произвести следующую замену членов. Активная составляющая тока I'_r может быть выражена через мощность:

$$I'_r \cong \frac{P}{mE_1}.$$

Намагничивающий ток $I_в$ может быть принят пропорциональным E_1:

$$I_в \cong ME_1.$$

Из геометрических соотношений получается:

$$I'^2_r = I'_x (I'_{2max} - I'_x) \cong I'_x I'_{2max}. \quad (220)$$

При сделанных допущениях ток I'_{2max}, соответствующий диаметру окружности и представляющий собой чистый реактивный ток, определяется производящей его э. д. с. ротора E'_2 или равной ей E_1:

$$I'_{2max} = \frac{E_1}{x'_2},$$

где x'_2 — реактивные сопротивления ротора. Подставив эти выражения в формулу (219) и сделав приведение подобных членов, можно написать основное выражение общих потерь асинхронной машины в виде:

$$P_п = a + bE^2_1 + k_1 \frac{P^2}{E^2_1} + k_2 \frac{P^4}{E^6_1}. \quad (221)$$

Условие наименьших потерь в зависимости от E_1 по общему правилу нахождения минимума определится выражением:

$$\frac{dP_п}{dE_1} = 0.$$

Решение данного уравнения дает зависимость:

$$\frac{P}{E_1^2} = \sqrt{\frac{-b \pm \sqrt{k^2_1 + 12bk_2}}{bk_2}} = \text{const}. \quad (222)$$

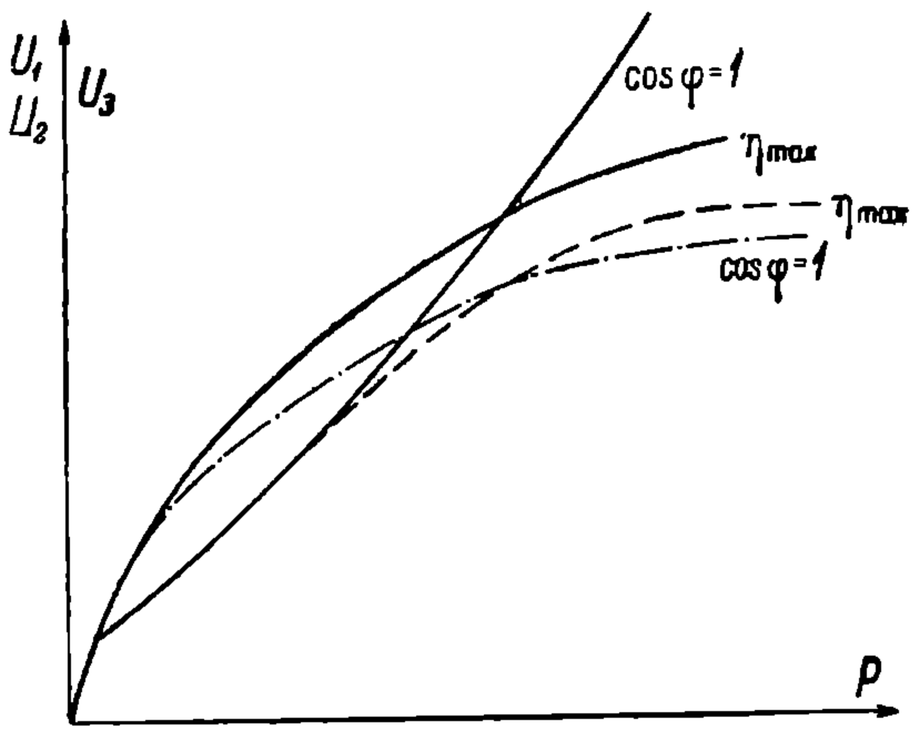


Рис. 314. Кривые регулировки η и $\cos\varphi$ в системе Kando.

Заменив E_1 близкой к ней при нормальных режимах величиной напряжения U_1 и введя вместо выражения с радикалами коэфициент k, можно представить основное условие наименьших потерь асинхронной машины в виде:

$$U^2_1 = \frac{1}{k} P. \quad (223)$$

Полученное выражение говорит, что для достижения наивысшего к. п. д. при каждой данной мощности двигателей напряжение, подводимое к ним, должно меняться прямо пропорционально корню квадратному из этой мощности. Таким образом, при поставленном условии, зависимость между U_1 и P подчинена закону параболы.

Вторая задача регулирования системы заключается в получении коэфициента мощности сети, равным единице. Для $\cos\varphi = 1$, при пренебрежении активными падениями напряжения и обозначении подводимой мощности к преобразователю через P_1 диаграмма (312) дает соотношение:

$$E^2_в = U^2 + (Ix)^2 \cong U^2 + \left(\frac{P_1}{U} x\right)^2. \quad (224)$$

Ввиду того, что мощность P_1, потребляемая преобразователем, близка к мощности тяговых двигателей P и э. д. с. $E_в$ преобразователя может быть принята равной напряжению у тяговых двигателей U'_1, уравнение (224) можно переписать в форме:

$$U'^2_1 = U^2 + \frac{x^2}{U^2} P^2. \quad (225)$$

Отсюда при постоянных U и x зависимость между U'_1 и P подчиняется закону гиперболы, тогда как при регулировании процесса на наибольший к. п. д. эти переменные должны быть подчинены закону параболы. На рис. 314 нанесены те и другие кривые, причем их нужно себе представлять без пунктира при слабом насыщении и с пунктиром при сильном. Кривые показывают, что при сильных насыщениях регулирование на какой-либо один процесс в довольно широком диапазоне

НБ УДУНТ (ДІІТ)

изменения мощностей действует благоприятно и на другой. На практике в основу регулирования кладется достижение $\cos\varphi = 1$, так как в первую очередь особенно важно ставить в благоприятные условия работу рабочей сети. Но, как только что выяснено, такая регулировка при надлежащих насыщениях обеспечивает и достаточно высокий к. п. д.

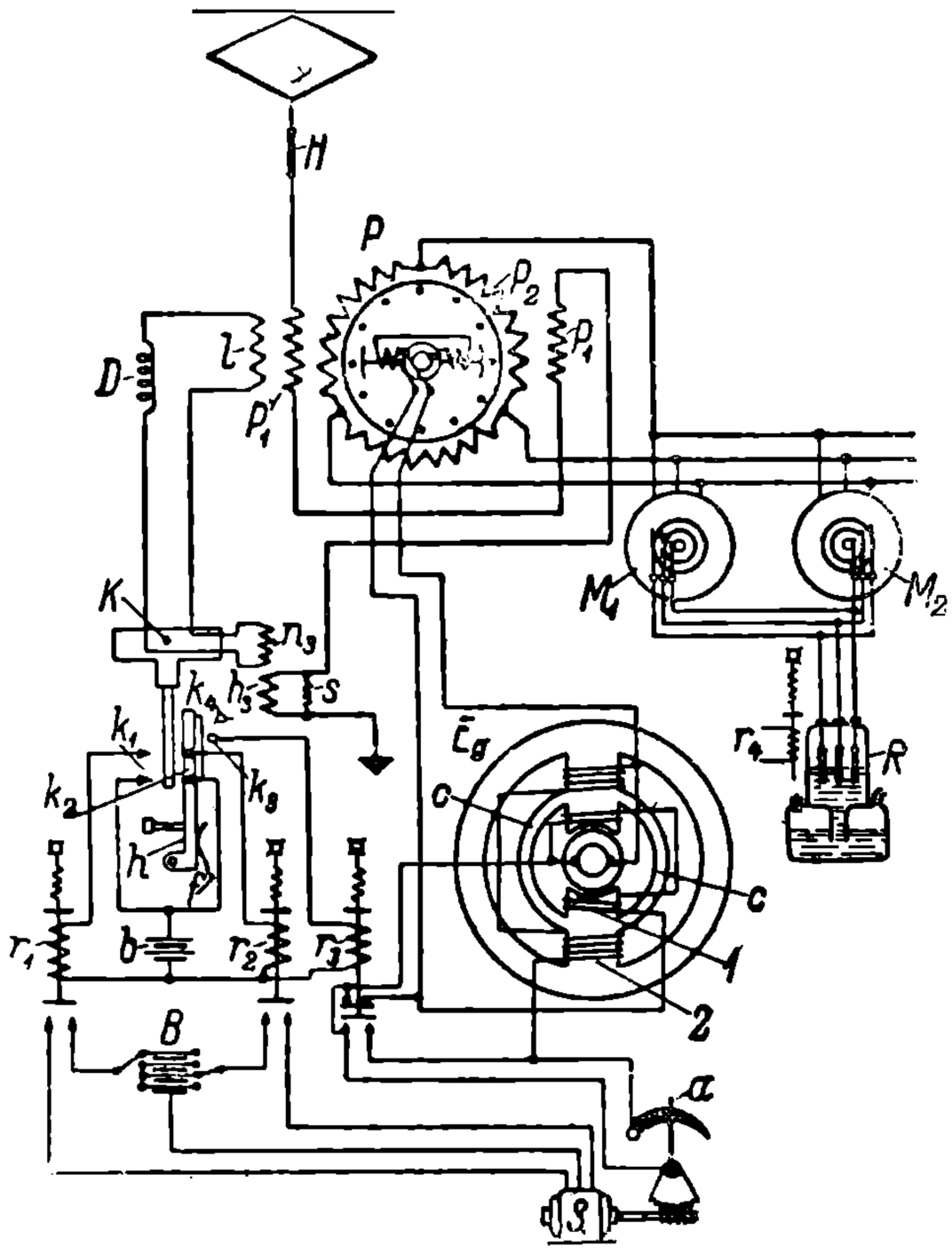


Рис. 315. Схема соединений электровоза системы Kando.

Наиболее важные свойства системы Kando таковы. Прежде всего характерен процесс короткого замыкания, для которого ток, согласно диаграмме (312), определяется величиной:

$$I_к = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}}. \qquad (226)$$

Ввиду очень большого значения x, благодаря сильному рассеянию однофазной обмотки, ток короткого замыкания получается небольшим. Он даже может иметь меньшее значение, чем при нагрузке. Для построенного электровоза:

$$I_к = 0{,}8 I_{норм.}.$$

Это обстоятельство указывает на то, что преобразователь Kando не боится коротких замыканий, а следовательно, и последствий выпадения из синхронизма. Второе важное свойство данного преобразователя — в том, что понижение напряжения в линии, тяжело отзывающееся на работе нормальных асинхронных двигателей из-за сильного падения тягового момента, здесь не представляет опасности. Действительно, при понижении U для поддержания прежней мощности P происходит увеличение тока I, что увеличивает величину Ix. С уменьшением же U и возрастанием Ix, как это видно из диаграммы, в широких пределах работы преобразователя имеет место не понижение, а даже повышение $E_в$, а следовательно, и U_1, U_2 и U_3, от которых зависит тяговой момент.

Недостаток преобразователя Kando — относительно низкий предел устойчивости его работы. Наличие большого реактивного сопротивления резко снижает способность его к перегрузкам. Подвод высокого напряжения к статору сильно осложняет конструкцию преобразователя, заставляя применять такие устройства, как погружение обмоток статора в масло.

Общая схема управления по системе Kando приведена на рис. 315. Наиболее важной частью этой схемы является возбудитель $E_в$. Он представляет собою специальную двухполюсную машину с компаундным включением шунтовой обмотки 2 и последовательной 1. При нормальных условиях работы включена только одна шунтовая обмотка 2. Регулируется она с помощью сервомотора S и реостата a, сопротивление которого меняется таким образом, чтобы $E_в$ менялось согласно условию получения $\cos\varphi = 1$. Приведение в движение сервомотора S производится через фазометрическое реле K.

Это реле управляется двумя катушками n_3 и h_3. Первая из них питается от обмотки l, заложенной в статоре преобразователя и трансформаторно связанной с однофазной его обмоткой. Вторая катушка питается главным током, Работа всей системы с помощью включения добавочной катушки самоиндукции D и шунта s так регулируется, что в те периоды, когда в главной цепи $\cos\varphi = 1$, угол сдвига токов в катушках n_3 и h_3 получается равным 90°. В эти периоды подвижной рычаг реле K находится в центральном положении.

ЧВ УДУНТ (ДІІТ)

Если же система начинает работать упреждающими или отстающими токами то этот рычаг отклоняется влево или вправо, перекрывая контакты k_1 или k_2. Замыкание контактов k_1 и k_2 вызывает включение реле r_1 и r_2 и, как следствие, передвижение сервомотора, получающего питание от батареи B. Движение сервомотора продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто условие $\cos\varphi = 1$, так как после этого рычаг K займет свое центральное положение.

При резких колебаниях нагрузки наличие одной только шунтовой обмотки оказывается недостаточным. В этом случае рычаг K, подвергаясь более сильному действию обмоток реле, перекрывает через якорек h и зажим k_3, включающий через

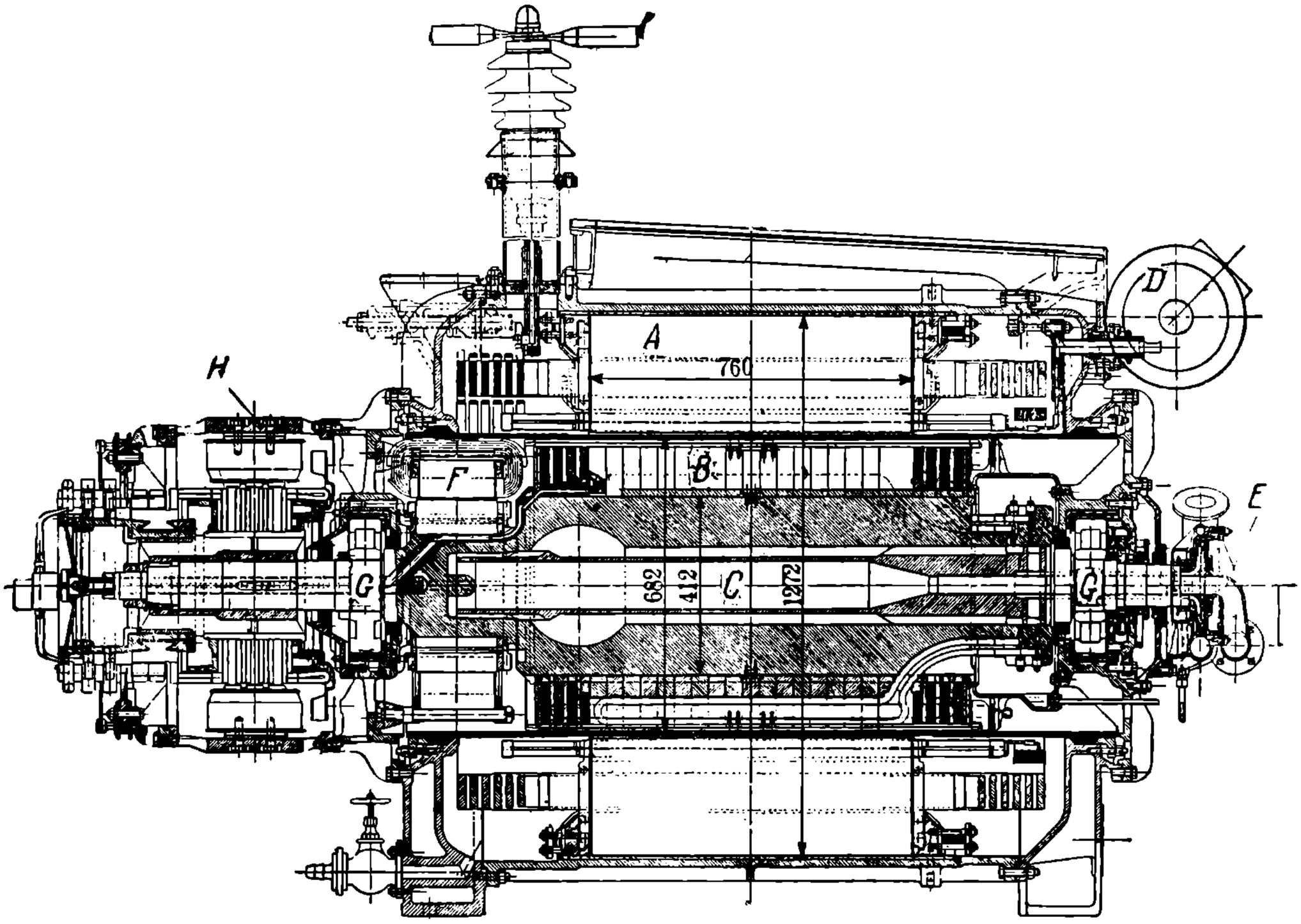


Рис. 316. Преобразователь фаз Kando венгерских ж. д.

Обозначения.
A—статор, *B*—ротор, *C*—вал с отверстиями для воды, *D*—насос для прогонки масла, *F*—насос для прогонки воды, *F*—пусковой двигатель, *G*—роликовые подшипники, *H*—возбудитель.

реле r_3 последовательную обмотку 1. При действии только одной обмотки 2 поток возбудителя разветвляется на два пути. Часть его идет по главному рабочему направлению через междужелезное пространство, а часть идет по мостику $c—c$. При включении же последовательной обмотки этот поток вытесняется ее действием из мостика $c—c$, и общий поток, проходящий через междужелезное пространство, возрастает как за счет потока $c—c$, так и за счет потока, создаваемого последовательной обмоткой. Такая система увеличения рабочего потока обеспечивает гораздо большую скорость его нарастания, чем при работе сервомотора. В случаях особенно резкого возрастания реактивных токов рычаг K перекрывает еще контакт k_4, включающий через реле r_4 сопротивления в цепь роторов тяговых двигателей. Это дает возможность преобразователю более безболезненно вынести регулировку и не выпасть из синхронизма. Разгоняется преобразователь Kando с помощью возбудителя, сидящего на одном с ним валу и работающего, как двигатель, от аккумуляторов.

Основное преимущество системы Kando заключается в возможности работать на промышленной частоте при высоких напряжениях в контактном проводе Недостаток ее — в сложности механизмов и общей системы управления. Следует также

ГБ УПУНТ (ДІІТ)

иметь в виду, что, несмотря на мероприятия по увеличению к. п. д. двигателей общий коэфициент полезного действия электровозов Kando должен сильно снижаться из-за преобразователя, представляющего собой машину со значительными потерями. Система Kando разрабатывается в Венгрии. В настоящее время там работает уже одна дорога по указанной системе (Л. 175 и 176).

Очень интересны последние типы преобразователей Kando, развившиеся из первых опытных. На рис. 316 приведена схема такого преобразователя. Однофазная обмотка уложена в пазах при числе их равном 48. Трехфазная обмотка уложена в 72 пазах. Она представляет собою замкнутую обмотку с выводами для двух, трех и шести фаз. Ротор представляет собой систему с очень сильно развитой медной частью. Прежде всего он имеет мощную основную обмотку возбуждения, расположенную в 34 пазах. Обмотке этой приходится проводить поток через междужелезное пространство, достигающее здесь очень большой величины — 21 mm. Кроме основной обмотки, ротор имеет очень мощную демпферную обмотку, состоящую из двух частей и покрывающую всю внешнюю поверхность как бы сплошной броней. Назначение этой обмотки — гасить обратное синхронное поле однофазной системы, благодаря чему трехфазная вторичная обмотка пронизывается только основным вращающимся синхронно полем.

Благодаря исключительно сильно развитой медной части ротор имеет линейную нагрузку *AS*, доходящую до 1 900 AN/cm при среднем значении 950 AN/cm. При таком условии пришлось применить для ротора охлаждение с помощью воды, циркулирующей по каналам. Вода прогоняется с помощью небольших насосов. Статор машины охлаждается маслом, циркулирующим по междужелезному пространству и по каналам. Для осуществления такого охлаждения статор закрыт бакелитовым кожухом. Масло охлаждается с помощью вентиляторов.

Следует отметить, что, кроме главных обмоток, на статоре еще имеются не показанные на рисунке две небольшие вспомогательные обмотки на пониженное напряжение, служащие для питания вспомогательных механизмов. Разгоняется преобразователь в данной системе специальным короткозамкнутым асинхронным двигателем с искусственной фазой.

3. Система Krupp'a.

В данной системе, разработанной Punga и Schön'ом, преобразователь фаз и тяговой двигатель объединены в одной машине. Последняя представляет собой в основном асинхронную машину с однофазным статором и трехфазным ротором, между которыми помещается вспомогательный ротор, вращающийся независимо от рабочего ротора (рис. 317). Сначала пускается в ход, с помощью вспомогательной фазы на статоре, промежуточный ротор. При вращении его, как и у всякого однофазного двигателя, получается поперечное поле, о котором уже говорилось в предыдущих главах и которое обозначалось через Φ_q. При скоростях вспомогательного ротора, близких к синхронной, поток Φ_q совместно с основным первичным потоком статора образует вращающееся поле, приближающееся к круговому, которое и служит для приведения в движение основного ротора, сцепленого с ведущими осями.

Для улучшения процесса работы системы Krupp'a промежуточный ротор, помимо короткозамкнутой обмотки, имеет еще обмотку, питаемую постоянным током от специального возбудителя. Назначение ее, как и в предыдущих системах, придать машине в части вспомогательного ротора синхронизированный тип и этим регулировать $\cos\varphi$ системы. Промежуточный ротор (рис. 318) представляет собою относительно сложную систему. Впадины *b* у него предназначаются для помещения обмотки постоянного тока. Впадины *c* служат для укрепляющих систему стержней. Отверстия *d* сделаны для короткозамкнутых стержней и совместно с *e* для достижения радиального направления основного потока, так как при двух междужелезных пространствах он имеет тенденцию занять в железе промежуточного ротора поперечное положение. Промежуточный ротор представляет собою в механическом отношении слабую систему. Из-за больших прорезов в железе необходимо придать ротору достаточную жесткость и прочность. Главную роль в этом отношении играют уже упоминавшиеся массивные стержни *c*, а также и стержни короткозамкнутой обмотки. При работе последняя исполняет функции пусковой. После того, как промежуточный ротор при разгоне приобрел скорость, близкую к синхронной, вклю-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

чается обмотка постоянного тока, и ротор входит в синхронизм. В дальнейшем главная рабочая роль переходит к обмотке постоянного тока. Она одновременно исполняет функции вторичной обмотки асинхронной машины. Якорь возбудителя, пропускающий через себя, наряду с постоянным током, и токи переменные, выполняется с малым реактивным и активным сопротивлениями и потому не вносит большого искажения в работу трехфазной обмотки асинхронной части промежуточного ротора.

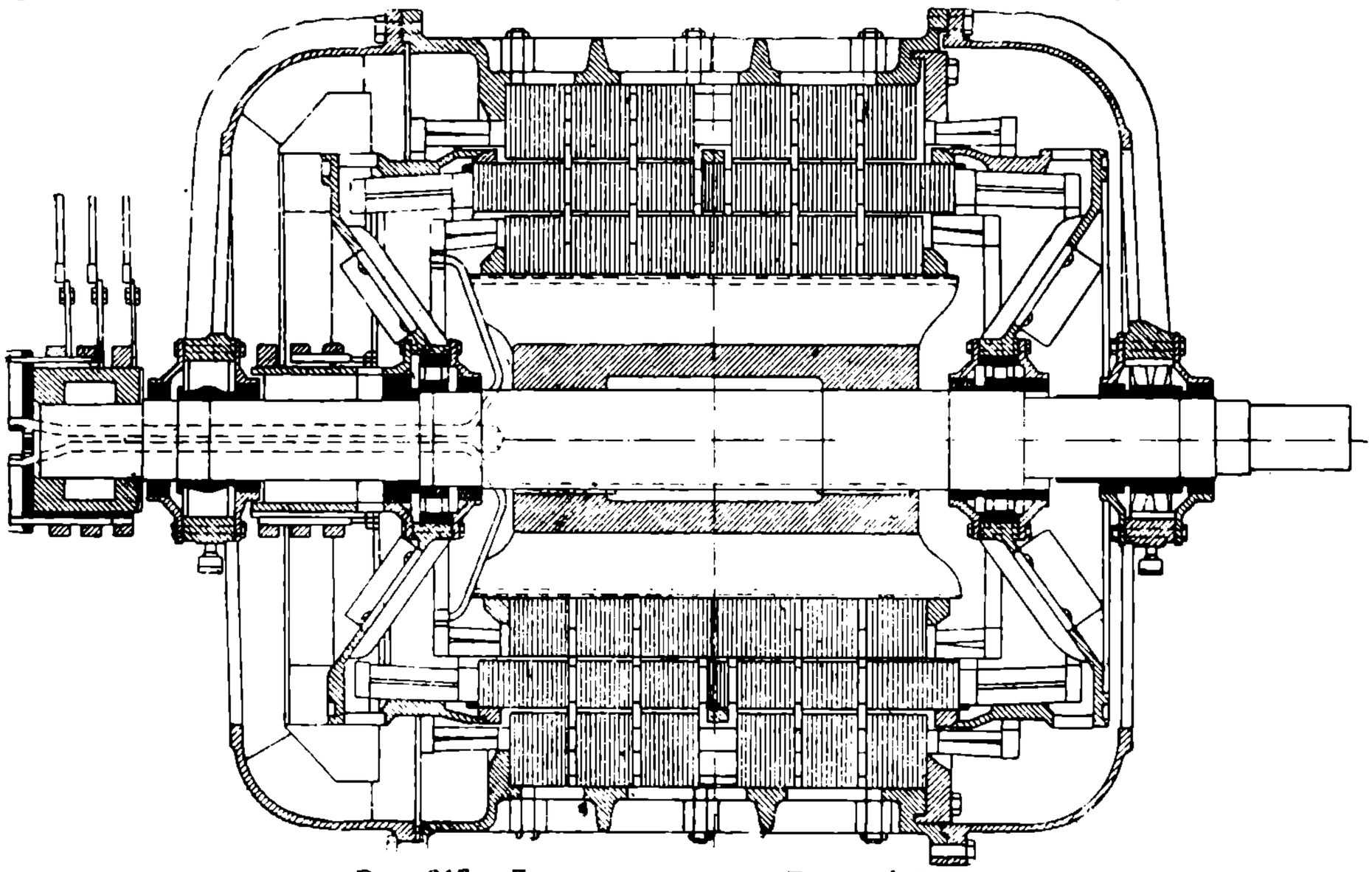


Рис. 317. Двигатель системы Punga-Schön'a.

Реверсивность в двигателе может осуществляться двумя способами. Можно это делать путем изменения направления вращения промежуточного ротора. Сначала его остановить, а затем, переключив направления тока во вспомогательной фазе, пустить его в обратном направлении. Способ этот неудобен потому что для остановки ротора и нового его пуска требуется значительное время.

Второй способ реверсивности основывается на свойстве многофазных асинхронных двигателей менять направление вращения при переносе питания со статора на ротор, при условии, что чередование фаз подводимой сети остается неизменным, или, другими словами, остается неизменным направление движения вращающегося поля. При такой работе скорость вращающегося поля относительно ротора будет оставаться постоянной. По отношению же к междужелезному пространству, а следовательно, к статору относительная скорость

поля будет уменьшаться по мере увеличения скорости ротора. При идеальной его синхронной скорости, вращающееся поле в междужелезном пространстве остановилось бы, а следовательно, остановился бы в системе Krupp'a и промежуточный ротор. При скольжении же последний будет вращаться со скоростью, соответствующей этому скольжению. При уменьшении скорости рабочего ротора промежуточный ротор будет ускоряться. Когда рабочий ротор остановится, промежуточный достигнет снова синхронной скорости.

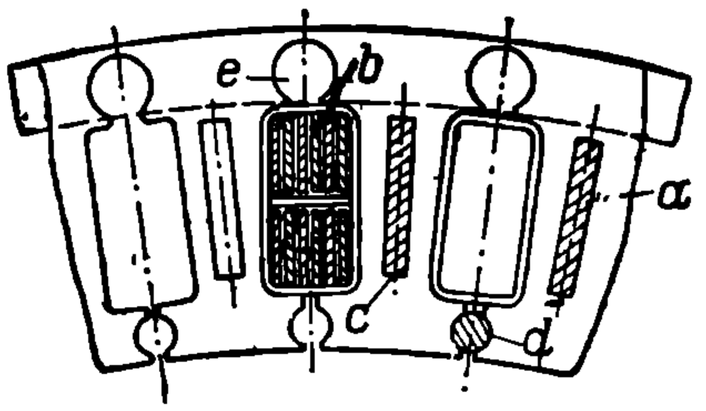


Рис. 318. Промежуточный ротор двигателя Punga-Schön'a.

Представление о тяговых свойствах двигателя Krupp'a дают приведенные на рис. 319 характеристики его. Мощность этого двигателя — около 165 kW, число оборотов — 750 в минуту, напряжение на статоре — 1 800 V и частота — 50 Hz. Кривые построены в функции от полезной мощности двигателя. Кривая *N* характеризует *KVA*, под-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

водимые к машине, кривая J — первичный ток, кривая s — скольжение, η — полный к. п. д. всей системы и I_3 — постоянный ток для вспомогательного ротора. Система Krupp'a допускает применение принципа регулирования скоростей с помощью каскадного включения и изменения числа полюсов. При ней естественно осуществима и рекуперация энергии. Достоинство системы Krupp'a — возможность работать на промышленных, частотах с высоким $\cos\varphi$. Недочеты ее — в осложненной конструкции машин и относительно невысоком коэфициенте полезного действия. Применена она пока на промышленных электровозах с напряжением в контактном проводе до 3000 V.

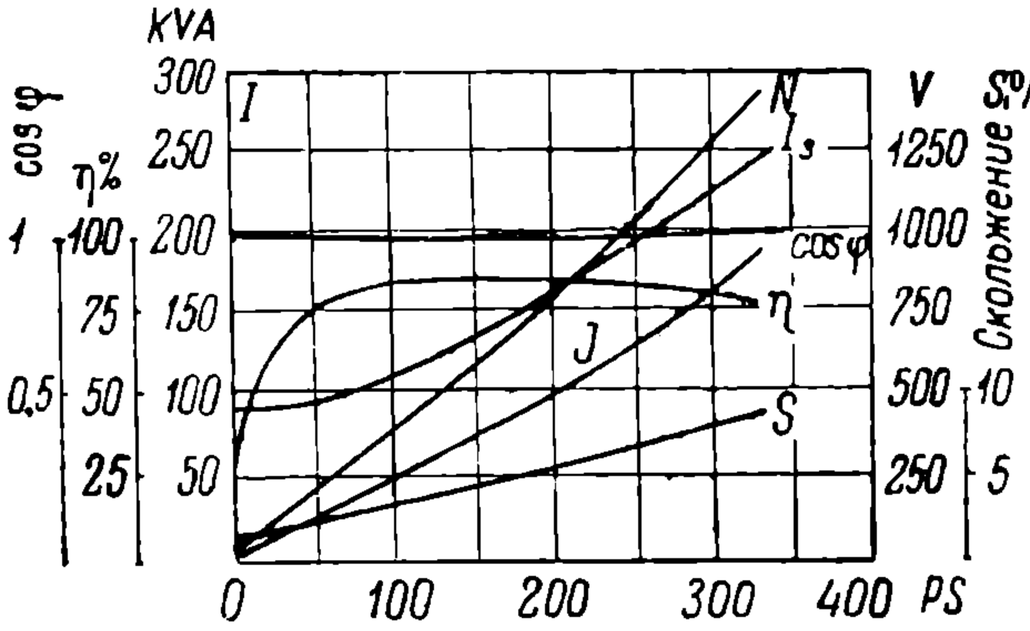


Рис. 319. Характеристики двигателя Punga-Schön a мощностью 165 kW.

В последнее время поднят вопрос о применении системы Krupp'a и для магистральной тяги. Имеется уже разработанный тип такого электровоза. В новых вариантах имеется тенденция пользоваться рассмотренной машиной не только как двигателем, но и как расщепителем фаз, для питания от него второго, нормального трехфазного двигателя. При таких условиях получается агрегат, состоящий из двухроторного двигателя и двигателя обычного.

На рис. 320 показана схема включения такой системы. Статор в данном случае имеет трехфазную обмотку. Напряжение от сети подводится к фазам *I* и *II*. Обмотка *III* служит для образования трехфазной системы. Э. д. с., индуктируемая в ней вращающимся полем, образуемым по вышеуказанному способу с помощью промежуточного ротора, совместно с напряжением сети составляет трехфазную систему, от которой и питается второй двигатель. Нетрудно видеть, что по идее расщепление фаз здесь близко к американскому методу (Л. 177).

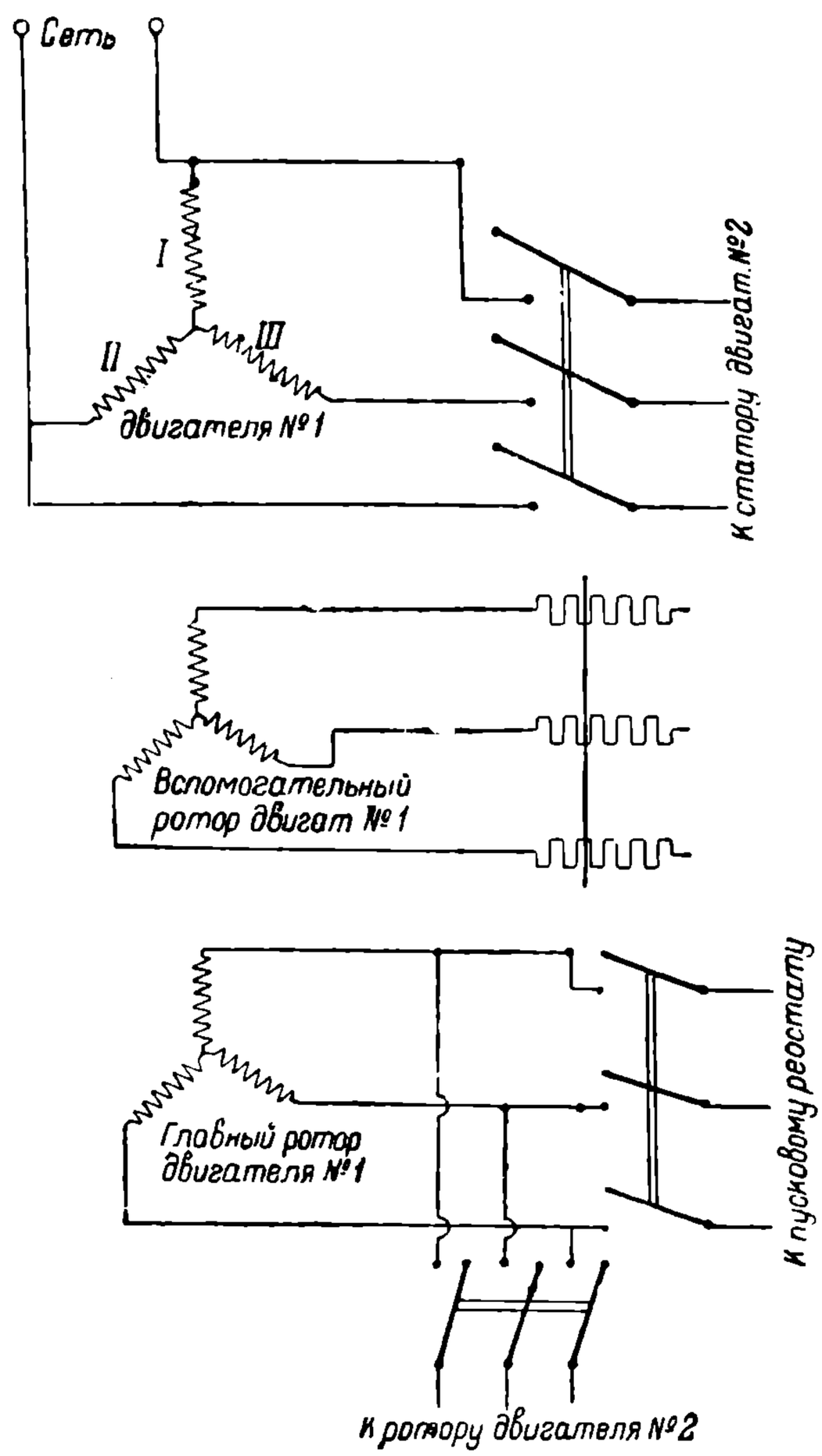


Рис. 320. Схема использования машины Punga-Shön'a как двигателя и как фазного преобразователя.

II. СИСТЕМЫ ТЯГИ ОДНОФАЗНО-ПОСТОЯННОГО ТОКА.

1. Электровозы с мотор-генераторами и ртутными выпрямителями.

Назначение данной системы — сочетать преимущества высокого напряжения в контактном проводе и тяговых двигателей постоянного тока. Теоретически преобразование однофазного тока в постоянный может быть выполнено различными способами. Могут быть применены мотор-генераторы, одноякорные преобразователи, каскадные преобразователи и ртутные выпрямители. Предлагались также двухступенчатые системы, в которых одно-

НТБ УИИНТ (ДІІТ)

фазный ток сначала должен преобразовываться в многофазный, а затем перерабатываться в постоянный многофазными преобразователями, в большинстве случаев стоящими по своим техническим качествам значительно выше однофазных. Однако, из всех приведенных схем на практике пока применяются, главным образом, электровозы с синхронными преобразователями.

Примером таких типов могут служить электровозы, примененные Ford'ом на принаплежащей ему дороге Detroit, Toledo & Ironton. Схема электровозов Ford'a, разработанная американской фирмой Вестингауз, приведена на рис. 321. В основе ее лежит синхронный мотор-генератор, состоящий из синхронного двигателя U, основной динамомашины постоянного тока G и двух вспомогательных динамо E_g и E_h, сидящих на одном валу. Энергия к электровозу подается в виде однофазного тока при напряжении 22000 V, которое в электровозе понижается до 1250 V. Тяговые двигатели электровозов представляют собой последовательные машины. Но в данной системе достойно внимания то, что они работают не только при последовательном соединении своих обмоток, но и как шунтовые, при независимом питании обмоток возбуждения. При тяге до скоростей порядка 27,5 km/h двигатели нормально работают, как последовательные, а затем переключаются на независимое возбуждение, облегчающее получение большого количества ходовых скоростей. При рекуперации энергии тяговые машины работают с независимым возбуждением по разобранной выше системе Вестингауза со стабилизирующим реостатом (Л. 220).

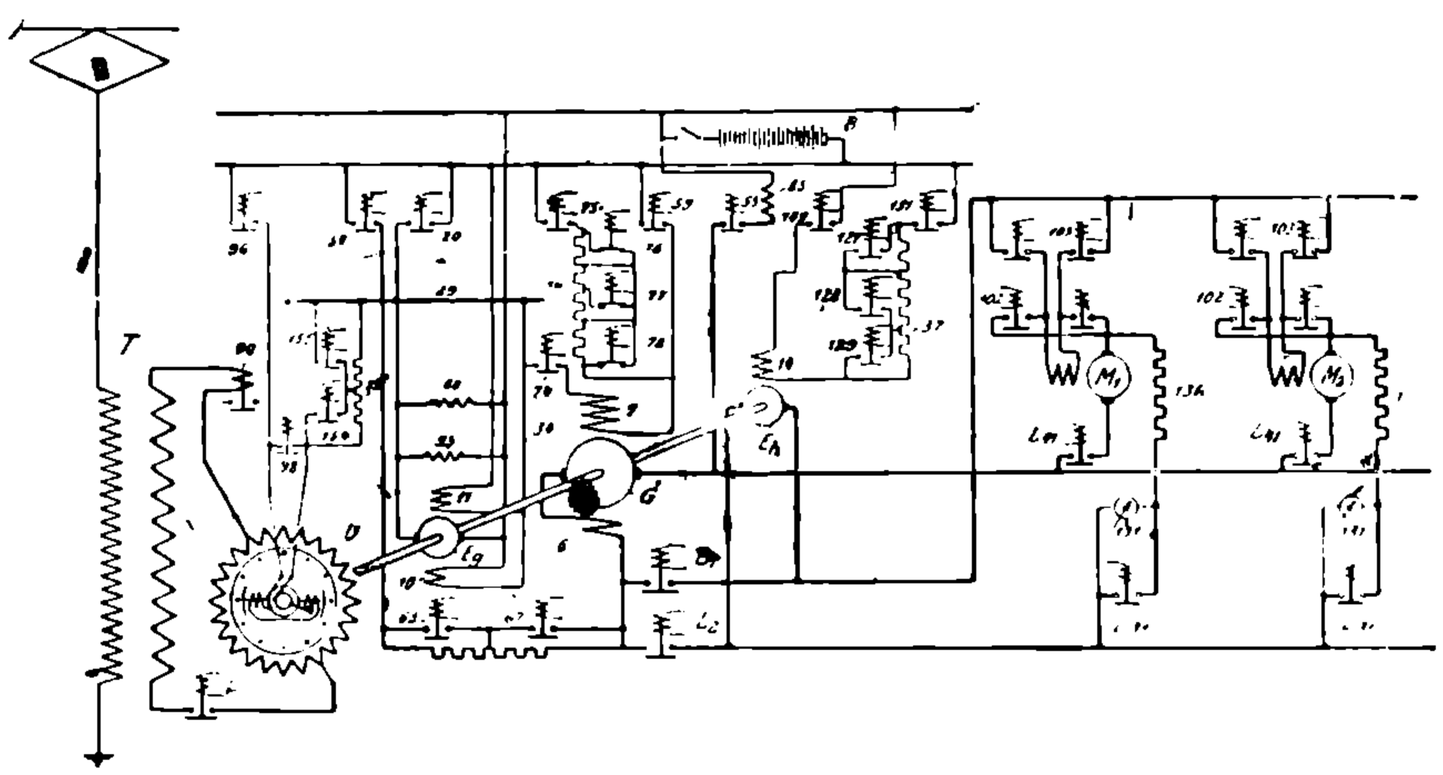


Рис. 321. Схема соединений электровоза однофазно-постоянного тока дороги D.T.I.R.

Из рассмотрения схемы Ford'a видно, что в основу ее положен принцип Леонарда. Работа тяговых двигателей производится от главной динамо G, имеющей компаундное возбуждение. Путем регулирования шунтовой ее обмотки пуск двигателей осуществляется без реостатов, с постепенным повышением напряжения на их зажимах. Динамо E_g служит для питания обмоток возбуждения синхронного двигателя, динамо G и динамо E_h. Назначение последней — питать обмотки возбуждения тяговых двигателей при независимом их возбуждении как при тяговой работе, так и при рекуперации. Переход от последовательного включения к шунтовому и к рекуперации энергии совершается без разрыва главной цепи. Сопротивления 136 являются стабилизирующими нормальными для схемы рекуперации Вестингауза. Чтобы не производить при переходе от тяги к рекуперации добавочных переключений, эти сопротивления включаются, как только машины переводятся на шунтовое возбуждение, независимо от того, будут ли они работать двигателями или генераторами. Следует обратить внимание на то, что при рекуперации через сопротивление 136, как уже было выяснено раньше, проходит сумма токов возбуждения и якорей, а при работе двигателями — их разность. Преобразователь пускается в ход и доводится до синхронизма с помощью динамо G, работающей двигателем от батареи B. Последняя служит также для приведения в движение вспомогательных машин и аппаратов управления, если не работает динамо E_g, исполняющая нормально эти функции. Общая мощность электровозов Ford'a, составляемых из двух самостоятельных единиц с общим числом двигателей равным шестнадцати,— около 3100 kW.

Кроме железной дороги Ford'a, похожие по типу электровозы, оборудованные GEC, имеются на дороге N.H.H.R., работающей при напряжении 11000 V с понижением его в локомотиве до 2300 V. Часть этих локомотивов предназначена для маневровой работы. Такие же маневровые локомотивы применяются на дороге

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Great Nortern. Достоинствами электровозов с мотор-генераторами являются большая эластичность их регулировки и высокий $\cos\varphi$. Тяговые двигатели могут быть рассчитаны с наиболее выгодными для них параметрами, не будучи связаны с заранее заданными напряжениями. Потери в пусковых реостатах, что особенно важно для маневровой работы, здесь устранены. Недостатки подобных электровозов — большой вес их электрического оборудования и большая стоимость, а также относительно низкий к. п. д.

Из числа прочих однофазно-постоянных систем, хотя пока еще только что получающих распространение, заслуживает большого внимания система со ртутным выпрямителем. В Америке уже в 1914 году такая система была разработана Вестингаузом для опытного моторного вагона дороги Philadelphia — Paoli (рис. 322). Был применен однофазный ртутный выпрямитель мощностью около 835 kW, работающий на четыре тяговых двигателя. Схема была испытана, но дальнейшего применения не получила. В настоящее время идея применения ртутных выпрямителей практически осуществлена в Германии в виде пробных электровозов, а также заканчивается постройка такого электровоза у нас, в СССР. Регулирование подво-

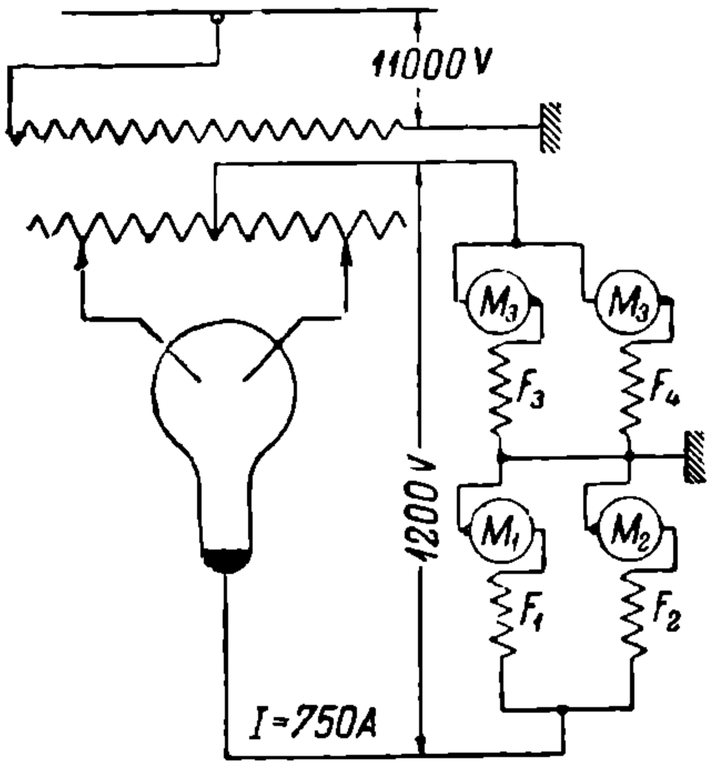


Рис. 322. Схема умформерного моторного вагона со ртутным выпрямителем.

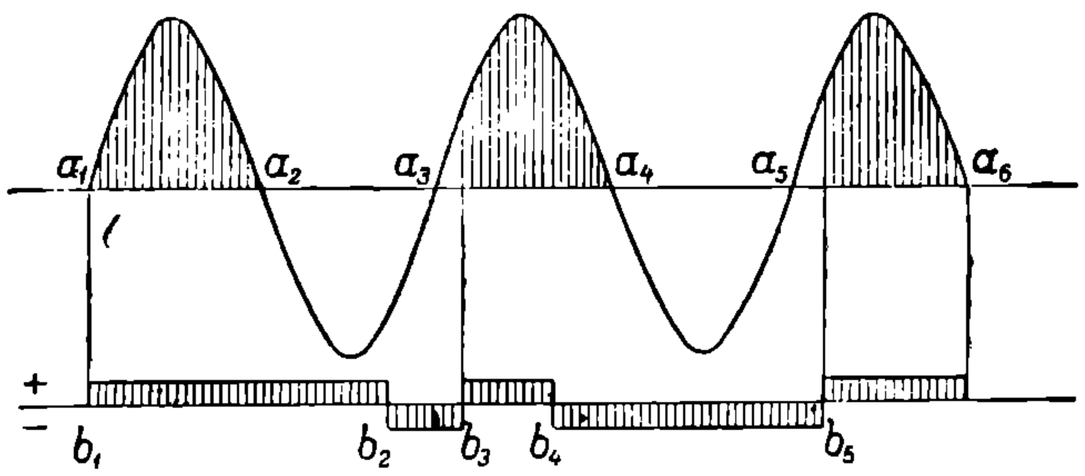


Рис. 323. Диаграмма работы ртутного выпрямителя с сетками.

димого напряжения к тяговым двигателям при ртутных выпрямителях может производиться путем изменения подводимого от трансформатора напряжения к анодам выпрямителя. Применение выпрямителей с сеточным управлением открывает возможность производить эту регулировку с помощью сеток.

Принципиальные преимущества ртутных выпрямитетей для указанных целей весьма значительны. Они дают высокий к. п. д., легко допускают безреостатную регулировку подводимого к двигателям напряжения и имеют небольшой вес. Однако, здесь вопрос значительно осложняется тем, что при однофазном токе технические качества ртутных выпрямителей значительно понижаются. Большим осложнением является сильная пульсация выпрямляемого тока, которая вредно отзывается на работе двигателей, накладывая на них режим, присущий однофазным коллекторным машинам. Насколько это является действительной опасностью для двигателей, можно определенно сказать только после надлежащих исследований.

2. Электровозы с вентильными двигателями.

Очень важным фактором в развитии электрической тяги нужно считать появление уже упомянутых ртутных выпрямителей с управляемыми сетками. На базе применения их ВВС предлагает очень интересную схему электровоза с так называемыми вентильными двигателями. Идея здесь та же, что и в только что разобранных системах, — иметь в контактном проводе однофазный ток высокого напряжения и преобразовывать его в ток постоянный.

Применение управляемых сеток дает возможность управлять работой отдельных анодов выпрямителя. Без таких сеток энергия через отдельные аноды подается по строго периодическому закону, воздействовать на который в процессе установившейся работы практически невозможно. Через пары ртути проходит положительная полуволна э. д. с. сети, отрицательная же отбрасывается обратно. На рис. 323 сверху показаны полуволны первого типа, а снизу — второго. Наличие управляемых

НТБ УГНТ (ДІІТ)

сеток особенно замечательно тем, что оно дает возможность воздействовать на передачу энергии через отдельные аноды. Управление сетками осуществляется подводом к ним добавочного потенциала. При положительном потенциале сетка открывает току путь через свой анод, и, пока к последнему подводится положительная полуволна э. д. с., через него течет ток.. При отрицательном потенциале на сетке анод как бы запирается. Даже в периоды подвода к нему положительных полуволн э. д. с. он энергии не пропускает.

Однако, нужно иметь в виду, что действие сетки проявляется не во все моменты. Положительный потенциал, естественно, может открыть анод только в том случае, если в этот момент у анода находится положительная полуволна э. д. с. В свою очередь отрицательный потенциал может закрыть действие анода только тогда, когда у анода имеется отрицательная э. д. с. На рис. 323 видно действие управляемых сеток. В начальный момент сетка получает положительный потенциал, который поддерживается на протяжении периода b_1—b_2. Анод работает, причем рабочие интервалы его показаны заштрихованными. В момент b_2 включается отрицательный потенциал, благодаря чему до точки b_3 анод не может снова пропускать ток. Работа его начинается только после момента b_3, когда сетке подается положительный потенциал. В момент b_4 к сетке снова подводится отрицательный потенциал. Однако, остановить процесс работы анода это не может, так как у анода находится в это время положительная полуволна э. д. с. Работа анода прекращается только в пункте a_4 и возобновляется затем в точке b_5.

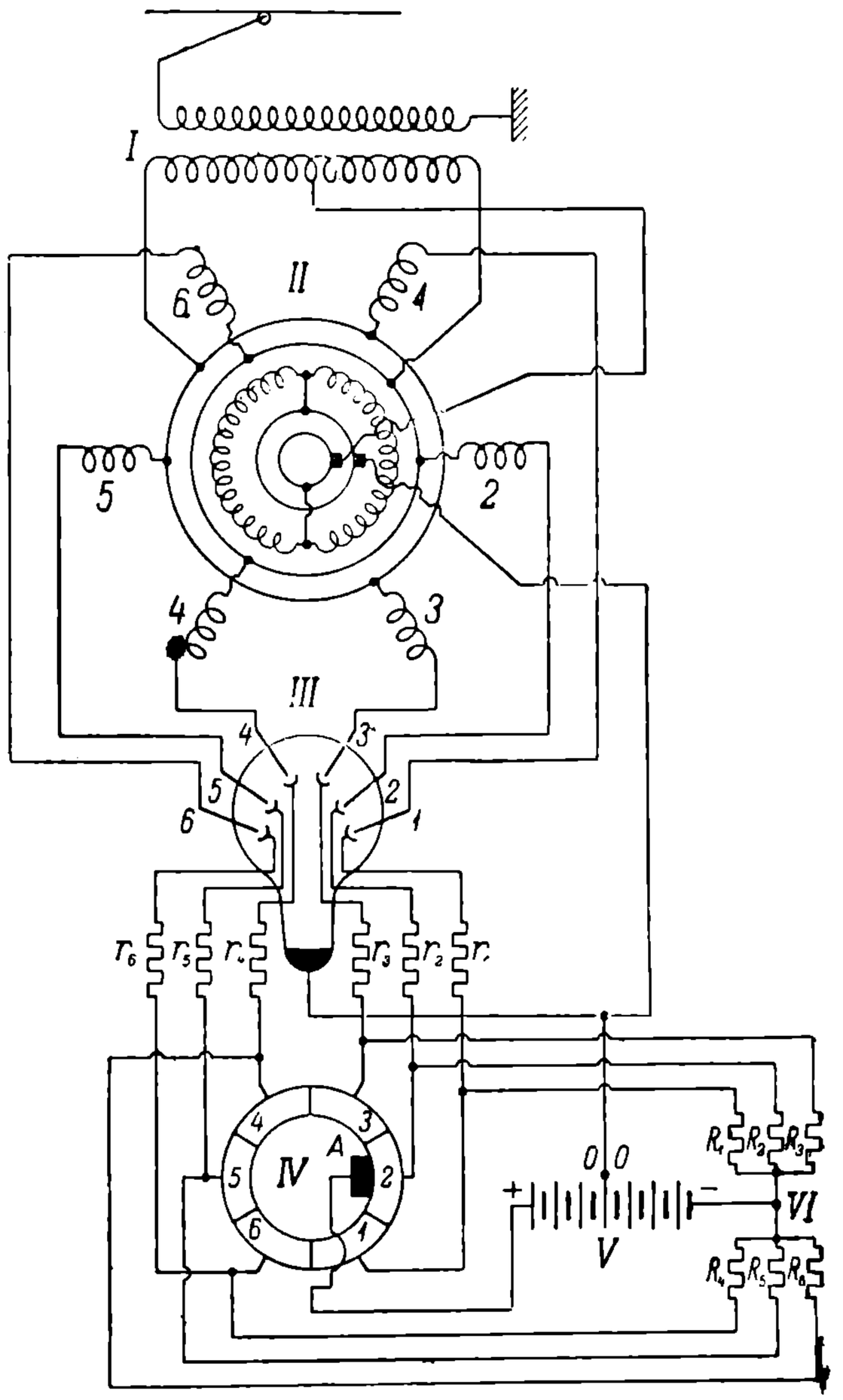


Рис. 324. Схема включения ртутного выпрямителя с вентильными двигателями.

Принципиальная система оборудования электровоза с вентильными двигателями дана на рис. 324. Она содержит однофазный трансформатор *I* со средней точкой на вторичной обмотке. Дальше идет вентильный двигатель *II*. Под цифрой *III* значится ртутный выпрямитель с шестью анодами и таким же числом управляемых сеток. Управление сетками производится с помощью механизма *IV*, представляющего собой коммутатор, к пластинам которого присоединены сетки. В нормальном положении к сеткам подводится отрицательный потенциал через сопротивления r и R, в данном случае — от батареи *V*. Положительный потенциал подается с помощью щетки *A*. На рис. 324 он подводится к сетке *2*. При движении двигателя щетка *A* перемещается совместно с его валом, и, таким образом, в процессе движения положительные потенциалы в нужные моменты подаются поочередно к отдельным сеткам.

Наиболее сложной частью в этой схеме являются сами тяговые двигатели, получившие название вентильных. Они, как и обычные машины, состоят из ротора и статора. Ротор имеет однофазную обмотку с диаметральными отводами к кольцам. Обмотка эта является возбудительной, создающей магнитный поток.

Статор двигателя комбинируется из шести отдельных фаз, разбитых на две группы по три. Получаются две трехфазные обмотки, сдвинутые друг по отношению к другу

НТБ УГУНТ (ДІІТ)

ча 60°. Общие точки каждой обмотки подведены ко вторичным зажимам трансформатора. Свободные же концы подведены к анодам выпрямителя. При работе главная цепь составляется следующим образом. Ток из катода выпрямителя проходит через ротор двигателя, затем через трансформатор и далее замыкается снова на катод через фазу обмотки статора, соединенную с тем анодом, сетка которого получила положительный потенциал и как бы открыла вентиль для пропуска тока. Как видно из схемы, обмотки возбуждения и рабочая здесь соединяются последовательно. Ввиду этого данную схему нужно отнести к сериесным.

Для получения от вентильного двигателя вращающего момента м. д. с. ротора и статора должны иметь соответствующее направление в пространстве. Если обратиться к рис. 324, то оказывается, что наивыгоднейшее положение обмотки зани-мают тогда, когда при представленном положении ротора открыта или фаза 2, или 5. При таком положении м. д. с. ротора и статора находятся в пространстве под углом в 90°, что, как известно, является наиболее благоприятным условием для создания вращающего момента. Если бы при этом же положении ротора были открыты фазы 1 или 4, то условия его образования были бы хуже.

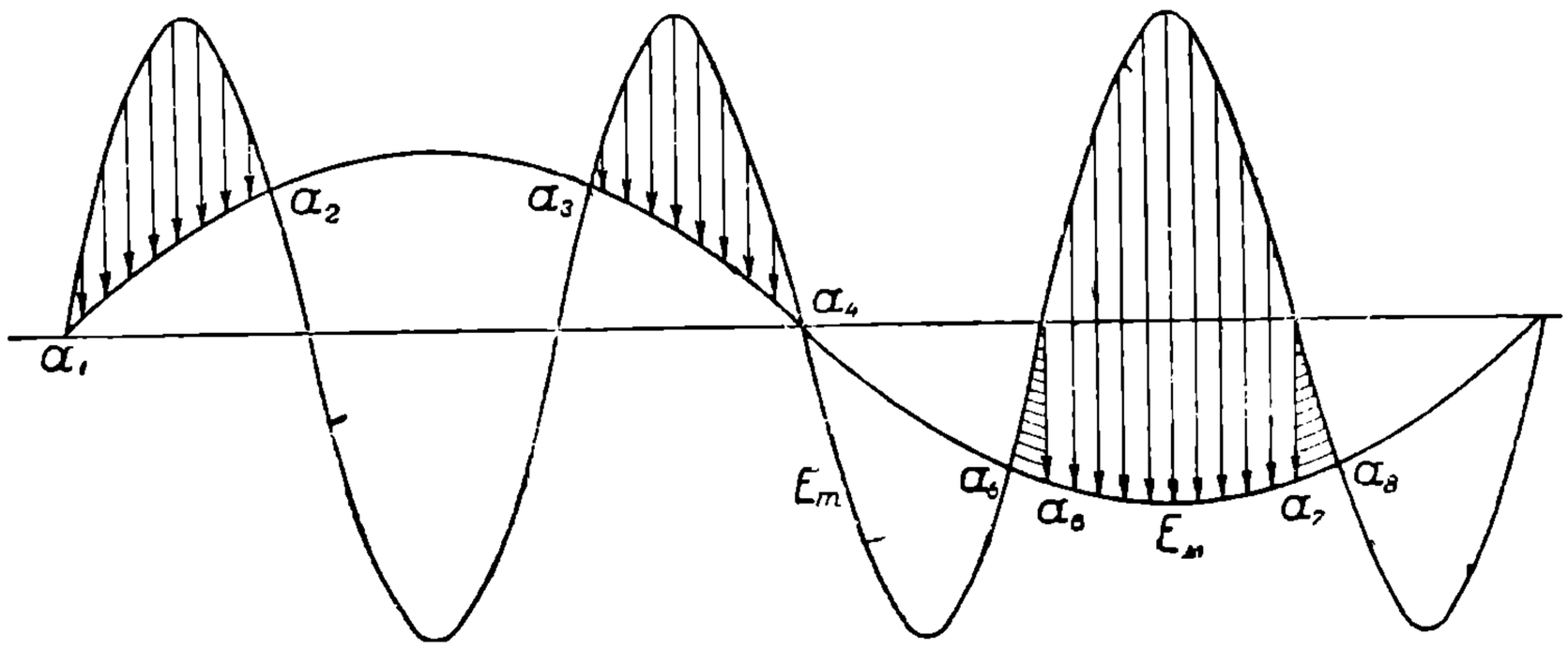


Рис. 325. Диаграмма взаимодействия э. д. с. ртутного выпрямителя с сетками и э. д. с. вентильных двигателей.

При совпадении направлений м. д. с. статора и ротора вообще никакого момента не создается. Очевидно, что для получения хорошего и непрерывно действующего вращающего момента от данного двигателя необходимо при вращении ротора открывать и закрывать отдельные фазы таким образом, чтобы м. д. с. статора и ротора все время были направлены друг к другу под углом, возможно близким к 90°, что и достигается коммутатором IV. Однако, в среднем этот угол значительно отличается от 90°, что влечет за собою основной недостаток вентильных двигателей. Следует иметь в виду, что при практическом выполнении разобранной схемы в целях ослабления отмеченного недостатка предпочитают обмотку статора двигателя составлять не из двух трехфазных, а из двух шестифазных обмоток, применяя в этом случае двенадцатианодный выпрямитель. Чем больше фаз, тем, естественно, менее чувствителен указанный недостаток в отношении угла сдвига между м. д. с. статора и ротора.

Чтобы составить себе представление о процессах, имеющих место в вентильных двигателях, необходимо прежде всего проанализировать те э. д. с., которые действуют в их цепях. В каждой замкнутой главной цепи двигателя действуют две основные э. д. с. (рис. 325). Одна производится трансформатором, а другая самим двигателем. На рис. 325 первая обозначена через E_m, вторая через $E_м$. Обе э. д. с. принадлежат к синусоидальным. Первая в отношении частоты зависит от сети, вторая же определяется скоростью вращения самого двигателя. В общем случае число периодов той и другой э. д. с. различно. Нормально число периодов у сети выше, чем у двигателя.

При нормальной работе машины в качестве двигателя E_m и $E_м$ должны быть противоположного направления, причем E_m должно быть больше $E_м$. На рис. 325 работа машины в качестве двигателя начинается с момента a_1. В точке a_2 она прерывается, и в цепи никакого тока не получается. Прекращение работы объясняется тем, что в этот момент результирующая э. д. с. на аноде равна нулю

НТБ УИИГНТ (ДІІТ)

и дальше тока не имеется до точки a_3. Нужно иметь в виду, что знаки полуволн E_m и $E_м$ в период работы $a_1 - a_2$ различны. Полуволны E_m положительны, а $E_м$ отрицательны. В течение периода $a_2 - a_3$ анод не работает, так как у него результирующая э. д. с. отрицательна. Работа его начинается только с точки a_3, когда E_m снова становится больше $E_м$. В интервале $a_4 - a_5$ E_m отрицательна, а $E_м$ положительна. Анод не работает. Начиная с точки a_5, $E_м$ становится больше E_m. Анод начинает работать, так как у него появляется положительная э. д. с. Период работы $a_5 - a_6$ характеризуется тем, что фактором, обеспечивающим ток в цепи системы, является э. д. с. машины $E_м$. В этот момент машина работает генератором, отдавая энергию через трансформатор в сеть. Период работы $a_5 - a_6$ является, следовательно, периодом рекуперативного торможения. При переходе за точку a_6 при том же знаке $E_м$ знак E_m меняется. Последняя становится положительной и начинает действовать совместно с $E_м$. Токи в цепи уже образуются тогда под действием обеих э. д. с. Этот период на диаграмме от a_6 до a_7 характеризуется работой машины тормозом с одновременным потреблением энергии от сети.

Таким образом, рассмотренный процесс работы может в общем случае состоять из четырех периодов: работы машины двигателем, генератором на сеть, тормозом с потреблением энергии от сети и, наконец, периода прекращения тока в цепи Задача управляемых сеток — обеспечить такой режим, который требуется по заданию Если задается работа машины двигателем, то нужно стремиться подавать потенциалы к сеткам таким образом, чтобы по возможности избегать моментов торможения и генерирования. Если требуется иметь от машины генераторный эффект, то сетки надо регулировать таким образом, чтобы предотвращать режимы двигателя и тормоза. Координирование работы сеток является одним из существенных затруднений при организации рациональной работы системы.

Из числа других осложнений, с которыми здесь приходится считаться, следует указать на процесс трогания поезда с места. Для того, чтобы двигатели могли при трогании развивать нужный момент, положительный потенциал должен быть подведен к соответствующим сеткам с таким расчетом, чтобы сдвиг между м. д. с. ротора и статора был достаточно благоприятен. Управление сетками в период пуска становится особенно затруднительным.

Недостатком вентильных двигателей нужно также считать неблагоприятные условия нагревания статорных обмоток. В данном случае фазы работают с переменным режимом. В рабочие для них моменты по ним проходят очень большие токи. В другие же периоды они работают совсем без тока. Поэтому нагревание обмоток фаз получается значительно более интенсивным по сравнению с тем случаем, когда токи все время распределяются по всем фазам равномерно.

Система электровоза с вентильными двигателями требует дальнейшей проработки. Целый ряд вопросов пока еще не разработан и недостаточно выяснен. Вообще же, идея вентильного двигателя, как безколлекторной машины, заслуживает самого серьезного внимания (Л. 194 и 195).

На основании разобранного принципа работы ртутных выпрямителей можно себе уяснить упомянутый выше способ регулирования с помощью управляемых сеток напряжения, подводимого от ртутного выпрямителя к тяговым электродвигателям (рис. 322). Как следует из рис. 323, действием управляемых сеток можно произвести отсечение части полуволны э. д. с., передаваемой через ртутный выпрямитель. На рис. 323 отсекаемые части полуволн показаны не заштрихованными. Естественно, чем больше отсекаемые части полуволн, тем меньше должно быть и напряжение у двигателя. Если срезать всю положительную полуволну, тогда никакого напряжения выпрямитель давать не будет. Принципом отсечек и пользуются для регулировки напряжения.

Очень большое осложнение, получающееся при такой регулировке, вызывается усилением пульсации тока, питающего двигатели. Чем больше степень отсечки, тем сильнее эта пульсация проявляется. Работа тяговых двигателей, будучи и без того тяжелой при питании ртутных выпрямителей от однофазного тока, здесь еще больше осложняется. Благодаря пульсирующему характеру токов, а следовательно, и образуемых ими потоков, должна сильно ухудшаться коммутация двигателей, а также должны увеличиваться и потери в их железе.

Нужно указать, что в настоящее время разрабатывается вопрос о применении для только что рассмотренных целей вместо ртутных выпрямителей тиратронов,

НТБ УЛИНТ (ДІІТ)

работающих на принципе газовых выпрямительных ламп. Преимущество тиратронов в том, что они более удобны в отношении эксплоатации, но зато их требуется большое количество — по числу не меньше того, сколько имеется отдельных анодов.

3. Умформерный локомотив системы Grabner и Pawelka.

Для австрийских железных дорог фирмой SSW построен умформерный электровоз, в котором так же, как и в предыдущей системе, проведена идея однофазно-постоянного тока. Этот локомотив относится к типу умформерных электровозов с преобразованием однофазного тока в трехфазный и последующим выпрямлением трехфазного в постоянный ток. Обладая всеми преимуществами Вард-Леонардовской системы в отношении простоты регулирования числа оборотов, легкости перехода на рекуперацию, хорошего $\cos\varphi$ и т. д., эта система, благодаря применению чисто электрического преобразования токов, не имеет многих ее недостатков. Рис. 326 и 327 изображают преобразователь и принципиальную схему электровоза системы Grabner и Pawelka. Из схемы видно, что на электровозе имеется трансформатор для снижения напряжения контактного провода с 15 000 V до 624 V. Это пониженное напряжение при помощи специального выключателя подводится к четырем контактным кольцам преобразователя фаз. Преобразователь фаз выполнен в виде синхронной однофазной машины с распределенной обмоткой возбуждения на статоре. Для гашения обратно-синхронного поля на статоре имеется еще сильная демпферная обмотка.

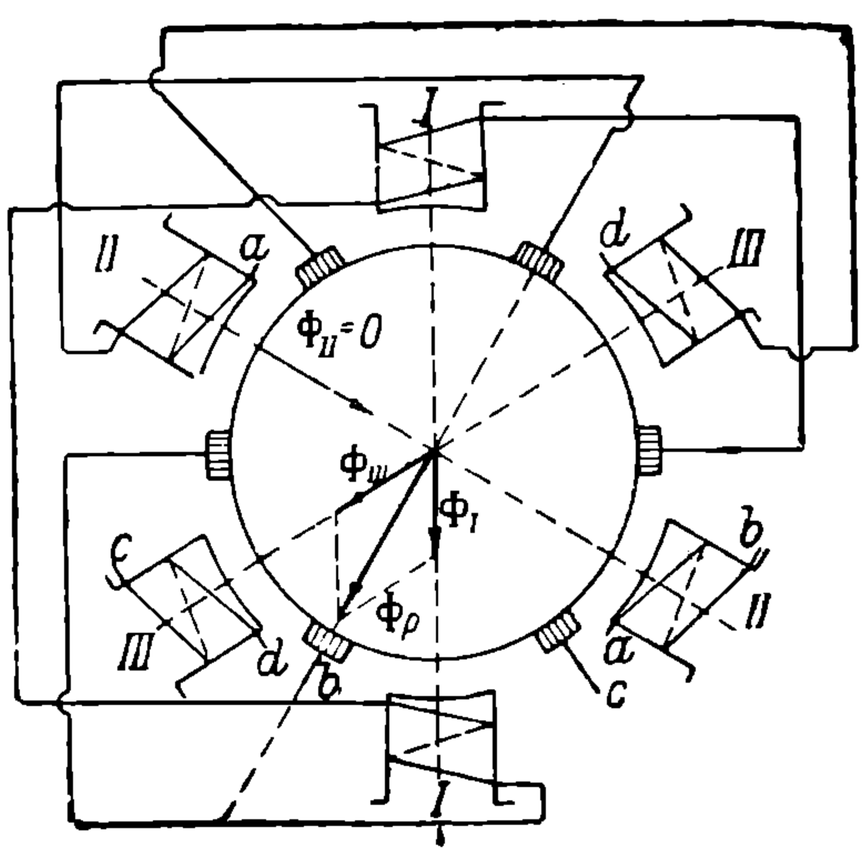


Рис. 326. Преобразователь системы Grabner-Pawelka.

Ротор преобразователя фаз снабжен двумя замкнутыми барабанного типа обмотками. Диаметрально противоположные точки этих обмоток присоединены к двум парам контактных колец, к которым подводится однофазный ток от трансформатора. Помимо этого, обе эти обмотки имеют трехфазные выводы, которые непосредственно, проходя по углублениям вала, соединяют их с расположенными по обе стороны преобразователя фаз двумя преобразователями переменного тока в постоянный. Последние отличаются от обычных одноякорных преобразователей оригинальным выполнением системы возбуждения. Статор у них имеет на одну пару три отдельных, явно выраженных пары полюсов *I*, *II* и *III*. Обмотки этих полюсов питаются от трех пар щеток, сдвинутых на коллекторе по отношению друг к другу на угол 60°. Ток, поступающий из щеток в соответственные обмотки возбуждения, зависит от положения щеток по отношению к результирующему потоку, представляющему собой геометрическую сумму трех отдельных потоков Φ_I, Φ_{II} и Φ_{III}. Из рис. 326 видно, что при данном положении поток Φ_{II} равен нулю и что результирующий поток Φ_p определяется только двумя равными потоками Φ_I и Φ_{II}. Равенство потока Φ_{II} нулю вызывается тем, что в данном положении линия щеток, питающих обмотки полюсов *II*, точно совпадает с направлением потока Φ_p, а потому на них не получается никакого напряжения.

Очень интересная картина получается, если начать передвигать статор и одновременно щетки. Нетрудно убедиться в том, что независимо от такого перемещения направление и величина потока Φ_p будут оставаться неизменными. Это объясняется тем, что сдвиг отдельных полей в пространство будет одновременно сопровождаться таким изменением их величин, определяемых положением щеток, в результате которого поле Φ_p будет оставаться постоянным как по направлению, так и по величине.

Необходимость сдвига щеток одновременно со всей полюсной системой диктуется условиями коммутации. При таком условии щетки все время будут находиться в междуполюсном положении под действием относительно слабых индукций основного поля. При наличии, кроме того, добавочных полюсов, действующих в зоне нахождения рабочих щеток и передвигающихся с ними, условия коммутирования

БНТУ УДУНТ (ДІІТ)

тока должны в результате получиться достаточно удовлетворительными. Зоны коммутирования возбудительных щеток при их малых токах добавочными полюсами можно не снабжать.

Из рис. 327 следует, что питание тяговых двигателей в данной системе производится от одной до трех пар щеток. Сдвигая рабочие щетки, очевидно, в зависимости от их положения по отношению к Φ_p можно регулировать напряжение, подводимое к двигателям от 0 до U_{max}. Применение двух последовательно включенных преобразователей объясняется стремлением получить автоматическое регулирование cos φ системы. При сдвиге щеток в преобразователе поток якоря все время меняется и по величине и по направлению. В зависимости от того, в какую сторону от нейтрали результирующего потока Φ_p перемещается линия действия потока якоря,

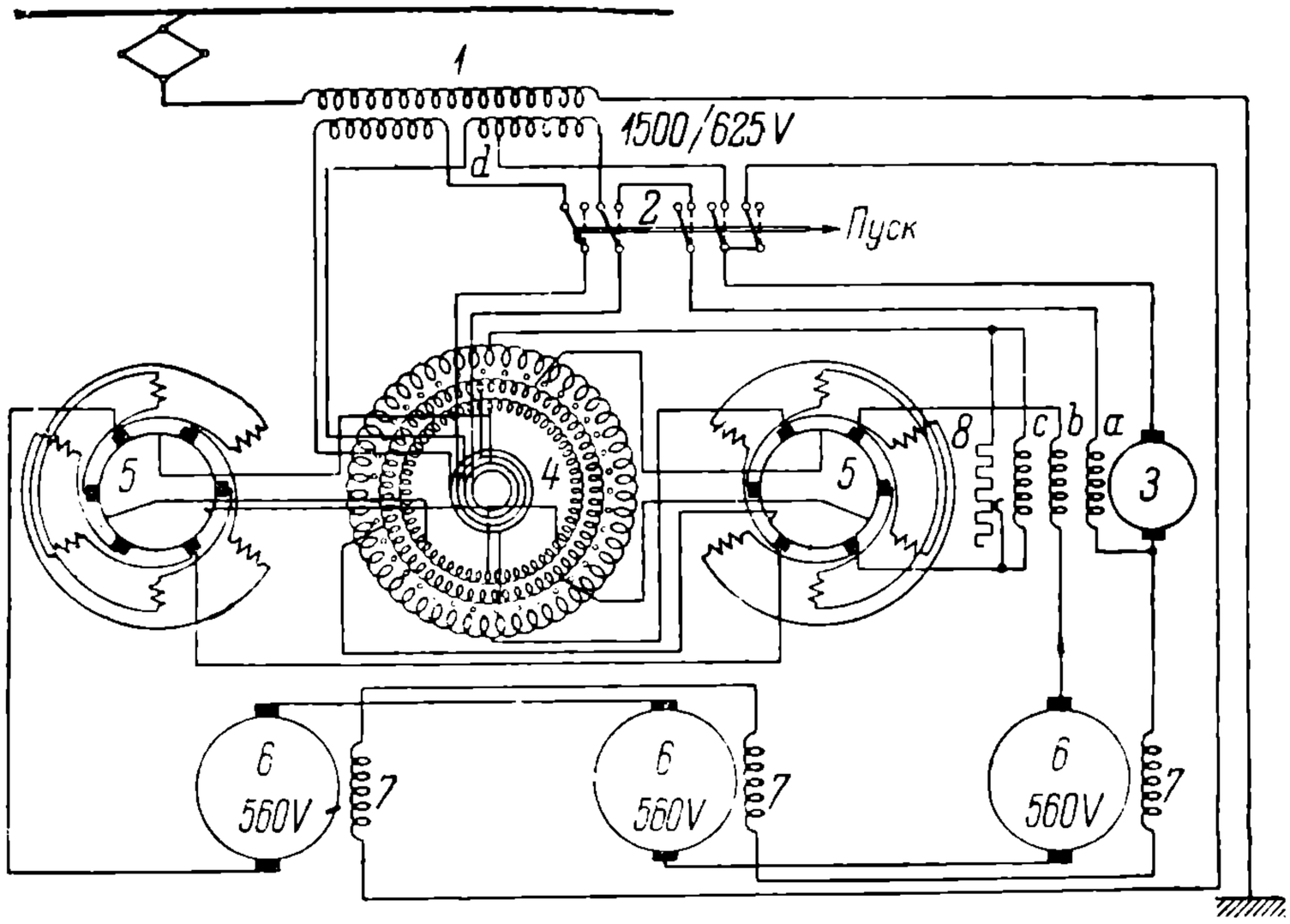


Рис. 327. Система электровоза Grabner-Pawelka.

Обозначения.

1—понижающий трансформатор, 2—пусковой переключатель, 3—универсальная машина, 4—преобразователь фаз, 5—преобразователь частоты, 6—тяговые электродвигатели, 7—обмотки возбуждения тяговых электродвигателей, 8—регулировочный реостат

результирующее поле может или ослабляться, или увеличиваться. В первом случае преобразователь будет иметь тенденцию работать отстающими токами, во втором упреждающими. Нетрудно сообразить, что при двух последовательно соединенных преобразователях и вращении их статоров в противоположных направлениях cos φ системы будет сам собой поддерживаться постоянным. Его можно сделать таким, чтобы из сети потреблялись только активные токи или даже можно заставить систему работать токами упреждающими.

Кроме разобранных машин, в схеме имеется еще вспомогательная машина 3, исполняющая несколько функций и поэтому называемая универсальной машиной. Она имеет три обмотки возбуждения *a*, *b* и *c*. Прежде всего машина 3 используется для пуска главных машин 4 и 5. При последовательном соединении ротора машины 3 с ее обмоткой возбуждения образуется последовательный коллекторный однофазный двигатель. При перемещении переключателя 2 из положения, показанного на рис. 327, вправо машина 3 присоединяется к пониженному напряжению от секции трансформатора *d*, причем последовательно в цепь включается в качестве дополнительного сопротивление одной из роторных обмоток преобразователя 4. После производства разгона переключатель 2 ставится в рабочее положение, показанное на рис. 327. Обмотка *a* выключается.

В рабочем положении машина 3 исполняет функции возбудителя тяговых двигателей 6. Основная ее возбудительная обмотка *b* питается рабочим током. При условии слабого насыщения машина 3 будет создавать ток в обмотках возбуждения тяговых двигателей, пропорциональный току в их якорях. Следовательно двигатели будут с последовательной характеристикой. Для регулирования потока

НБ УДУНТ (ДІІТ)

возбуждения машины 3, а следовательно, и тока возбуждения тяговых двигателей, используется третья обмотка *c*. Путем переключения направления тока в ней и путем изменения его величины с помощью реостата 8 можно менять результирующий поток машины 3, а следовательно и ток в обмотках 7. Это дает возможность менять как угодно скорость движения поезда, а также и производить рекуперацию.

Разобранная схема обеспечивает широкую эластичную регулировку $\cos\varphi$ сети, напряжения у двигателей, скорости поезда и рекуперации энергии. Однако эта схема требует большого количества вспомогательных машин. Повидимому, сложность ее является причиной, почему она не получает широкого распространения (Л. 180 и 181).

III. АККУМУЛЯТОРНАЯ ТЯГА.

В некоторых случаях эксплоатации железных дорог бывает целесообразно пользоваться для тяги аккумуляторами. Преимущество аккумуляторной тяги — устранение зависимости поезда от устройств, подводящих ток к подвижному составу. Как известно, в настоящее время на практике применяются два типа аккумуляторов — свинцовые и железо-никелевые. Обе эти системы находят себе применение и в тяге. Общая характеристика их приведена в табл. 44.

ТАБЛИЦА 44.

Электрические параметры свинцовых и щелочных аккумуляторов.

Типы аккумуляторов	Нормальное напряжение	Средне-разрядное напряжение	Зарядное напряжение	К. п. д. по емкости	К. п. д. по мощности
Свинцовые	2,07	1,89	2,7	90%	70—65%
Железо-никелевые	1,4	1,23	1,8	75%	45—60%

Основное достоинство свинцовых аккумуляторов заключается в более высоком к. п. д. Выполняются они для тяги в двух основных формах. Первый тип имеет в качестве положительных электродов большие ребристые свинцовые пластины с образованием на них путем соответствующей формовки двуокиси свинца. Второй тип имеет в качестве каркаса для положительных пластин тонкие свинцовые решетки, заполняемые свинцовой массой и после формовки обращающиеся в губчатый свинец. В качестве отрицательных пластин применяются в обоих типах пастированные пластины. Первый тип аккумуляторов отличается большим весом. Второй может быть сделан более легким. Однако, в отношении рабочих свойств он значительно хуже первого. В работе он недолговечен. Число перезарядок, которое он может безболезненно выдержать, колеблется в пределах от 100 до 300, тогда как второй тип выдерживает от 1 000 до 1 500. Кроме того, он гораздо более чувствителен к перегрузкам и механически менее прочен.

Большими достоинствами в условиях тяги обладают щелочные аккумуляторы, применяемые по большей части в виде железо-никелевых, типа Edisson'a. Основными их преимуществами следует считать малый вес, большую механическую прочность, долговечность, способность выдерживать большие зарядные и разрядные токи, которые могут достигать десятикратного нормального значения. В отношении срока службы щелочных аккумуляторов характерны данные. Пенсильванской железной дороги. После семилетней службы на вагонах этой дороги аккумуляторы Edisson'a уменьшили свою емкость всего только на 10%. В отношении монтажа щелочные аккумуляторы также имеют преимущества перед свинцовыми. Отсутствие кислотных выделений позволяет их ставить без особых предосторожностей под кузовом и в кузове, даже если в нем находятся пассажиры. Недостатками аккумуляторов Edisson'a нужно считать их относительно более высокую стоимость и значительно более низкий к. п. д.

В среднем весовые соотношения различных типов аккумуляторов можно охарактеризовать следующими цифрами. Свинцовые стационарные аккумуляторы дают от 6 до 7 Wh/kg, свинцовые для тяговых целей от 10 до 15 Wh/kg, свинцовые специальные, ультраоблегченные типы, предназначаемые преимущественно для старторных целей, от 15 до 30 Wh/kg и щелочные от 24 до 30 Wh/kg. Ferrand пред-

НБ УИИНТ (ДІІТ)

лагает при выборе аккумуляторов для тяговых целей в среднем руководствоваться процентными отношениями табл. 45, в которой за единицу приняты качества свинцовых типов.

ТАБЛИЦА 45.

Соотношение показателей свинцовых и щелочных аккумуляторов.

Типы аккумуляторов	5-часовая емкость	Вес	Цена	Расход на содержание	К. п. д.
Свинцовые	1	1	1	1	1
Щелочные	1	0,5	1,25	0,7	0,8

Вопрос о том, какая система аккумуляторов выгоднее для тяги, может иметь различное решение в зависимости от условий эксплоатации. Главными критериями здесь должны являться количество перевозимого груза и стоимость электрической энергии. Чем больше грузооборот и чем дороже энергия, тем выгоднее становятся свинцовые аккумуляторы. Ferrand в своей работе построил для частного случая критическую кривую выгодности той и другой системы, введя в качестве независимых параметров указанные два фактора (Л. 190).

В отношении систем управления поездом при аккумуляторной тяге существенных отличий не имеется. Значительным преимуществом при ней нужно считать возможность комбинированного включения отдельных групп аккумуляторов. Это дает возможность существенно снижать потери в пусковых реостатах и иметь большое количество экономических скоростей. Однако, полностью избавляться от пусковых реостатов и здесь по большей части не удается, так как это влечет за собой большое осложнение системы групповых аккумуляторных выводов. Очень часто ограничиваются делением батареи только на две части, что при комбинировании с последовательно-параллельным включением двигателей дает уже практически вполне достаточное количество отдельных ступеней.

При аккумуляторной тяге иногда может оказаться выгодным применение компаундных двигателей, которые, например, были взяты на одной из серий вагонов германских железных дорог (Л. 184). При таких двигателях можно легко осуществлять внутреннюю рекуперацию энергии, т. е. использовать силы уклонов и инерции для зарядки батарей. Напряжения в аккумуляторных системах чаще всего берутся порядка 250—500 V. О весовых соотношениях аккумуляторного подвижного состава может дать представление табл. 46.

ТАБЛИЦА 46.

Весовые соотношения подвижного состава при аккумуляторной тяге.

Тип подвижного состава	Моторный 4-осный вагон при $KW_h = 200$		Маневровый 4-осный локомотив при $KW_h = 220$	
Тип аккумуляторов	Свинцовые	Щелочные	Свинцовые	Щелочные
Вес механич. частей в t	30	30	21,5	21,5
Вес электрических частей без аккумуляторов в t . . .	10	10	12,06	12
Вес аккумуляторной батареи в t . .	26	11	33	15
Общий вес в t . .	66	51	66,5	48,5
Емкость батареи в ампер-часах при 5-часовом разряде . .	552	552	720	790
Напряжение .	310	308	490	410

Областью применения аккумуляторной тяги прежде всего являются линии железных дорог со слабым движением, но в то же время с относительно частым и регулярным движением поездов. Табл. 47 дает представление о весовых соотношениях автомотрисс со свинцовыми аккумуляторами в зависимости от радиуса их действия.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Большие преимущества аккумуляторная тяга может дать при маневровой работе. На больших железнодорожных станциях часто бывает выгодно вместо того, чтобы электрифицировать все воспомогательные пути, иметь аккумуляторные маневровые электровозы. Характерно, что применение последних может быть иногда целесообразно

ТАБЛИЦА 47.

Весовые соотношения аккумуляторных автомотрисс.

Части оборудования	Радиус действия 100 km	Радиус действия 180 km
Вес механических частей в t	33	33
То же электрических .	24	24
То же батарей	21	32

даже тогда, когда главные пути электрифицированы. Аккумуляторная тяга для маневров имеет преимущества еще и потому, что путем группировки элементов батареи можно очень сильно снизить потери в пусковых реостатах. По подсчетам Meixner'a для условий австрийских железных дорог расходы по эксплоатации при аккумуляторной тяге почти в два раза меньше, чем при паровой (Л. 189). Расход электрической энергии для маневровой службы по данным Ferrand и Meixner следует считать равным около 35—40 Wh/tkm перерабатываемого груза брутто. Расход же угля при калорийности 3 500 и 4 000, по данным австрийских железных дорог, для того же измерителя определяется около 0,837 kg (Л. 189).

Большим распространением аккумуляторная тяга пользуется в заводском и рудничном транспорте. Здесь, помимо экономических соображений, очень часто приходится ее применять по условиям производства. Некоторые отрасли его не допускают загромождения заводской территории контактными сооружениями. Другие отрасли вообще не позволяют, по условиям безопасности, работать с токоприемниками, являющимися источниками образования вольтовых дуг. Очень рационально иногда применять смешанную систему тяги там, где это возможно по местным условиям, работать с токоприемником, а где этого нельзя, переходить на аккумуляторную тягу.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ОТДЕЛ ШЕСТОЙ.

ОСНОВЫ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА И ТЯГОВЫЕ РАСЧЕТЫ.

I. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ТЯГОВОГО РАСЧЕТА.

Тяговый расчет имеет своим главным назначением выявлять зависимости между основными элементами движения поезда. Сюда в первую очередь относятся все вопросы, касающиеся установления связи между временами движения поезда, путями, проходимыми им, и его скоростями. При тяговом расчете требуется также решать задачи о выборе мощностей тяговых двигателей, а в некоторых случаях и принципиальные вопросы о выборе типа тягового подвижного состава. Здесь же приходится решать вопросы и об энергии, потребной для осуществления движения.

При изучении движения поезда исходят, главным образом, из вышеприведенного основного уравнения механики (8). Решение данного уравнения позволяет установить важнейшие зависимости в тяговых расчетах. Первый интеграл его дает связь между скоростью и временем движения поезда:

$$v = f(t). \tag{227}$$

Второй интеграл решает вторую задачу, устанавливая связь между временем и расстоянием, проходимым поездом:

$$l = f(t). \tag{228}$$

Вместо данного выражения второй интеграл берется часто в виде зависимости:

$$v = f(l). \tag{229}$$

Кроме уравнения (8), в тяговых расчетах иногда оказывается рациональным пользоваться и уравнением живых сил (9). Особенно это удобно при установлении связи между скоростями и расстояниями, проходимыми поездом. Помимо этого, уравнением живых сил приходится пользоваться и для решения многих вопросов, относящихся к работе и энергии, затрачиваемым на движение поезда.

При решении уравнения движения необходимо в первую очередь изучить те основные элементы, которые в него входят. Для этой цели надо иметь данные о характеристиках тяговых электродвигателей, о сопротивлении движению поезда и о всех вопросах, касающихся сил его инерции. Первый вопрос был уже освещен в вышеприведенном отделе тяговых электродвигателей. Дополнительно ряд вопросов, связанных с тяговыми характеристиками, затронут автором в специальном руководстве, предназначенном для расчетов (Л. 196). Ввиду этого в последующих главах предполагается начать изучение движения поезда с вопросов, касающихся сопротивлений. При изучении последних необходимо иметь в виду, что они слагаются из сопротивления пути, внутренних сопротивлений подвижного состава и сопротивления воздушной среды. Кроме того, при тяговых расчетах в сумму всех сопротивлений приходится также включать, в случае их наличия, сопротивления, вызываемые уклонами местности и кривыми участками пути.

II. СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ПОЕЗДА.

1. Сопротивление пути.

Сопротивления, преодолеваемые при передвижении колеса по рельсовому пути, подчинены целому ряду сложных процессов. Помимо качения колеса по рельсам, лежащего в основе рассматриваемого процесса, здесь имеют место различные паразитные движения колеса в виде добавочных поперечных и продольных пере-

НБ УИИНТ (ДІІТ)

движений колес по рельсам. Насколько сложен процесс движения колеса, можно видеть из того, что даже основное явление качения до настоящего времени нельзя считать окончательно изученным. Но одно несомненно, что сущность сопротивлений качения кроется в деформациях, которые при передвижении получаются как в теле бандажей колес, так и в теле рельсов. Примерная картина таких деформаций представлена на рис. 328. При движении колеса и рельсы непрерывно меняют свою форму. снова ее восстанавливая. Естественно, что подобная деформация требует определенной затраты работы, которая и проявляется в виде преодоления особого рода сопротивлений движению качения.

Физическое выяснение происхождения данных сопротивлений нужно искать в свойствах деформаций. Из теории упругости материалов известно, что для деформации требуется усилие большее, чем то, которое получается со стороны тела деформированного, восстанавливающего свою форму и давящего на тело, произведшее деформацию.

Вследствие указанных свойств деформаций, получается следующая картина взаимодействия между колесом и рельсами. Пока колесо находится в состоянии покоя, результирующие реакции давления рельсов на колеса P_1 и P_2, с одной и другой стороны от вертикали (рис. 328-а) равны друг другу. Если принять, что деформированный контур колес мало отличается от окружности, то линии действия реакций P_1 и P_2 пересекутся в центре оси и дадут в результате сложения силу вертикальную, соответствующую весовому давлению колеса. Но как только наступает качение колеса по рельсу, равенство между реакциями P_1 и P_2 нарушается. В данном случае, согласно отмеченному свойству деформаций, на переднюю половинку колеса начинает оказывать влияние деформация действия, а на заднюю — деформация последействия (рис. 328-b). В результате P_1 становится больше P_2, и при сложении этих сил мы получим результирующую, дающую, помимо вертикальной составляющей, еще составляющую горизонтальную, противодействующую движению и представляющую собой искомое сопротивление качению R_1.

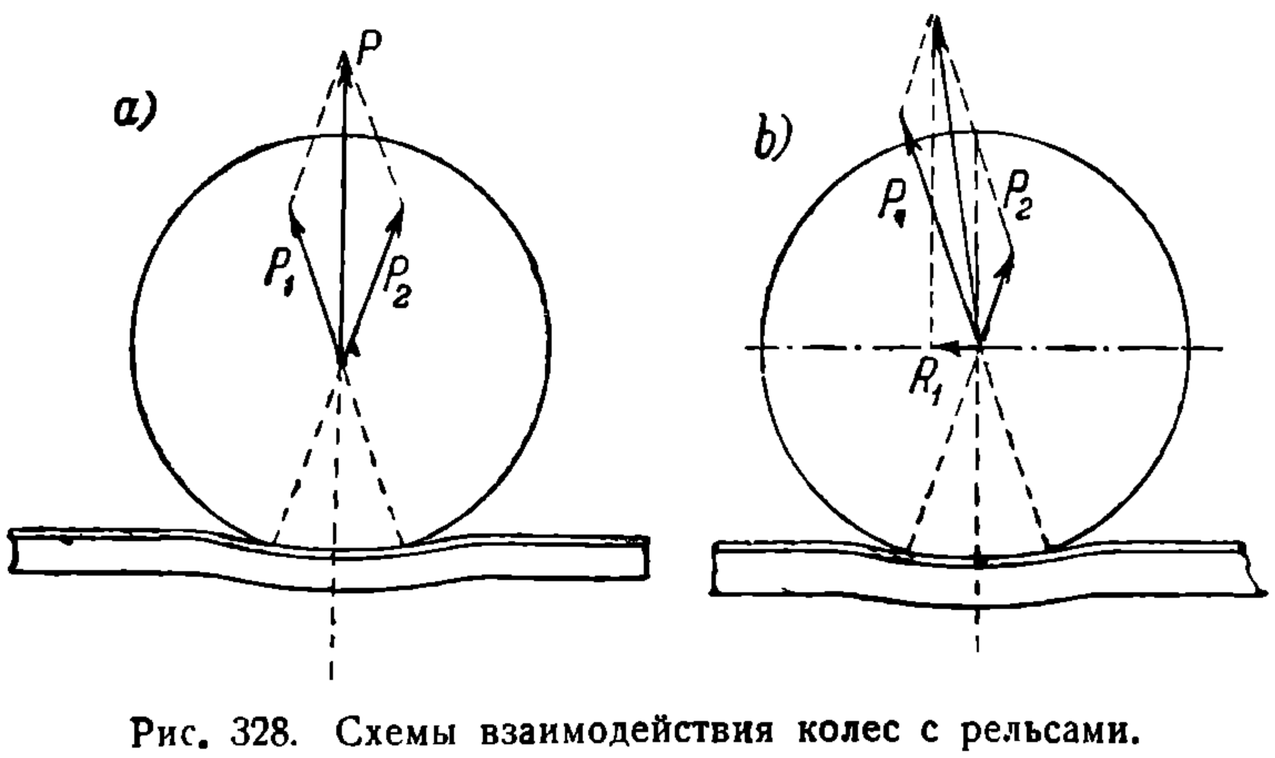


Рис. 328. Схемы взаимодействия колес с рельсами.

Из факторов, которые влияют на R_1, конечно, необходимо прежде всего считаться с давлением, причем величину R_1 считают пропорциональной давлению, так как чем выше давление, тем сильнее деформация. Кроме давления, на сопротивление качению должен оказывать влияние радиус окружности колеса. Чем меньше радиус колеса, тем глубже должно проникать колесо в рельсы, и тем, следовательно, сильнее должна быть деформация. Ввиду этого увеличение радиуса качения должно благоприятно отзываться на уменьшении сопротивления при качении. Скорость движения должна, вообще говоря, также оказывать влияние на рассматриваемое сопротивление. При увеличении скорости следует ждать некоторого уменьшения эффекта деформации, вследствие уменьшения времени соприкосновения каждого данного элемента колеса с рельсом. Колесо не успевает проникать глубоко в рельс. С другой стороны при увеличении скорости можно ожидать увеличения разности между P_1 и P_2 вследствие менее интенсивного эффекта последействия, так как материал рельсов не успевает отпружинивать и надавливать на быстро перемещающееся колесо. Нужно сказать, что из-за чрезвычайной сложности разбираемого процесса и, повидимому, незначительного результирующего эффекта влияния скорости последний фактор почти совершенно не выяснен, и поэтому обычно считают, что сопротивление качению не зависит от скорости. Точно так же пренебрегают и влиянием на сопротивление качению изменения температуры. Нужно указать, что само по себе сопротивление качению весьма невелико, составляя только незначительную часть общих сопротивлений при движении колеса по рельсам.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

Помимо разобранной деформации, неизбежной при всяком качении тела и имеющей местный характер непосредственно под каждым колесом, при определении сопротивления движению колес по рельсам приходится учитывать также и деформацию пути, обусловливаемую просадкой пути и прогибами рельсов под действием тяжести передвигающегося поезда. Картина такой деформации видна из рис. 329. При движении поезда путь под колесами деформируется, и вслед за поездом движется как бы волна деформации. Структура данной волны, ее длина и высота, зависят от самых разнообразных факторов: от материала и состояния пути, расстояния между колесами отдельных единиц поезда, длины поезда и многих других обстоятельств. Такая волна может захватывать или единичные колеса, или смежный ряд колес. Данное явление до настоящего времени почти совершенно не изучено. Одно только несомненно, что работа, необходимая для образования разбираемых деформаций, должна совершаться за счет добавочной энергии сети, так как сила тяжести совершать данную работу не может, ибо центр тяжести поезда и его частей при возникновении данной деформации не меняет своего положения по высоте. Для единичного колеса величину сопротивления движению, вызываемого данной деформацией, можно считать пропорциональной весу и средней стреле прогиба пути. Физически передачу сопротивления движению на подвижной состав можно объяснить себе так же, как в предыдущем случае, упругими действиями и последействиями деформаций. Данное явление вообще должно до известной степени зависеть от скорости движения, от базы подвижного состава и от длины поезда, но какова эта зависимость, на это достаточно уверенного ответа пока дать нельзя, так как явление это изучено очень мало.

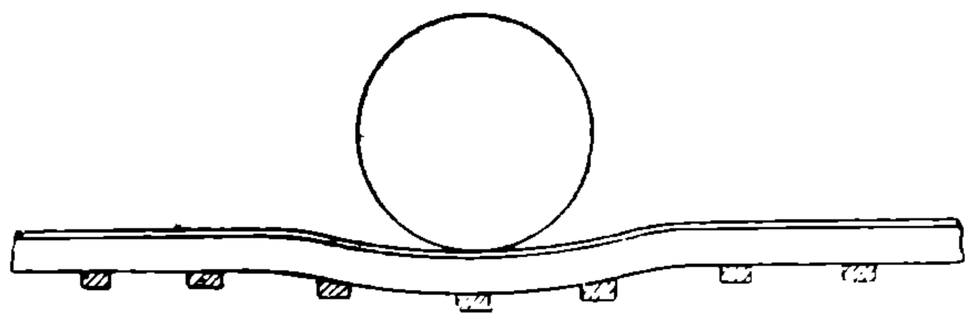


Рис. 329. Схема просадки пути при движении поезда.

Следующую категорию сопротивления движению по рельсовому пути составляет трение скольжения бандажа по головке рельсов. Нужно указать, что в чистом виде качение получать никогда нельзя. Для этого необходимо было бы иметь идеальные поверхности, при которых все элементы, в каждый данный момент принимающие участие в качении, имели бы идеально одинаковые скорости и проходили одинаковые пути. В действительности же элементы, принимающие участие в качении, из-за неточности обработки поверхностей и вследствие деформации, находятся на различных расстояниях от оси колес, и поэтому скольжение отдельных элементов неизбежно, причем часть их может проскальзывать в направлении движения, а другая часть — против него. Особенно интенсивно такое скольжение может проявляться при неравенстве по тем или другим причинам диаметров колес одной и той же оси.

Кроме указанного скольжения, неизбежно связанного с реальными условиями качения, приходится еще считаться со скольжением, вызываемым паразитными движениями подвижного состава. В этом отношении особенно опасны поперечные перемещения скатов по отношению к рельсам, вызывающие скольжение бандажа по рельсу, а также и реборды по боковой грани головки рельса. Точно разбираемый процесс до сего времени не изучен. Из числа факторов, которые здесь должны иметь влияние, приходится прежде всего считаться со скоростью движения. Однако, влияние ее должно сказываться в очень сложной форме. С одной стороны, эффект паразитных колебаний подвижного состава резко возрастает с увеличением скорости, с другой — трение скольжения с увеличением скорости характеризуется понижением коэфициента трения. Помимо скорости движения, на эффект данного сопротивления влияет состояние бандажей и рельсов. Имеет здесь также значение база подвижного состава, игра в его подшипниках и степень натяжения сцепных приборов.

Последнюю категорию сопротивлений при перемещении колеса по рельсам составляют всякого рода ударные эффекты, вызываемые неисправностью путей, наличностью стыков, а также и поперечным вихлянием подвижного состава. Разбираемое сопротивление зависит от скорости движения, причем, по данным проф. Петрова́, сопротивление от стыков должно зависеть от скорости в первой и второй степени. Естественно, что данное сопротивление должно возрастать с увеличением давления на ось. Зависит оно также от расстояния между стыками и величины просвета стыков.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Ввиду чрезвычайной сложности процесса движения колеса по рельсам, попытки дать надежные аналитические выражения для определения сопротивлений пути, даже таких выдающихся исследователей, как Петров, Wilson, Marschal, положительного результата не дали. Слишком сложен этот процесс. Единственный путь для количественного определения этих сопротивлений — эксперимент. Но и он представляет большие затруднения. Задача особенно осложняется, если поставить вопрос об определении каждой слагающей сопротивления в отдельности. Следует указать, что до сего времени такой эксперимент удовлетворительно не выполнен. Пока приходится ограничиваться представлением о суммарном сопротивлении пути, хотя и в этом отношении вполне исчерпывающего материала пока не имеется.

Ввиду того, что все отдельные категории рассмотренных сопротивлений зависят от давления на колеса, практически принимают, что значение суммарного сопротивления пути должно быть пропорционально весу поезда. Общую формулу для определения его принято применять в виде:

$$\Sigma R_1 = r_1 G \text{ kg}. \tag{230}$$

Здесь r_1 — удельное сопротивление в kg/t и G — вес подвижного состава в t.

Если учесть характер влияния скорости на сопротивление пути, то удельное сопротивление в общем случае должно быть подчинено зависимости:

$$r_1 = a + bv + cv^2, \tag{231}$$

где a, b и c — постоянные, зависящие от самых разнообразных факторов. На них влияют типы рельсов, тип подвижного состава, состояние рельсов в отношении загрязнения и изношенности, погода и ряд других обстоятельств. Нужно иметь в виду, что последние исследования сопротивления пути указывают на относительно весьма малое влияние на него членов, зависящих от скорости. В частности, влияние скорости на сопротивление от стыков, повидимому, значительно меньше, чем это предполагалось до последнего времени.

Опыты показывают, что рельсовый путь на собственном полотне дает меньшие сопротивления, чем пути, уложенные на уровне улиц. Главная причина этого кроется в том, что железнодорожный путь находится нормально в более чистом состоянии и более тщательно содержится и что при движении колеса реборда бандажа не встречает на своем пути грязи, камешков и прочих предметов, мешающих движению. Особенно сложен вопрос о сопротивлении пути для трамваев. Прежде всего возникает вопрос о том, насколько влияет на него загрязнение путей. В этом отношении довольно показательны опыты, произведенные автором для ленинградского трамвая. Оказывается, что нормальное загрязнение рельсов от осенней погоды, а также и легкий снежный покров особого влияния на сопротивление рельсов не оказывают. Точно так же существенного значения для условий Ленинграда не имел и тип рельсов. Сопротивления движению получались очень близкими друг к другу для желобчатого рельса и для рельса Виньоля. Нужно отметить, что по этому вопросу нет единства взглядов. Некоторые авторы полагают, что желобчатый рельс, вследствие перемещения реборды в жолобе, дает значительно большее сопротивление. Повидимому, главная причина имеющихся здесь расхождений кроется в состоянии пути при рельсах Виньоля. Чем ближе этот путь приближается по своему состоянию к железнодорожному, тем меньше он дает сопротивления. Играет здесь также роль и состояние подвижного состава. Общее рассмотрение данного вопроса заставляет, однако, полагать, что при расчетах рационально не разделять сопротивления трамвайного пути по категориям рельсов, а принимать эти сопротивления для рельсов Виньоля такими же, как и для желобчатых. В отношении числовых значений для сопротивления пути можно привести только ориентировочные данные. Следует считать, что в среднем для путей на собственном полотне при нулевых скоростях r_1 должно находиться в пределах от 0,5 до 1,5 kg/t, а для трамваев — от 1 до 3 kg/t. В отдельных случаях эти значения могут сильно возрастать, например, при значительном покрытии рельсов снегом r_1 может доходить до 15—25 kg/t.

2. Внутренние сопротивления подвижного состава.

Внутренние сопротивления подвижного состава обусловлены трением в его подшипниках. Механические потери двигателей в эти сопротивления нормально не включаются. Они учитываются коэфициентом полезного действия самих двигателей.

НБ УПУНТ (ДІІТ)

Сопротивления, зависящие от этих потерь, приходится включать в общую сумму сопротивлений только для периодов движения поезда без тока, когда эти потери покрываются не за счет энергии сети, а за счет инерции поезда.

В современных условиях изготовления подвижного состава применяются два вида подшипников — основанные на принципе скольжения и на принципе качения. Из этих двух типов доминирующее применение имеет первый. Соотношение усилий при этом типе подшипников показано на схеме рис. 330. Сопротивление движению получается здесь за счет момента силы трения:

$$M_{тр} = 1000\mu G \frac{d}{2} \text{ mkg}, \tag{232}$$

где μ — коэфициент трения, G — вес в t, приходящийся на подшипники, и d — диаметр шейки оси. При отнесении сопротивления движению, вызываемого этим моментом, к ободу колеса получается выражение:

$$R_2 = 1000\mu G \frac{d}{D} \text{ kg} \tag{233}$$

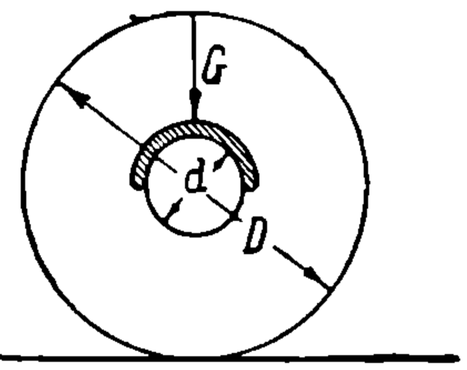


Рис. 330. Схема буксового вкладыша.

Отсюда удельное значение сопротивления:

$$r_2 = 1000\mu \frac{d}{D} \text{ kg/t}. \tag{234}$$

При определении r_2 главные трудности представляет установление величины μ. Разбираемый процесс принадлежит к типу трения тел, обильно смазанных, и подчиняется особой гидродинамической теории трения. Сущность его сводится к тому, что при движении оси между шейкой и вкладышем образуется жидкая пленка смазочного материала, которая отделяет металлы друг от друга. Благодаря этому, трение твердых тел фактически заменяется трением твердого тела и жидкости. Одним из основателей этой теории является проф. Петров. Кроме него, над этим вопросом работали Stribeck, Tower, Dettmar, Tarston, а также и известный теоретик Sommerfeld. Одним из главных условий надежной смазки является надлежащая вязкость смазочных материалов. Чем больше вязкость, тем более эластичная и надежная получается пленка.

Несмотря, однако, на работы упомянутых экспериментаторов и теоретиков, привести точные исчерпывающие данные о законе изменения коэфициента трения тел, обильно смазанных, не представляется возможным. В этом отношении наиболее солидными опытами следует считать опыты Tower'a, результаты которых объединены им в формуле:

$$\mu = k_1 \frac{\sqrt{v}}{p_0 T}, \tag{235}$$

где v — окружная скорость на шейке, p_0 — удельное давление на вкладыши и T — температура смазки в градусах Цельсия. Данная формула справедлива в пределах $v \leqslant 4$ m/sec, $p_0 \leqslant 44$ kg/cm^2 и T от 16 до 48° C. Другой экспериментатор, Tarston, на основании своих опытов пришел к другой зависимости:

$$\mu = k_2 \frac{\sqrt[5]{v}}{\sqrt{p_0}}. \tag{236}$$

Здесь v должно быть не больше 2,4 m/sec и p_0 не выше 35 kg/cm^2.

Опыты Tower'a и Tarston'a, давая в общем различные результаты, сходятся однако на том, что коэфициент трения должен возрастать со скоростью и уменьшаться с увеличением удельных давлений. Очень важны данные Tower'a в отношении влияния на μ температуры. Конечно, большое влияние на абсолютные значения μ оказывает тип смазки. Опыты Tower'a показали, что наиболее надежная смазка получается при погружении шейки в ванну со смазкой, а хуже всего идет смазка при фитильном типе. В подшипниках подвижного состава смазка чаще всего производится по способу, при котором под шейки обычно подкладывается набивка из конопли, шерсти или иногда специальные подушки. Следует указать, что при трогании поезда с места, а также и при очень низких скоростях коэфициент трения резко повышается. Объясняется это стеканием масла с шейки, вследствие чего прекращается образование пленки. После стоянки поезда может возникнуть процесс, близкий к трению металлов. Только при некоторой критической скорости, доста-

ЧНТУ УРУНТ (ДІІТ)

точной для засасывания смазки под вкладыши и образования пленки, коэфициент трения может принять свое нормальное значение (рис. 331).

Подшипники в подвижном составе электрических железных дорог, как было уже указано, разделяются на буксовые и моторноосевые. Первые являются основными, передающими давление кузова на оси. Вторые применяются только в моторных вагонах и электровозах, имеющих зубчатые передачи. Буксовые подшипники по большей части выполняются с одними верхними вкладышами, моторноосевые — с нижними и верхними. Буксовые подшипники работают в значительно лучших условиях, чем моторноосевые. Они лучше защищены от пыли и меньше подвержены паразитным перемещениям оси по отношению к вкладышам. Благодаря этому коэфициент трения для них получается более низким, чему также очень содействует и значительно более высокое удельное давление на их шейках. Удельное сопротивление движению, вызываемое буксовыми подшипниками, можно приближенно определить, исходя из средних значений $\mu = 0{,}0075$ и $\frac{d}{D} = 0{,}1$:

$$r_2 = 1000 \times 0{,}075 \times 0{,}1 \cong 0{,}75 \text{ kg/t}.$$

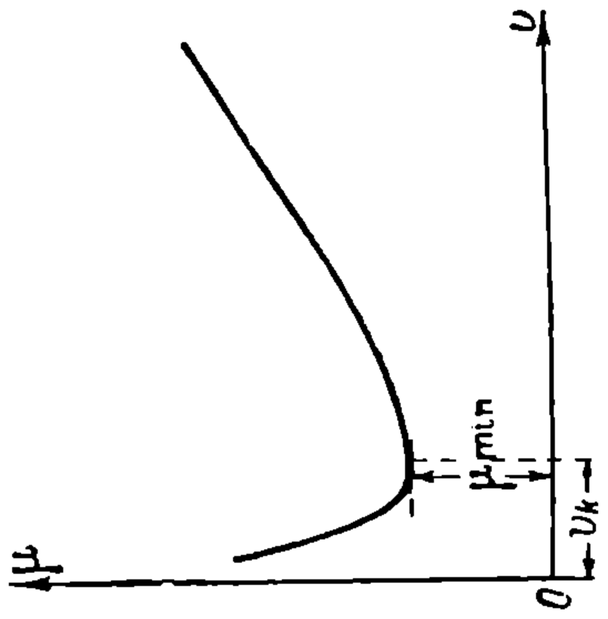


Рис. 331. Кривая изменения коэфициента трения тел, обильно смазанных, в зависимости от скорости.

Практически эта величина может достигать и значительно бо̀льших значений из-за добавочного трения на закраинах шеек осей, а также всякого рода дефектов в сборке. При моторноосевых подшипниках коэфициент μ сильно возрастает. Несмотря на то, что давление двигателей на оси в несколько раз меньше давления кузова, в силу возрастания нужно ждать от моторноосевых подшипников добавочного сопротивления движению такого же порядка, как и от буксовых. Суммарное значение тех и других сопротивлений движению получается в пределах от 0 5 до 2,5 kg/t. Следует иметь в виду, что потери в моторноосевых подшипниках часто включаются в потери передаточного механизма. В этом случае они учитываются общим к. п. д. двигателей.

Значительное применение в настоящее время начинают получать роликовые подшипники. Применяются ролики, главным образом, для буксовых подшипников. Для моторноосевых они пока применения не находят, что объясняется несколько затрудненным монтажом и значительной стоимостью этих подшипников. Преимущество их прежде всего состоит в очень сильном снижении потерь на трение. По имеющимся опытным данным, коэфициент трения для них получается порядка 0,0008—0,0015, тогда как для скользящих подшипников он колеблется в пределах 0,005—0,01. При таких условиях сопротивление движению естественно сильно понижается. По опытам шведских железных дорог переход от подшипников скольжения к роликовым дал понижение общего сопротивления движению при малых скоростях с 1,5 до 1 kg/t. Большим преимуществом роликовых подшипников является относительно малое влияние скорости на коэфициент трения. Очень ценно, что при них трогание поезда с места не сопровождается значительным увеличением сопротивления движению, как это бывает при подшипниках скольжения. Табл. 48, содержащая опытные данные для удельных сопротивлений при трогании с места, иллюстрирует сказанное.

ТАБЛИЦА 48.

Сопротивления движению при трогании поезда с места.

Данные опытов	Удельные сопротивления движению в kg/t для подшипников скольжения	Удельные сопротивления движению в kg/t для роликовых подшипников
Adler'a для трамвайного моторного вагона . .	17,5	5,5
То́ же для прицепного .	8,6	2,1
Rydberg'a для железнодорожных вагонов .	10—19	1,3—4,1
Рэтийской железной дороги .	4,1—14,9	1,3—1,46

НБ УДУНТ (ДІІТ)

3. Сопротивление воздушной среды.

Сопротивление движению, оказываемое воздушной средой, подчиняется очень сложной зависимости Наблюдения показывают, что при движении поезда вместе с ним передвигаются и прилегающие к нему массы воздуха. Рис. 332 дает представление о спектре, образуемом воздушной средой вокруг движущегося поезда. Наиболее характерной особенностью этого спектра являются передний конус сжатия воздушной среды и задний конус разрежения. Оба эти конуса являются источниками лобовых сопротивлений. Первый оказывает давление непосредственно на переднюю стенку головной единицы поезда, второй путем всасывания действует задерживающим образом на задний конец поезда. Помимо лобовых воздействий,

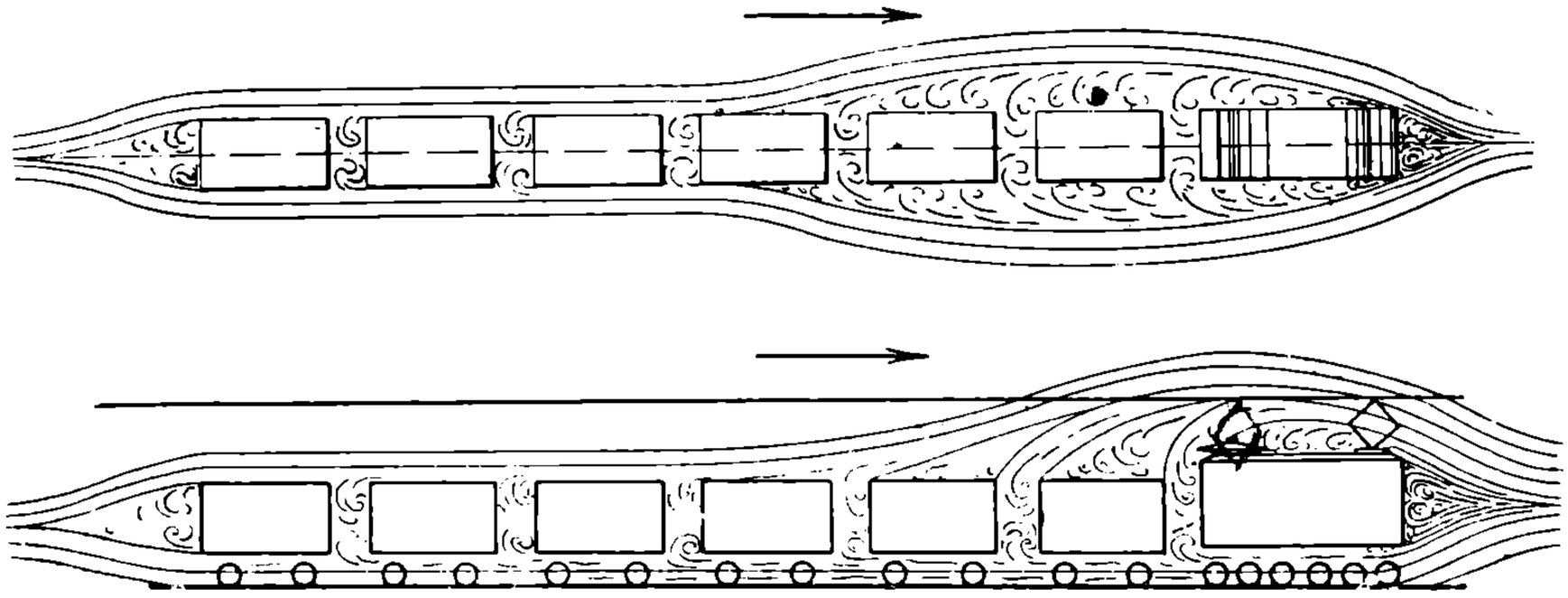


Рис. 332. Воздушный спектр при движении поезда.

на сопротивление воздуха оказывает влияние трение воздушных частиц о боковые поверхности подвижного состава. Приходится здесь также учитывать и влияние вихревых движений воздуха, особенно резко проявляющихся, как видно из приведенного спектра, на угловых гранях подвижного состава.

На основании общих законов аэродинамики лобовое сопротивление воздушной среды может быть представлено формулой:

$$R'_в = k_1 S_1 \left(\frac{v}{10}\right)^2 \text{kg}. \qquad (237)$$

Здесь v в km/h — скорость движения поезда, S_1 в m^2 — площадь проекции подвижного состава на плоскость перпендикулярную направлению движения, и k_1 — коэфициент воздушного сопротивления. Последний очень сильно зависит от формы лобовых стенок подвижного состава. Более или менее надежно этот коэфициент может быть установлен только опытным путем. Значения его по данным лабораторных исследований Kernot'a для различных конфигураций поверхностей приведены в табл. 49

ТАБЛИЦА 49.
Коэфициенты воздушного сопротивления.

Типы поверхностей	k_1
Плоская поверхность .	0,72
Восьмигранная призма	0 45
Цилиндрическая поверхность	0,375
Сферическая поверхность .	0,263

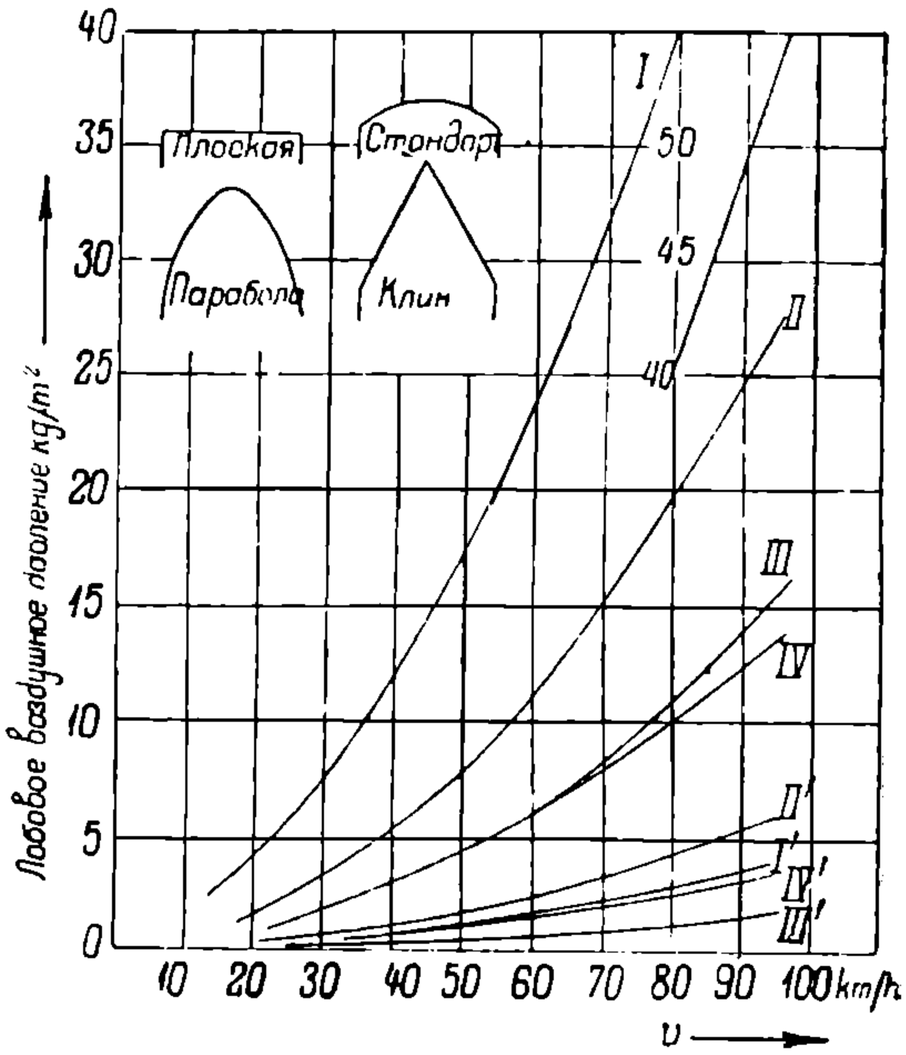
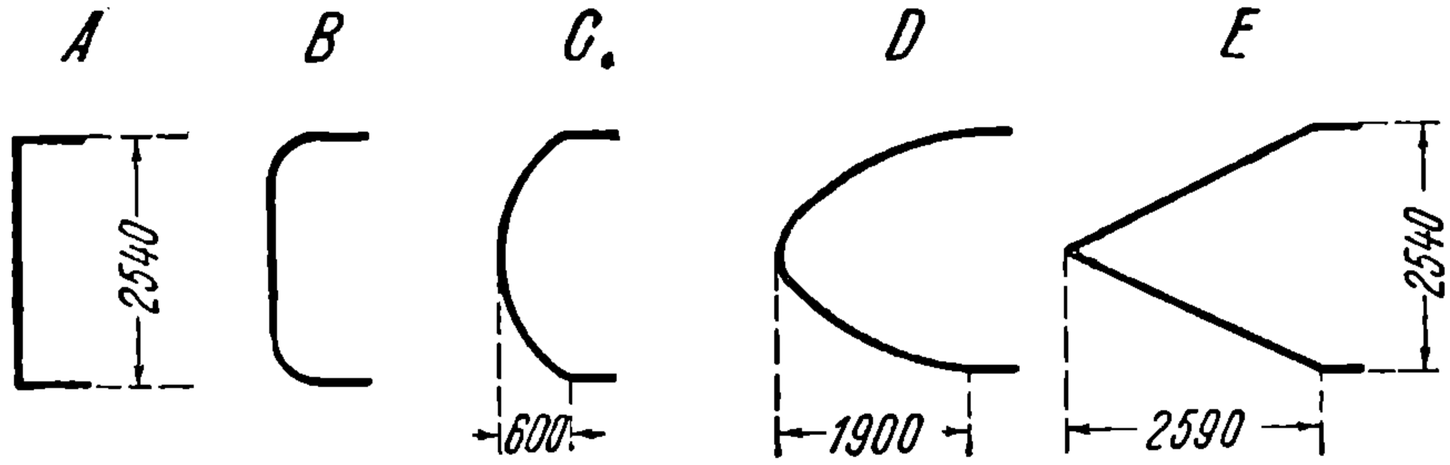


Рис. 333. Усилия давления и разряжения, полученные от воздушной среды на лобовых частях вагона в опытах комиссии S. Louis.

Очень интересны и важны по своим данным исследования воздушного коэфициента, произведенные особой исследовательской комиссией американского города S. Louis. Опыты эти производились на специально построенном вагоне „Louisiana“,

НБ УДУНТ (ДІІТ)

в котором были сделаны передние и задние стенки приставными. Сопротивление определялось с помощью динамометров, вставляемых между кузовом и этими стенками. Результаты опытов даны на рис. 333. Кривые *I* относятся к плоским стенкам, *II* — к нормальному стандарту американских вагонов, *III* — к параболической форме и *IV* — к параболо-клинообразной, причем цифрами без значков изображены сопротивления головной части вагона, а со значками — сопротивления от всасывающего эффекта хвостовой части. Если проанализировать приведенные кривые и определить по ним коэфициенты k_1 применительно к формуле (237), то значения последнего не будут оставаться постоянными, а будут несколько вариировать, имея тенденцию понижаться с увеличением скорости. Это обстоятельство позволяет думать, что R'_v пропорционально не точно скорости в квадрате, а в степени несколько меньшей. К такому же заключению приводят последние данные об условиях движения при ультравысоких скоростях. Естественно, что при таких условиях при применении формулы (237) нельзя рассчитывать на совершенно точный учет воздушного сопротивления.



$k_1 = 0{,}75$ $k_1 = 0{,}58$ $k_1 = 0{,}4$ $k_1 = 0{,}2$ $k_1 = 0{,}19$

Рис. 334. Средне-расчетные коэфициенты воздушного лобового сопротивления при различной конфигурации лобовых поверхностей подвижного состава.

Кроме опытов испытательной комиссии St. Louis, определение воздушного коэфициента было произведено также во время хорошо известных в тяговой литературе опытов на германской дороге Berlin-Zossen. Опыты эти производились с двумя большими моторными вагонами, причем скорости доводились до 175—200 km/h. Воздушные давления здесь определялись с помощью динамометров, но только с одной головной стороны. Влияние разрежения не учитывалось. По данным этих опытов, коэфициент k_1 оказался равным около 0,52, причем передняя стенка вагонов имела плоскую форму с закругленными угловыми гранями. Примерно такие же опыты производил и английский исследователь Aspinall, пришедший к цифре 0,56.

Если учесть результаты всех указанных опытов и включить в значения воздушного коэфициента влияние разрежения воздуха сзади поезда, то в среднем их можно принять для различных форм лобовых стенок подвижного состава согласно рис. 334.

Что касается сопротивления, вызываемого трением воздушных частиц о боковые поверхности подвижного состава, то его точное определение встречает еще большие затруднения. Экспериментальное лабораторное исследование поверхностного трения для гладкого цилиндра приводит к очень сложной зависимости:

$$R''_s = k''(vL)^{-0{,}15} v^2 S_2 \text{ kg}. \qquad (238)$$

В этом выражении k'' — опытный коэфициент воздушного бокового трения, определяемый лабораторными исследованиями в 0,000034; L в m и S_2 в m² — длина и боковая поверхность рассматриваемого тела. Приведенная формула для практических целей мало пригодна. Прежде всего, по данным Morain'a, коэфициент k'' для реальных очертаний боковых поверхностей подвижного состава, с учетом влияния промежутков между отдельными вагонами, приблизительно в четыре раза больше, чем для гладкого цилиндра. Кроме того, и самая форма выражения (238) представляется мало пригодной для вычислений. Ввиду этого, для практических целей рационально упростить данное выражение. Очень удобно его представить в виде:

$$R''_s = k_2 S_2 \left(\frac{v}{10}\right)^2. \qquad (239)$$

Здесь коэфициент k_2 имеет выражение:

$$k_2 = k''(vL)^{-0{,}15} 10^2. \qquad (240)$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Для загородных вагонов, учитывая относительно небольшое влияние члена $(vL)^{-0,15}$ в среднем, величина k_2 может быть принята равной:

$$k_2 = 0{,}0051.$$

Для вагонов трамвайного типа также для средних соотношений:

$$k_2 = 0{,}0064.$$

Значение бокового и промежуточного сопротивлений воздушной среды возрастает по мере увеличения длины поездных составов. При больших составах это сопротивление, по сравнению с лобовым, является доминирующим. Общая формула для воздушного сопротивления поезда, состоящего из n вагонов, должна быть представлена в виде:

$$R_в = (k_1 S_1 + k_2 S_2 n)\left(\frac{v}{10}\right)^2 \text{ kg}. \qquad (241)$$

При рассмотрении вопроса о воздушных сопротивлениях предполагалось, что поезд движется в спокойной воздушной среде. В случае ветра это сопротивление должно измениться. При скорости ветра, равной $v_в$, формула (241) должна получить вид:

$$R_в = (k_1 S_1 + k_2 S_2 n)\left(\frac{v \pm v_в}{10}\right)^2 \qquad (242)$$

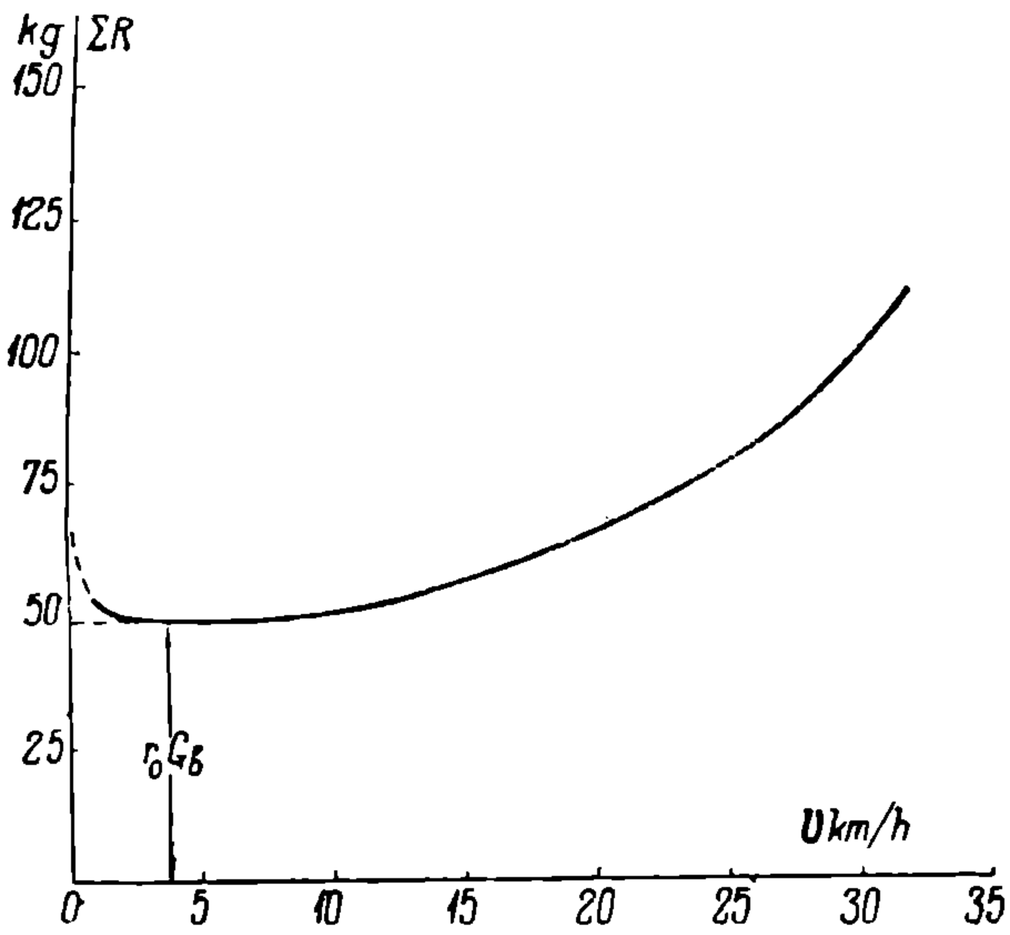


Рис. 335. Кривая общих сопротивлений трамвайного вагона.

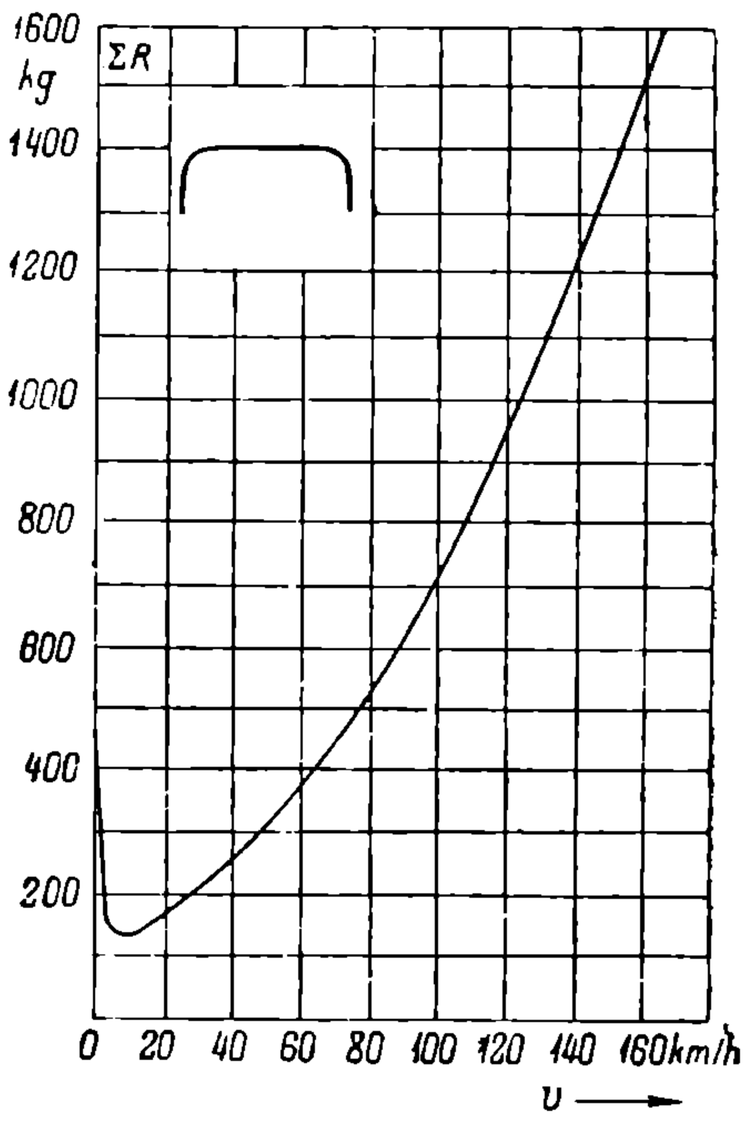


Рис. 336. Кривая общих сопротивлений вагона в опытах дороги Berlin-Zossen.

Знак плюс здесь надо относить к встречному ветру, а минус — к попутному. В случае ветра, направленного наклонно к направлению движения поезда, картина воздушного сопротивления сильно осложняется. Ветер может тогда проникать в междувагонные промежутки, что при большом количестве вагонов должно повлечь за собой значительное увеличение общего воздушного сопротивления. При практических расчетах учесть влияние ветра очень трудно. В большинстве случаев направление ветра по отношению к направлению движения поезда меняется, и потому даже для определенных местностей влияние ветра с трудом поддается учету. Вот почему в тяговых расчетах ветром нормально пренебрегают, полагая, что в общем влияние его нейтрализуется.

4. Общие сопротивления движению поезда.

При выполнении тяговых расчетов приходится оперировать с общими сопротивлениями движению поезда. Значения их устанавливаются на основании экспериментальных данных. В качестве образцов экспериментальные кривые сопротивлений движению приведены на рис. 335 и 336. Первая кривая, полученная автором на основании исследования подвижного состава ленинградских железных дорог, отно-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

сится к хорошо собранному трамвайному моторному вагону. Вторая кривая приведена на основании опытов железной дороги Berlin-Zossen. Обе кривые дают весьма характерную картину изменения сопротивления. Когда скорость падает ниже некоторой критической величины, сопротивление перестает уменьшаться и по мере приближения к нулевой скорости начинает быстро повышаться. Причина этого явления, как было уже указано, заключается в повышении коэфициента трения подшипников подвижного состава. При роликовых подшипниках такого повышения ждать не приходится.

Для тягового расчета сопротивления движению поезда определяются с помощью формул, предложенных различными авторами на основании опытных данных. Ниже приводится ряд наиболее известных эмпирических формул. Их можно разбить по строению на три категории. К первой принадлежат формулы, выведенные для определенных типов поездов как в отношении общего веса, так и в отношении нагрузки отдельных осей. Они построены в зависимости только от скорости. Таковы среди нижеприводимых формулы Baldwin'a, Sanzin'a и вообще все те, которые построены только в функции от скорости. Ко второй категории относятся формулы, пригодные для различных весов поездов и содержащие особые члены для определения воздушных сопротивлений, как, например, формулы Frank'a. К третьей категории принадлежат формулы, учитывающие влияние различных нагрузок вагонов или давлений на оси. В качестве примера формул такого типа могут служить формулы Davis'a.

Обозначения, принятые в приводимых формулах, таковы: G_n, $G_в$ и G_o — вес поезда, вагона и вес, приходящийся на каждую ось, в t; S_1 — площадь проекции локомотива или переднего вагона на плоскость нормальную к оси пути в m^2, λ — отношение S_1 соответственно к S прочих вагонов поезда; n — число вагонов (включая и электровоз) в поезде; l — длина каждого вагона в m.

Сопротивление движению пассажирского поезда.

Формула Sanzin'a при учете только вагонной части поезда:

$$r = 1{,}6 + 0{,}00456v + 0{,}000456v^2 \text{ kg/t}. \tag{243}$$

Формула Frank'a с учетом электровоза:

$$r = 2{,}5 + 0{,}0142\left(\frac{v}{10}\right)^2 + \frac{0{,}54}{G_n}\left[1{,}1S_1 + 2 + A(n-2)\right]\left(\frac{v}{10}\right)^2 \text{ kg/t}, \tag{244}$$

где

$$A = 0{,}56.$$

Формула Ломоносова для 4-осных вагонов без электровоза:

$$r = 1{,}4 + \frac{v}{50} + \frac{v^2}{5000} \text{ kg/t}. \tag{245}$$

Формула для 2- и 3-осных пассажирских вагонов без электровоза:

$$r = 1{,}6 + 0{,}027v + 0{,}0003v^2 \text{ kg/t}. \tag{246}$$

Формула австрийских железных дорог без учета электровоза:

$$r = 2{,}5 + 0{,}05\left(\frac{v}{10}\right)^2 \text{ kg/t}. \tag{247}$$

Формула Borries'a без учета электровоза:

$$r = 1{,}5 + 0{,}12\frac{v}{10} + \left(\frac{0{,}3}{G_o} + 0{,}2\right)\frac{v^2}{1000} \text{ kg/t}. \tag{248}$$

Формула Strahl'я без учета электровоза:

$$r = 2{,}5 + \frac{1}{G_в}\left(\frac{v}{10}\right)^2 \text{ kg/t}. \tag{249}$$

Формула по данным Davis'a:

$$r = 0{,}65 + \frac{13{,}2}{G_o} + 0{,}0094v + \frac{S}{G_n}\left[0{,}0045\lambda + 0{,}00064\,(n-1)\right]v^2 \text{ kg/t}. \tag{250}$$

В отношении формулы Davis'a следует иметь в виду, что в своей работе он дал сопротивления отдельно для вагонов и электровозов. Для того, чтобы облегчить расчеты, отдельные формулы здесь скомбинированы в общее выражение сопротивления движению всего поезда, с учетом нормальных средних соотношений весов электровоза и прицепной части. Это же следует иметь в виду и по отношению к последующим формулам Davis'a.

НБ УДИНТ (ДІІТ)

Формула Dower'a с учетом электровоза:

$$r = 0{,}81 + (0{,}0512 - 0{,}011 \lg G_n)\, v + \frac{S}{G_n}(0{,}0053\lambda + 0{,}000075nl)\, v^2 \text{ kg/t.} \quad (251)$$

Сопротивление движению товарных поездов при двухосных вагонах.

Формула Baldwin'a при учете вагонной части без электровоза:

$$r = 1{,}5 + \frac{v}{20} \text{ kg/t.} \quad (252)$$

Формула австрийских железных дорог без электровоза:

$$r = 2{,}5 + 0{,}07\left(\frac{v}{10}\right)^2 \text{ kg/t.} \quad (253)$$

Формула Sanzin'a без электровоза:

$$r = 1{,}8 + 0{,}1\left(\frac{v}{10}\right)^2 \text{ kg/t.} \quad (254)$$

Формула немецких инженеров без электровоза:

$$r = 2{,}4 + 0{,}1\left(\frac{v}{10}\right)^2 \text{ kg/t.} \quad (255)$$

Формула Frank'a — в той же форме, какая приведена выше, но только с коэфициентом A, равным для товарных крытых вагонов 0,32 и для платформ — 0,16.

Формула железных дорог СССР без электровоза:

$$r = 1{,}5 + \left(0{,}02 + \frac{0{,}5}{G_в}\right) v \text{ kg/t.} \quad (256)$$

Формула по данным Davis'a при нагрузке на ось не меньше 5t:

$$r = 0{,}65 + \frac{13{,}2}{G_0} + 0{,}014v + \frac{S}{G_n}[0{,}0045\lambda + 0{,}00094(n-1)]\, v^2 \text{ kg/t.} \quad (257)$$

Формула Strahl'я без электровоза:

$$r = 2{,}5 + \frac{0{,}75}{G_в}\left(\frac{v}{10}\right)^2 \text{ kg/t.} \quad (258)$$

Обращается внимание на то, что для порожних товарных поездов удельное сопротивление значительно выше, чем для груженых. Ввиду этого при подсчете сопротивлений их движению не рекомендуется пользоваться формулами (252, 253, 254 и 255), справедливыми только для груженных составов. В соответствии с этим здесь нужно применять такие формулы, в которых учитывается влияние веса вагона или нагрузки на оси, т. е. формулы (256, 257 и 258).

Сопротивление движению товарных четырехосных вагонов. Удельные сопротивления движению тяжелых четырехосных вагонов, как показывают опыты, ниже сопротивлений движению двухосных. Объясняется это бо́льшими нагрузками на ось, имеющими следствием некоторое понижение коэфициента трения в буксовых подшипниках, а также и меньшим влиянием воздушной среды на общее сопротивление движению. Из имеющихся опытных данных по определению сопротивлений движению четырехосных вагонов особого внимания заслуживают опыты Иллинойского университета, результаты которых представлены в виде кривых на рис. 337. По данным этих кривых результаты опытов с допустимой степенью точности могут быть сведены в формулу:

$$r = \frac{v + 65}{12 + 0{,}55G_в} \text{ kg/t.} \quad (259)$$

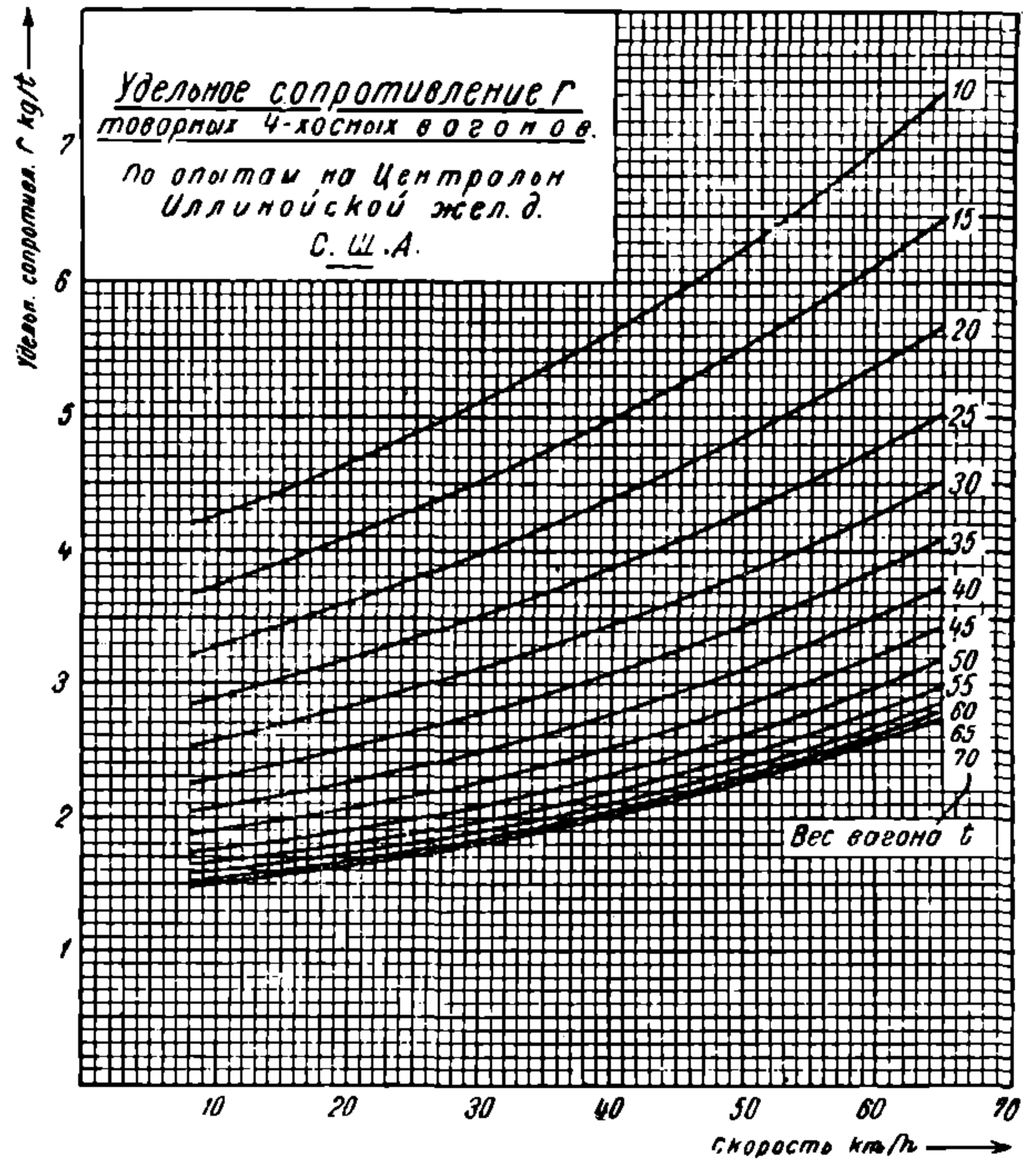


Рис. 337. Кривые сопротивлений движению по опытным данным.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Кроме приведенной формулы, для определения сопротивления четырехосных вагонов можно пользоваться также формулой Davis'a (257).

Сопротивление движению электровозов. Большинство приведенных формул дает сопротивления движению поездов без особого учета влияния электровозов на это сопротивление. Исключение представляют формулы Frank'a, Davis'a и Dover'a, пытающиеся учесть это влияние. Введение в формулы особых сопротивлений движению электровозов практически представляет значительные затруднения. Прежде всего, до настоящего времени нет достаточно надежных данных по их определению. Современные электровозы характеризуются чрезвычайным разнообразием конструкций. Форма кузова и ходовых частей электровоза, его передаточный механизм, давление на оси, та или другая форма бегунковых приспособлений, состояние сборки и целый ряд других факторов должны оказывать существеннейшее влияние на величину сопротивлений его движению. Далее, по мнению ряда специалистов, как, например, Carter'a, сопротивление движению электровоза, нормально ведущ го поезд, должно быть ниже, чем при движении его в одиночку, так как поездной состав в отношении всякого рода паразитных колебаний действует на локомотив сдерживающим образом. С этим приходится считаться, так как сопротивление движению электровозов в большинстве опытов определяется по работ их в одиночку. Кроме того, при корректировании формул сопротивлений движению добавлением сопротивлений движению электровозов есть опасность два раза учесть лобовое воздушное сопротивление.

Для иллюстрации сопротивлений движению электровозов дана табл. 50, в которой приводится наиболее интересный материал по данному вопросу.

ТАБЛИЦА 50.

Сопротивления движению электровозов для различных скоростей в km/h.

Типы электровоза	Сопротивления в kg/t					
	0	10	20	40	60	80
Электровоз постоянного тока 1-4A-1 по опытам Wilson'a и Carter'a . .	3	2,6	2,5	3,2	4,25	5,5
То же дороги N.C.R.R.	2,5	2,25	2,4	3,2	4,5	6,25
Электровоз австрийских железных дорог однофазного тока 1-C-1	2,3	3,0	3,7	5,1	6,5	7,2
Такого же типа	1,3	2,1	2,9	4,5	6,1	7,7
Электровоз Лебчергской железной дороги однофазного тока O-C-C-O	3,56	3,76	4,2	6,27	9,48	14,8
Электровоз Вальтелинской железно і дороги трехфазного тока 1-C-1	2,1	1,75	2,2	3,8	6,0	9,7
Электровоз СССР типа ВЛ	4,1	4,24	4,66	6,34	9,14	—

Из табл. 50 видно, что сопротивления электровозов с рычажными передачами, особенно электровозов Лебчергской и Вальтелинской железных дорог с увеличением скорости растут быстрее, чем при индивидуальных передачах.

При установлении расчетных сопротивлений движению электровозов для введения их в общее сопротивление движению поезда можно пользоваться данными приведенной таблицы. Иногда рекомендуют вместо этого принимать электровозные сопротивления по формуле Baldwin'a (252). Можно пользоваться также формулой австрийских железных дорог:

$$r = 1{,}8 + 0{,}075v \text{ kg/t}. \tag{260}$$

Для электровоза СССР типа ВЛ на основании опытов получена формула:

$$r = 1{,}5 + 0{,}0012v^2 \text{ kg/t}. \tag{261}$$

Формула Japiot, на основании опытов со скорыми электровозами дороги Paris—Orléans, имеет вид:

$$r = 3{,}7 + \frac{v(v-20)}{1000} \text{ kg/t}. \tag{262}$$

Наконец, формула Davis'a:

$$r = 0{,}65 + \frac{13{,}2}{G_0} + 0{,}0094v + \frac{0{,}0045Sv^2}{G_0} \text{ kg/t}. \tag{263}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Для индустриальных электровозов — та же формула, но только вместо члена 0,0094 v следует вводить 0,014 v.

Из приведенных формул следует, что сопротивление движению электровозов имеет величину того же порядка, что и сопротивление движению вагонов. Ввиду этого, особенно учитывая отмеченные выше неточности при совмещении сопротивлений движению вагонов и электровозов, практически очень часто сопротивление движению локомотива особо не вводят в расчет, принимая его таким же, каково оно для прицепной части составов. Однако, данный метод, если его и можно считать практически допустимым для нормальных вагонов, не может быть рекомендован для товарных поездов, состоящих из тяжелых четырехосных вагонов, сопротивление движению которых в груженом состоянии значительно ниже сопротивления движению электровозов. Здесь рационально сопротивление последних учитывать особо. Кроме указанного нужно иметь в виду, что большинство данных табл. 50, а также и данные формулы для сопротивлений движению электровозов, за исключением формул (261 и 263), нужно относить к движению электровозов без тока при свободном выбеге. При переходе к движению под током из сопротивлений, получаемых при движении без тока, следует удалить сопротивления, вызываемые механическими и воздушными потерями в двигателях. Впрочем, нужно отметить, что, если не имеется определенных данных о потерях самих двигателей, большой ошибки не будет при пользовании приведенными формулами без указанного корректива, так как значение общих сопротивлений прицепной части поезда нормально значительно выше сопротивлений электровоза.

Сопротивление движению моторвагонных поездов электрических железных дорог. К поездам, состоящим из моторных и прицепных вагонов и находящимся в движении на дорогах с собственным полотном, следует применять специально предназначенные для этого формулы.

Формула Dover'a при допущении для лобовой плоской стенки вагона $\alpha = 1$, для нормальной американской $\alpha = 0{,}65$ и параболической $\alpha = 0{,}3$:

$$r = 1{,}83 + 0{,}0153v + \frac{S}{G_n}(0{,}0053\alpha + 0{,}000075nl)v^2 \text{ kg/t}. \qquad (263)$$

Формула на основании работы Davis'a:

$$r = 0{,}65 + \frac{13{,}2}{G_0} + 0{,}014v + \frac{S}{G_n}[0{,}0045 + 0{,}00064(n-1)]v^2 \text{ kg/t}. \qquad (264)$$

Формула Pforr'a:

$$r = 2{,}5 + 0{,}00015\,v^2 + \frac{[0{,}00655S + 0{,}00813\,(n-1)]\,v^2}{G_n} \text{ kg/t}. \qquad (265)$$

Формулы Dover'a и Dawis'a нужно относить к движению под током, а Pforr'a — к движению без тока.

Формула Frank'a может быть применена в таком же виде, как и для пассажирского поезда (244).

Сопротивления движению трамвайных поездов. При выводе расчетных формул сопротивлений движению для трамвайных условий встречаются большие затруднения. Имеющиеся по этому вопросу исследования дают очень сильно колеблющиеся значения. Подтверждением этого может служить табл. 51, составленная на основании опытов Volkers'a с вагонами берлинского трамвая (Л. 137). Таблица дает результаты исследования 47 вагонов. Следует отметить, что при плохо отрегулированных колодках сопротивления имеют резкую тенденцию к возрастанию.

ТАБЛИЦА 51.

Сопротивления движению трамвайных вагонов по опытам Volkers'a.

Сопротивление движению в kg/t	5	5,1—6	6,1—18	8,1—10	10,1—19,8
Количество вагонов, давших данное сопротивление	10	14	14	6	3

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Опыты, произведенные в Ленинграде, также подтверждают сильное колебание сопротивлений движению. Характерно, например, что при опытах, произведенных автором, сопротивление движению для прицепного вагона получалось в два раза выше, чем для моторного (Л. 203). Очень ценны опыты, произведенные техническим отделом ленинградского трамвая (Л. 204). Они так же, как и опыты автора, показали относительно малое влияние на сопротивление типа рельсового пути, его состояния, а также и погоды. Главная причина сильного возрастания сопротивлений движению, очень частое на трамваях, — плохое состояние вагонов. Это заключение, конечно, нужно относить к средне-эксплоатационным условиям. Если путь недопустимо разбит или если пути покрыты снегом, то и от этих причин сопротивления могут сильно возрасти. Те же опыты подтвердили также влияние на удельные сопротивления нагрузок вагонов. Основные результаты испытаний технического отдела ленинградского трамвая помещены в табл. 52.

ТАБЛИЦА 52.

Сопротивления движению трамвайных вагонов ленинградского трамвая в kg/t.

Тип поезда	Количество испытанных поездов	Вес в t	r_o	r_v	$r_в$	$r_м$	$r_o + r_м$
Моторный вагон без нагрузки . .	13	13,13	4,6	10,9	3,17	3,13	7,73
Моторный вагон с нагрузкой 5 t	5	18,08	3,5	8,6	2,3	2,8	6,3
Поезд из моторного и прицепного вагонов без нагрузки	7	21,09	3,7	8,3	2,17	2,43	6,13
Поезд с нагрузкой 9,9 t .	4	30,41	2,5	6,3	1,54	2,26	4,76

Сопротивление r_o в этой таблице соответствует таковому же на рис. 335. Сопротивление r_v означает сопротивление при $v = 36$ km/h, $r_в$ — сопротивление воздушной среды, вычисленное аналитически, и $r_м$ — скоростную прибавку, вызываемую механическими сопротивлениями. Из имеющихся данных следует, что в условиях трамвайного движения получаются очень большие значения механических сопротивлений движению, изменяющихся, как показывают опыты, приблизительно пропорционально квадрату скорости.

Эмпирических формул для определения сопротивления при трамвайном движении имеется очень мало. Заслуживает внимания формула технического отдела ленинградского трамвая для поезда, состоящего из моторного и прицепного вагонов:

$$r = 3{,}5 + 0{,}55\left(\frac{v}{10}\right)^2 \text{ kg/t.} \qquad (266)$$

Для того чтобы дать расчетную формулу сопротивления для общего случая трамвайного движения, автор проанализировал имеющийся, — нужно сказать, довольно скудный — материал по данному вопросу. В результате наиболее подходящее выражение для общей формулы было получено в виде:

$$r = \frac{18 + \left(\frac{v}{10}\right)^2}{\sqrt{G_n}} + \frac{S}{G_n}(0{,}43 + 0{,}06n)\left(\frac{v}{10}\right)^2 \text{kg/t.} \qquad (267)$$

Первый член дает механические сопротивления. Имеющиеся опытные данные с несомненностью показывают, что эта часть удельных сопротивлений как независящая, так и зависящая от скорости, убывает с увеличением нагрузки поезда. Здесь достаточно хорошо подходит, как следует из опытов ленинградского трамвая, обратная пропорциональность корню квадратному из веса поезда. Второй член рассматриваемой формулы выражает сопротивления воздушной среды. Коэфициенты для этого члена взяты на основании данных Иллинойского университета и формулы Davis'a. Следует иметь в виду, что формула (267) предполагает хорошо собранный подвижной состав, находящийся в хорошем состоянии. Для среднеэксплоатационных условий можно ждать бо́льших значений сопротивлений, чем по данным формулы (267). В таких случаях предлагается пользоваться формулой:

$$r = \frac{25 + \left(\frac{v}{10}\right)^2}{\sqrt{G_n}} + \frac{S}{G_n}(0{,}43 + 0{,}06n)\left(\frac{v}{10}\right)^2 \text{kg/t.} \qquad (268)$$

НВ УДУНТ (ДІІТ)

Все разобранные данные о сопротивлениях при трамвайном движении относятся к двухосным вагонам. Данных о сопротивлениях четырехосных вагонов имеется еще меньше. Отдельные опыты, производимые по выяснению этого вопроса, как, например, Volkers'ом, показывают, что эти сопротивления могут иногда быть не ниже, а даже несколько выше, чем для двухосных вагонов. Вообще дать достаточно обоснованную формулу для установления искомых сопротивлений пока не представляется возможным за неимением достаточного материала. В частности опыты, произведенные Ленинградским индустриальным институтом с поездом из двух четырехосных вагонов, показали, что сопротивление этого типа вагонов значительно ниже сопротивлений двухосных. Для весьма ориентировочных подсчетов можно исходить из тех же формул (267 и 268), но только беря вместо $\sqrt{G_n}$ значение $\sqrt{0{,}8G_n}$, что будет давать для четырехосных вагонов сопротивления, близкие к сопротивлениям двухосных.

Сопротивление движению в тоннелях. Формула Parchal'я и Hobart'a, пригодная для поездов при 2—4 вагонах в составе:

$$r = 2{,}7 + 0{,}09\,\frac{v^2}{G_n}\ \text{kg/t}. \tag{269}$$

На основании опытов американских подземных железных дорог можно предложить такую формулу:

$$r = 2{,}5 + \frac{0{,}8 + 0{,}2n}{G_n}\,v\,\sqrt{v}\ \text{kg/t}. \tag{270}$$

Как видно из этих формул, сопротивления в тоннелях получаются значительно более высокими, чем в нормальных условиях движения.

5. Влияние на сопротивления движению температуры.

Понижение температуры воздуха действует в сторону повышения сопротивления движению. Главная причина этого явления заключается в ухудшении процесса смазки, связанного с уменьшением вязкости смазочных материалов. Особенно сильно увеличивается сопротивление движению после длительных остановок поезда, когда температура подшипников успевает сильно понизиться. Опыты американских железных дорог показывают, что с переходом от теплой летней погоды к температуре порядка 0° С сопротивление товарных поездов возрастает на 25%, а легких пассажирских — процентов на 10. В европейской практике также отмечено значительное возрастание удельного расхода энергии зимой. В условиях трамвайного движения увеличение расхода энергии достигает 20—25%, причем здесь, помимо влияния температуры, оказывают влияние снежные покровы. Наши русские железные дороги дальнего следования иногда учитывают увеличение сопротивления зимой повышением удельного сопротивления движению для центральных районов страны на 1 kg/t и южных — на 0,5 kg/t.

6. Дополнительные сопротивления движению на кривых.

Эти сопротивления объясняются дополнительными потерями на проскальзывание колес по рельсам, увеличением трения реборды по головке рельса или контррельса, а также потерями живой силы при толчках и ударах.

Эмпирические формулы дополнительного сопротивления для железнодорожных условий движения.

Брауншвейгская формула:

$$r_k = \frac{750}{R}\ \text{kg/t}, \tag{271}$$

где R — радиус кривой в метрах.

Если обозначить через l_k длину кривой и через α — центральный ее угол в градусах, то та же формула может быть представлена в виде:

$$r_k = \frac{13\alpha}{l_k}\ \text{kg/t}. \tag{272}$$

Для вагонов четырехосных вместо последних двух формул допустимо брать:

$$r_k = \frac{630}{R}\ \text{и}\ \ r_k = \frac{11\alpha}{l_k}.\ \text{kg/t}. \tag{273}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Формула Hoffman'a для вагонов с поворотными осями:

$$r_k = \frac{40l}{R} + 0{,}4 \text{ kg/t.} \tag{274}$$

Здесь l — длина базы вагона и R — радиус кривой в метрах.
То же для вагонов с жесткой базой:

$$r_k = 21\,\frac{l^2 + 4l}{R - 45} \text{ kg/t.} \tag{275}$$

Для узкой колеи:

$$r = \frac{400}{R - 20} \text{ kg/t.} \tag{276}$$

Формула Frank'a:

$$r_k = \frac{l}{R}\left(180 - \frac{1000l}{R}\right) \text{kg/t.} \tag{277}$$

Формула Röckl'я:

$$r_k = \frac{650}{R - 55} \text{ kg/t.} \tag{278}$$

Из приведенных формул на практике более часто пользуются брауншвейгской. Для трамвайных условий движения можно применять формулу Blondel'я. При ширине колеи a, выраженной в метрах:

$$r_k = \frac{350a}{R} \text{ kg/t.} \tag{279}$$

7. Влияние уклонов на сопротивление движению.

При движении поезда по уклону сопротивление движению или возрастает, или убывает в зависимости от того, движется ли он вверх или вниз. Картина движения поезда на подъеме представлена на рис. 338. По этой схеме силу сопротивления уклона при весе поезда G_n в тоннах можно определить выражением:

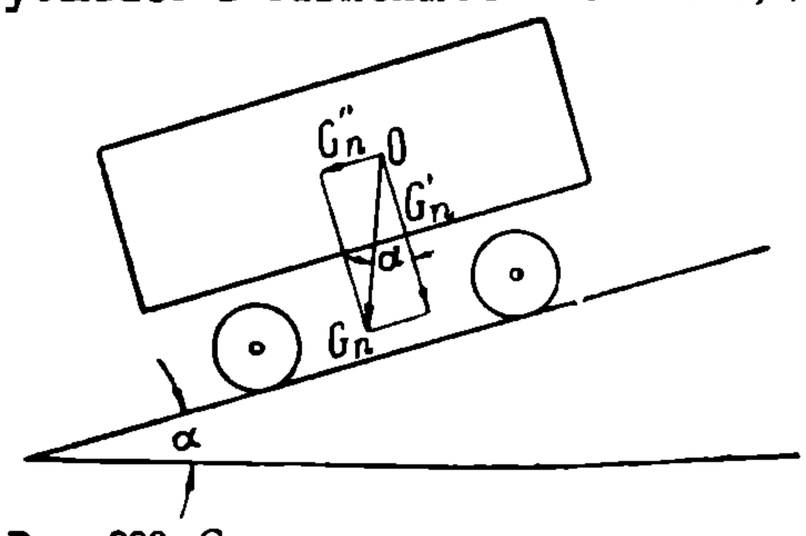


Рис. 338. Схема движения вагона на уклоне.

$$R_i = r_i G_n = 1000 G_n \sin\alpha \text{ kg.}$$

Обычно уклон принято определять в тысячных долях, т. е. относить его к длине в 100 единиц. Если говорят, что подъем равен $i^0/_{00}$, то это означает, что на каждую тысячу единиц протяженности пути местность поднимается на i таких же единиц. На основании рис. 338, учитывая относительную незначительность углов подъема α, можно написать соотношение:

$$\sin\alpha \cong \operatorname{tg}\alpha = \frac{i}{1000}.$$

Согласно последним двум выражениям искомое сопротивление подъема или ската можно определить формулой:

$$r_i = \pm i \text{ kg/t.} \tag{280}$$

Знак плюс нужно относить к подъему, минус — к скату. В последнем случае уклон является движущей силой, причем, однако, не всякий скат может быть полностью использован для движения. Скат, превышающий по сопротивлению значение сопротивления движению r_{max}, соответствующего заданной v_{max} и включающего в случае наличия кривой сопротивление ее, может быть использован только в части, равной r_{max}. Остальная часть должна быть поглощена торможением. Такие уклоны называют „вредными". Уклоны же, меньшие r_{max}, могут быть использованы полностью, и поэтому они называются „безвредными" (Л. 196).

III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ИНЕРЦИИ ПОЕЗДА.

Сила инерции поезда F_u складывается из двух составляющих. Первая F'_u обусловливается всеми массами, принимающими участие в поступательном движении, вторая F''_u — добавочным эффектом таких масс поезда, которые, помимо поступатель-

НБ УГНТ (ДІІТ)

ного движения, совершают еще движение вращательное. Таким образом, полную силу инерции можно вычислить, определив ее составляющие:

$$F_u = F'_u + F''_u. \tag{281}$$

Величина F'_u определяется, как произведение массы на ускорение:

$$F'_u = M \frac{dv}{dt}, \tag{282}$$

где

$$M = \frac{1000 G_n}{9{,}81} \text{ в } \frac{\text{kg}}{\text{m/sec}^2}$$

и

$\frac{dv}{dt}$ — ускорение в m/sec².

Значение силы F''_u находится по величине вращающего момента M''_u, обусловленного инерцией вращающихся масс. Если эту силу считать приложенной к ободу колеса вагона (радиуса R), то величина ее определится из уравнения:

$$F''_u = \frac{M''_u}{R}. \tag{283}$$

В этой формуле момент M''_u определится, если известны:

ω — угловая скорость оси,

$k_з$ — передаточное число (от оси к двигателю),

I_1 — момент инерции колес, осей и зубчатых колес, сидящих на осях, т. е. всех частей, имеющих угловую скорость ω,

I_2 — момент инерции якорей и коллекторов всех машин.

Тогда величина момента, приведенного к оси подвижного состава:

$$M''_u = I_1 \frac{d\omega}{dt} + I_2 k_з^2 \frac{d\omega}{dt}. \tag{284}$$

Коэфициент $k_з$ здесь взят в квадрате, потому что нужно привести к оси якорные угловую скорость и момент.

Если обозначить массы и радиусы инерции:

для колес через m_k и ρ_k,
для зубчатых колес „ $m_з$ и $\rho_з$,
для осей „ m_o и ρ_o,
для якорей „ $m_я$ и $\rho_я$,

и принять во внимание, что

$$I_1 = I_k + I_з + I_o,$$

то, подставив в формулу (283) выражение для M''_u (284), можно ее изобразить следующим образом:

$$F''_u = \left(I_1 \frac{d\omega}{dt} + I_2 k_з^2 \frac{d\omega}{dt}\right) \frac{1}{R} = (I_1 + I_2 k_з^2) \frac{1}{R^2} \frac{dv}{dt}$$

или

$$F''_u = \left[m_k \left(\frac{\rho_k}{R}\right)^2 + m_з \left(\frac{\rho_з}{R}\right)^2 + m_o \left(\frac{\rho_o}{R}\right)^2 + m_я \left(\frac{\rho_я}{R}\right)^2 k_з^2 \right] \frac{dv}{dt}. \tag{285}$$

Выражение в квадратных скобках имеет размерность массы, и его можно заменить фиктивной массой $m_э$. Тогда искомая внутренняя сила инерции:

$$F''_u = m_э \frac{dv}{dt}. \tag{286}$$

Из уравнений (281) и (286) определяется полная сила инерции:

$$F_u = (M + m_э) \frac{dv}{dt}$$

или, учитывая влияние массы $m_э$ путем введения особого коэфициента k, называемого коэфициентом инерции вращающихся масс, силу инерции можно определить по формуле:

$$F_u = kM \frac{dv}{dt} = M_n \frac{dv}{dt}. \tag{287}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Последнюю величину и необходимо ввести при расчете в уравнение движения поезда, причем M_n обычно называется приведенной массой. Для предварительных расчетов коэфициент k можно установить, исходя из средних значений, приведенных в табл. 53.

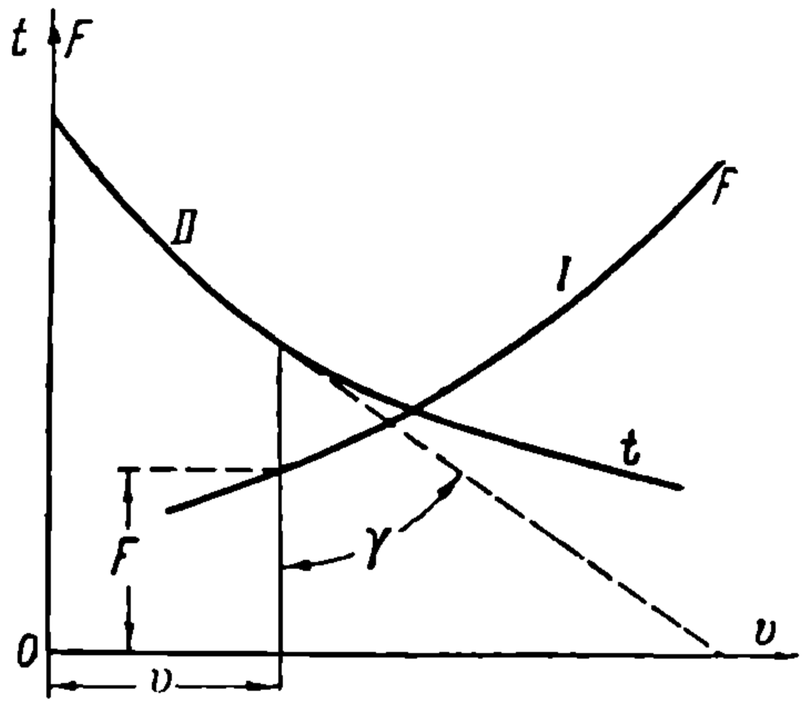


Рис. 339. Диаграмма для определения коэфициента инерции вращающихся масс по методу выбега.

ТАБЛИЦА 53.

Значения коэфициента инерции вращающихся масс.

Тип подвижного состава	k
Моторные вагоны трамваев	1,1 —1,14
Моторные вагоны пригородных железных дорог	1,12 —1,17
Электровозы . .	1,22 —1,4
Прицепные вагоны трамваев . .	1,04 —1,06
Пассажирские железнодорожные вагоны	1,04 —1,05
Товарные груженые вагоны	1,035—1,045
„ порожние „	1,1 —1,12

В тех случаях, когда коэфициент инерции вращающихся масс желательно определить точно для данного подвижного состава, можно пользоваться общими методами, применяемыми для определения моментов инерции. Практически решение данной задачи часто встречает значительные затруднения из-за сложности конфигурации исследуемых тел. В таких случаях возможно применение эксперимента. В основу его рационально положить метод свободного выбега вращающихся масс, что было сделано автором при исследовании вагонов ленинградского трамвая (Л. 203). Для этого вагон приподнимался на домкратах до отрыва колес от рельсов. После этого испытуемый двигатель с полускатом пускался по схеме шунтового двигателя вхолостую. Для различных чисел оборотов при определенном возбуждении определялись мощности P_x, которые необходимо было подводить к двигателю, чтобы преодолеть происходящие в нем при этих условиях потери. По этим мощностям согласно формуле $F=\frac{P_x}{2{,}73v}$ для каждой данной скорости определялась относимая к ободу ведущего колеса сила тяги F, необходимая для преодоления соответствующих потерь (рис. 339). Затем снималась кривая выбега якоря с полускатом, дававшая зависимость $v=f(t)$ при том же возбуждении, при котором определялись потери холостого хода. Сопоставление кривых *I* и *II* решает поставленную задачу, так как для каждых соответствующих точек их должно быть соблюдено равенство:

$$F=m_э\frac{dv}{dt}\frac{1}{3{,}6} \tag{288}$$

Сила тяги определяется из кривой *I*, а $\frac{dv}{dt}$ — из кривой *II* на основании равенства:

$$\frac{dv}{dt}=\frac{m_t}{m_v}\operatorname{tg}\gamma,$$

где m_v — масштаб скорости (m_v mm/km/h) и m_t — масштаб времени (m_t mm/sec); коэфициент 3,6 введен потому, что скорость предположена в km/h, а $\frac{dv}{dt}$ в m/sec². Из равенства (228) устанавливается $m_э$, а на основании ее по формуле (287) находится искомый коэфициент инерции вращающихся масс k. Если такой опыт произвести для одного только якоря с отсоединенным полускатом, то можно определить инерционный эффект отдельно и для якоря и для полускатов. Для испытуемого вагона при

$$k_э=6{,}26$$

коэфициент k без нагрузки был получен равным 1,138, с нагрузкой — 1,119. Для прицепного вагона результаты дали соответственно цифры 1,055 и 1,048.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Другой метод опытного определения k, применяемый часто в немецкой практике, базируется на кривых выбега подвижного состава. Выбег производится на нескольких уклонах, предпочтительно при движении вниз (рис. 340). Для каждого уклона при выбеге сопротивления будут уравновешиваться силой инерции, почему должно иметь место равенство:

$$(r \pm i)\, G_n = -\frac{1000 G_n k}{9{,}81 \times 3{,}6} \frac{dv}{dt}. \qquad (289)$$

Здесь, как ясно отсюда видно, сила сопротивления, стоящая в левой части и получающаяся положительной или отрицательной в зависимости от i и его знака, уравновешивается силой инерции, стоящей в правой части равенства. Если взять написанное равенство для каких-либо двух уклонов, например i_1 и i_2, и для одной и той же скорости v, то будут иметь место уравнения:

$$\left.\begin{aligned} r_1 \pm i_1 &= -\frac{1000k}{9{,}81 \times 3{,}6} \left|\frac{dv}{dt}\right|_1 \\ r_2 \pm i_2 &= -\frac{1000k}{9{,}81 \times 3{,}6} \left|\frac{dv}{dt}\right|_2 \end{aligned}\right\}. \qquad (290)$$

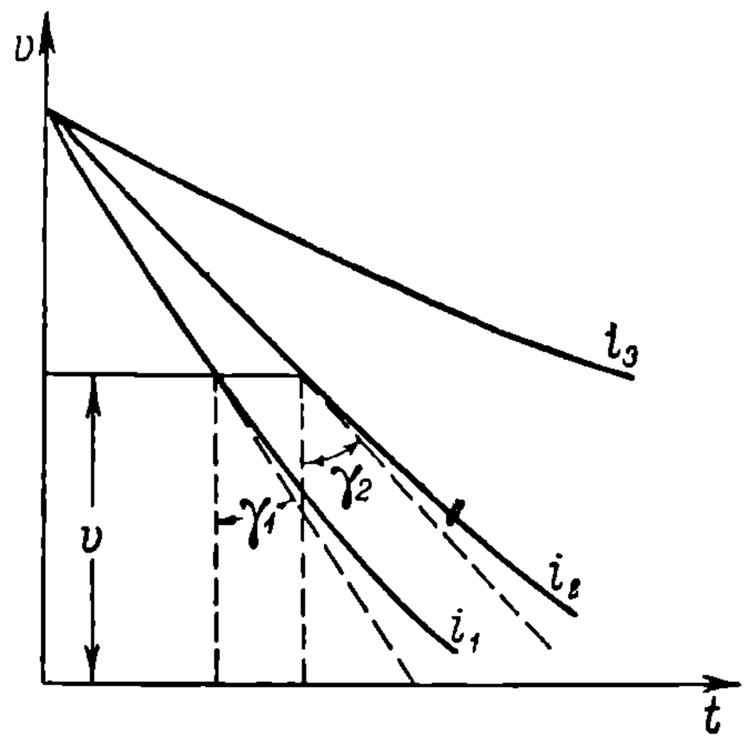


Рис. 340. Диаграмма для определения коэфициента инерции вращающихся масс по методу скатывания подвижного состава.

Следует иметь в виду, что $\frac{dv}{dt}$ при процессе ускорения будут положительны, а при замедлении — отрицательны. В соответствии с этим при принятом на рис. 340 отсчете углов:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{m_t}{m_v} \operatorname{ctg} \gamma,$$

причем, условившись γ всегда отсчитывать в сторону углов меньших 90°, для процесса ускорения нужно принимать $\operatorname{ctg}\gamma$ положительным, а для процесса замедления — отрицательным. Что же касается знаков перед i, то здесь и в последующих формулах верхние должны относиться к подъемам, а нижние — к скатам.

Для одной и той же скорости v имеем $r_1 = r_2$. Тогда, вычитая почленно из первого равенства второе и вводя масштабы можно получить уравнение:

$$\pm i_1 \mp i_2 = -\frac{1000 k m_t}{9{,}81 \times 3{,}6 m_v} (\operatorname{ctg}\gamma_1 - \operatorname{ctg}\gamma_2),$$

из которого следует:

$$k = -\frac{9{,}81 \times 3{,}6 m_v (\pm i_1 \mp i_2)}{1000 m_t (\operatorname{ctg}\gamma_1 - \operatorname{ctg}\gamma_2)}. \qquad (291)$$

Здесь полезно отметить, что метод выбега широко практикуется для определения сопротивлений движению поезда. Многие из вышеприведенных эмпирических формул получены на основании кривых выбега. Если предварительно тем или другим способом установлен коэфициент k, то при известном i уравнения типа (290) дают возможность определить сопротивления по формуле:

$$r = \mp i - \frac{1000 k m_t}{9{,}81 \times 3{,}6 m_v} \operatorname{ctg}\gamma. \qquad (292)$$

Беря эти сопротивления для ряда скоростей, можно получить искомую кривую $r = f(v)$. При этом в сопротивление r войдут механические сопротивления двигателей и передачи. Если последние известны, то, исключая их, можно получить сопротивления движению одного только экипажа подвижного состава.

Кроме метода выбега, определение сопротивления движению поезда можно вести и путем исследования уравнения движения под током:

$$F = (r \pm i)\, G_n + \frac{1000 k G_n}{9{,}81} \frac{dv}{dt}. \qquad (293)$$

Чтобы воспользоваться этим уравнением, нужно иметь экспериментально снятую кривую $v = f(t)$. Если по характеристикам двигателя для каждой скорости известна сила тяги F, а также определены i и k, то определение r на основании уравнения (293) не встречает никаких затруднений. Следует, однако, отметить, что нахождение

НБ УИИНТ (ДІІТ)

r по последнему методу может дать значительную ошибку, так как сопоставление характеристик двигателей и кривых $v=f(t)$ представляет большие затруднения, и, кроме того, характеристики каждого индивидуального двигателя могут значительно отличаться от соответственных характеристик завода, особенно в части передаточного механизма. Формула (293) особенно удобна при $v=\text{const}$, когда

$$\frac{dv}{dt}=0.$$

Довольно часто в железнодорожной практике для определения сопротивления движению прицепной части поезда пользуются динамометрическим методом. Для этой цели в сцепные приборы вставляются динамометры, по положению регистрирующих стрелок которых определяется сила тяги согласно уравнению (293). Динамометры применяются или пружинные, например, Rischar'a, или гидравлические. В первых силы тяжения поезда уравновешиваются пружинами, а во-вторых — противодавлением жидкости на поршень. Во всех опытах по исследованию подвижного состава необходимо иметь самопишущие приборы для непрерывной регистрации скорости, времени, тока, напряжения. Последнее время довольно часто начали применять прибор для непосредственной записи ускорений, называемый акселерометром (Л. 3).

IV. УСЛОВИЯ НОРМАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА. ЗАКОНЫ СЦЕПЛЕНИЯ.

Движение электрического поезда совершается под действием вращающего момента, развиваемого тяговыми электродвигателями. Момент двигателей, передаваясь тем или другим способом на ведущие оси подвижного состава, реализуется здесь в виде силы, приложенной к оси колес. Эта сила приводит в движение поезд, почему и получила, как уже было указано раньше, название силы тяги (рис. 2).

Теперь спрашивается, каким же образом осуществляется движение поезда? При нормальном его перемещении все колеса должны одновременно с вращением перемещаться вдоль пути. Для того, чтобы такое движение было возможно, колесо в точках соприкосновения с рельсом должно иметь какие-либо опорные пункты, около которых оно могло бы поворачиваться. Очень наглядную картину движения дает движение зубчатого колеса по зубчатой рейке. Опорными пунктами поворота являются зубцы рейки. Гораздо сложнее выявить физику процесса движения простого колеса по рельсу. Здесь не видно зубцов и впадин. Однако, по существу, и в данном случае процесс передвижения можно себе представлять по аналогии с процессом, происходящим при зубчатом зацеплении. В реальных условиях обработки металла поверхность его неизбежно шероховата, представляя собой непрерывно чередующиеся миниатюрные впадины и выступы. Вот эти-то впадины и выступы, имеющиеся на колесах и рельсах, при внедрении друг в друга и образуют как бы своего рода зубчатое зацепление, отличающееся от обычного миниатюрностью зубцов и беспорядочностью их расположения.

Если бы поверхности колес и рельсов были идеально гладки, то не было бы никаких опорных пунктов для поворота. Тогда колеса под действием вращающего момента двигателей могли бы только вращаться на месте, не имея возможности совершать поступательного передвижения. При таких условиях поезд оставался бы на месте, несмотря на вращение полускатов.

Такое явление может иметь место не только при идеально гладких поверхностях. В случае зубчато-реечного зацепления оно может возникнуть, если сила, с которой зубцы давят друг на друга, превзойдет их прочность. В этом случае зубцы будут сорваны, опорные пункты исчезнут, и полускаты будут вращаться на месте, не совершая поступательного движения. При обычных рельсах и колесах то же может произойти, если под влиянием чрезмерной силы тяги будут деформированы воображаемые зубцы, в результате чего неровности поверхностей, обеспечивающие опорные пункты для поворота, будут как бы сглажены, причем восстановление прежней поверхности может произойти только после прекращения действия тягового усилия или по крайне мере после соответствующего понижения его величины. Процесс вращения колес на месте носит название боксования. Следует отметить, что процесс этот представляет собой чрезвычайно сложную картину, до сего времени окончательно еще не изученную. На предложенную здесь физическую картину боксования нужно смотреть скорее, как на гипотезу, дающую очень наглядное объяснение процесса, а не как на абсолютно точную его теорию.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Из рассмотрения боксования вытекает, что возникновение его определяется степенью прочности зубцов. Колесо, как говорят, сцепляется с рельсом. Так называемая в теории тяги сцепная сила подвижного состава, при принятой трактовке вопроса, есть не что иное, как сила, характеризующая прочность воображаемых зубцов, или, по существу говоря, сила трения покоя между поверхностями рельсов и бандажей. Как показывает теоретическое обоснование и опытные данные, аналитически закон сцепления колес с рельсами можно выразить формулой:

$$S_c = \rho G_c \text{ kg}. \tag{294}$$

Здесь S_c—сила сцепления в kg, ρ — коэфициент сцепления в kg/t и G_c—сцепной вес в t, т. е. тот вес, который приходится на ведущей оси. Как видно из формулы, при данной трактовке вопроса коэфициент ρ изображает в kg ту силу сцепления, которая вызывается каждой тонной веса, приходящегося на сцепные оси. Нужно заметить, что в тяговой литературе формула (294) очень часто пишется в несколько измененной форме:

$$S_c = 1\,000 \rho G_c \text{ kg}. \tag{295}$$

В данном случае ρ мыслится в виде дробного отвлеченного числа, определяющего ту часть сцепного веса, которая численно соответствует указанной выше силе сцепления. Если, например, по первой формуле ρ принят равным 200 kg/t, то по второй он должен быть взят равным 0,2. При принятой здесь трактовке вопроса о сцеплении более удобно пользоваться формулой первой, что и будет делаться в последующем.

Как вытекает из данной формулы, сила сцепления принимается пропорциональной сцепному весу. Физически понятно, что с увеличением давления на поверхность, колеса глубже входят в рельсы и потому прочнее сцепляются с ними. Однако, для утверждения, что сила сцепления абсолютно точно пропорциональна осевому давлению, не имеется пока исчерпывающих данных. Возможно, что здесь прямой пропорциональности нет, но для практических расчетов считается допустимым исходить из нее.

Весьма осложняет вопрос определения сцепной силы коэфициент сцепления ρ. Последний зависит от самых разнообразных факторов. Практика дорог и специальные исследования показывают, что наивысшее значение он имеет при сухих чистых рельсах. Наличие влаги или снега на рельсах его понижает. Сильно уменьшает коэфициент ρ загрязнение рельсов, особенно наличие на них опавших листьев. Резкое снижение вызывается гололедом и покрытием рельсов масляной или сальной пленкой.

Из прочих факторов, влияющих на ρ, необходимо отметить материалы рельсов и колес. Несомненно, состав материала, степень его твердости и эластичности здесь оказывает влияние. Например, слишком мягкий материал, особенно при высоких давлениях ведущих осей, может по наблюдениям испытывать такую деформацию, которая является причиной снижения сцепной силы. Однако, дать более или менее точную картину влияния состава материала за отсутствием специальных по этому вопросу опытных данных пока не представляется возможным.

Несколько лучше обстоит дело с выяснением влияния скорости движения поезда на коэфициент сцепления. Хотя и здесь нет исчерпывающих данных, но имеющийся материал дает возможность констатировать характер этого влияния. Опыты, произведенные французским исследователем Poirée с вагонами, а затем немецким экспериментатором Wichert'ом и швейцарцем Müller'ом с электровозами, обнаружили понижение коэфициента сцепления со скоростью. Физически причина понижения сцепления со скоростью до настоящего времени окончательно не выяснена.

Есть основание полагать, что причина эта лежит в отступлении реального процесса движения колеса по рельсам от идеального качения. Как уже было указано в главе о сопротивлениях движению, качение колес в действительности всегда сопровождается их проскальзыванием. Вместо трения покоя здесь получается фактически трение скольжения. С увеличением же скорости коэфициент трения при скольжении, а следовательно, и определяемый им коэфициент сцепления, как известно, уменьшается. На рис. 341 приведены кривые изменения коэфициента сцепления в зависимости от скорости. Кривые *I* и *II* получены из опытов Wichert'a, а кривые *I'* и *II'* из опытов Müller'a. Оба экспериментатора работали с однофазными электровозами и с индивидуальными передачами по системе полого вала и с секторами Buchli. Poirée, работавший с вагонами, получил сцепные коэфициенты несколько ниже

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

приведенных. Следует иметь в виду, что кривые *I* и *I'* относятся к сухим, чистым рельсам, а *II* и *II'* — к мокрым при тумане.

Значительно тяжелее обстоит вопрос о сцеплении в условиях трамвайного движения. Здесь колебания сцепного коэфициента могут достигать очень больших значений. Объясняется это резкими колебаниями состояния пути от достаточно сухих и чистых рельсов до сильно загрязненных мокрых. Некоторое представление о значении ρ для трамвайных путей могут дать цифры табл. 54, полученные автором путем наблюдения, с помощью самопишущих искровых приборов, за скольжением

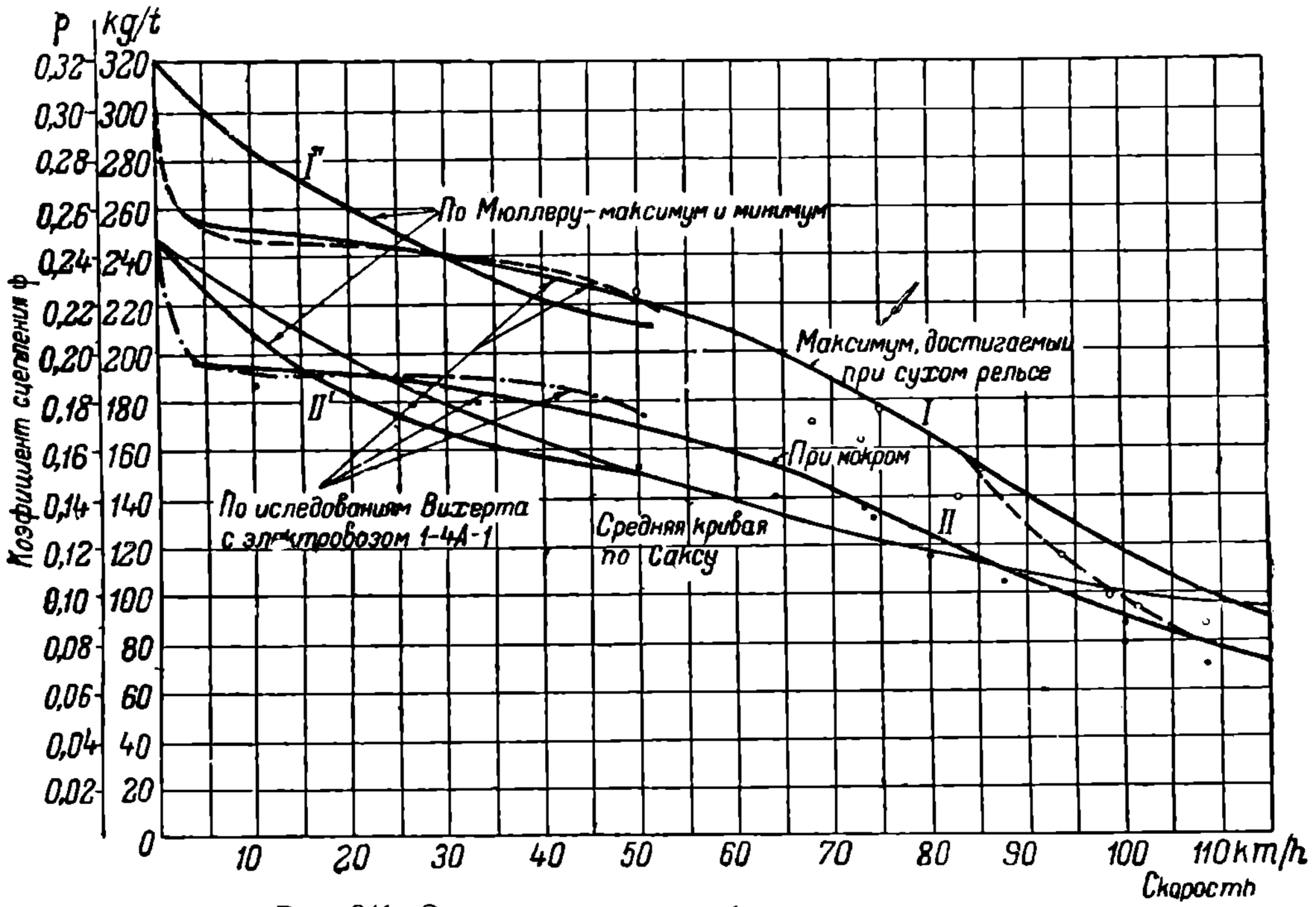


Рис. 341. Опытные кривые коэфициентов сцепления.

колес при электрическом торможении на ленинградском трамвае. Данные эти, ввиду сложности постановки опыта, не претендуют на абсолютную точность, но они дают достаточно показательную картину колебания коэфициента сцепления в зависимости от состояния пути. Относить приведенные данные следует к скоростям 15—25 km/h (Л. 203).

ТАБЛИЦА 54.

Коэфициенты сцепления для рельсов ленинградского трамвая.

Состояние погоды и рельсов.	Ток на 1 двигатель в момент начала скольжения	Qбщее тормозное усилие на ободе колес в kg	Коэфициент сцепления в kg/t
Сыро. Туманно. Рельсы с налетом грязи.....	60	1460	100
Небольшой мороз. Местами отвердевшая на рельсах грязь.....	74	2180	151
То же и небольшой снег.....	78	2240	155
Сухо. Облачно. Местное загрязнение. Путь в общем удовлетворительный	88	2140	177
Сыро. Рельсы мокрые, но чистые	104	3370	215
Летний теплый день. Рельсы сухие и чистые	—	—	290

При особо плохом состоянии рельсов, например, при наличии на них листьев, гололеда и масляных осадков, нужно считаться с возможностью, что значения коэфициента сцепления окажутся ниже приведенных на рис. 341 и в табл. 54. В трамвайных условиях движения можно наблюдать случаи, когда ρ доходит до 50—75 kg/t.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Вообще вопрос о ρ далеко еще не изучен. В частности последние данные настоятельно ставят вопрос о ревизии влияния на него скоростей при тяге и при торможении.

Среди средств, которыми можно пользоваться для увеличения силы сцепления, общеизвестна и общеупотребительна посыпка рельсов песком. Эффект песка не является постоянным. Он очень изменчив и зависит, повидимому, от состояния пути и, отчасти, от состава самого песка. Есть основание полагать, что чем хуже состояние рельсов, тем сильнее в процентном отношении эффект посыпки рельсов песком. Благодаря песку можно ожидать увеличения коэфициента сцепления для различных условий движения в пределах от 15 до 80%.

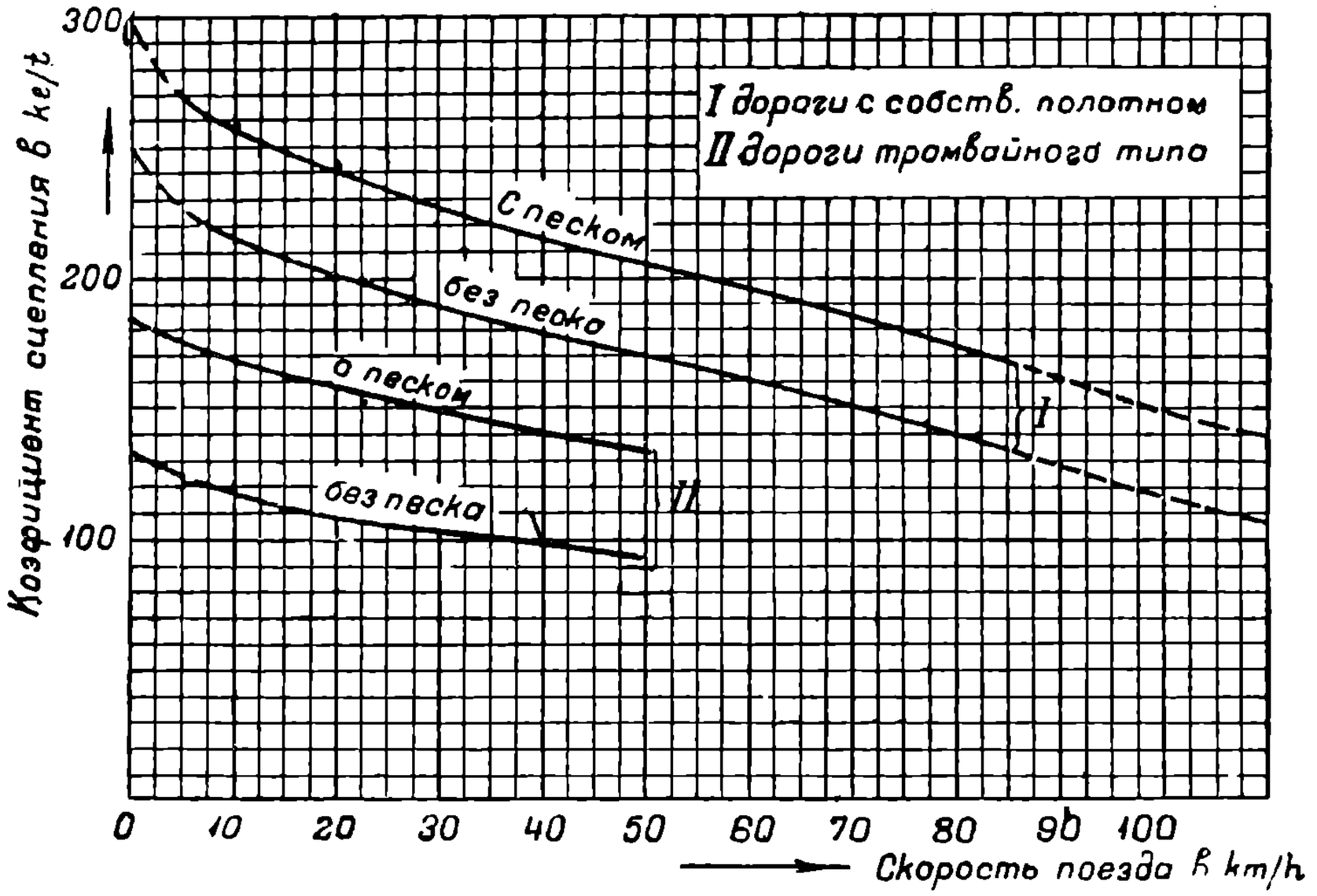


Рис. 342. Средне-опытные кривые коэфициентов сцепления при влажных рельсах.

На рис. 342 приведены коэфициенты сцепления, построенные на основании анализа имеющегося по этому вопросу более или менее систематизированного опытного материала, нужно сказать, весьма скудного и не всегда достаточно убедительного. Данные кривые нужно относить к рельсам, покрытым влагой и с наличием некоторого загрязнения. Нужно иметь в виду, что для большинства дорог Союза, по имеющимся отдельным данным, можно ожидать коэфициента сцепления на 20—25% выше приведенных на рис. 342. Однако, окончательное и вполне определенное заключение о расчетных коэфициентах сцепления можно дать только после специально систематически широко поставленных опытов. Нужно надеяться, что НКПС эти опыты поставит и на основании их с учетом блестящих достижений наших лучших машинистов в области ведения тяжелых поездов даст подробную инструкцию по установлению расчетных коэфициентов сцепления для всех важнейших типов движения применительно к отдельным районам Союза. Вообще, при выборе расчетных коэфициентов сцепления рекомендуется проявлять разумную смелость, не боясь в некоторых случаях, например при трогании с места и при проходе отдельных подъемов, итти на применение песка.

Полезно обратить внимание на то, что на кривых особенно малых радиусов по сравнению с прямыми отмечается некоторое понижение сцепных коэфициентов, повидимому, из-за неправильного взаимного расположения бандажей и рельсов, а также из-за сильного увеличения скольжения колес на кривых.

Теперь спрашивается, какие условия обеспечивают нормальное перемещение колес? Очевидно, здесь необходимо учесть с одной стороны, усилие тяги, стремящейся сорвать воображаемые зубцы, а с другой стороны—силу сцепления, предста-

НВ УДУНТ (ДІІТ)

вляющую собой при принятой трактовке вопроса силу прочности зубцов. Отсюда закон нормального перемещения колес должен быть выражен:

$$F_c \leqslant \rho G_c. \tag{296}$$

Смысл данного закона сводится к тому, что для обеспечения нормального движения поезда и в частности для трогания его с места необходимо, чтобы F_c, сила тяги за вычетом внутренних сил локомотива, была меньше силы сцепления. Если в поезде имеется, как это бывает, несколько ведущих осей, под F_c нужно подразумевать сумму всех таких усилий, а под G_c—сумму весов, приходящихся на все ведущие оси.

Исключение из данного правила нужно сделать по отношению к подвижному составу, в котором ведущие оси приводятся в движение от отдельных двигателей. Если при такой системе передачи отдельные ведущие оси по тем или другим причинам получают различную весовую нагрузку или различную силу тяги, то формулу (296) нужно применять к той оси, которая с указанных точек зрения находится в наиболее невыгодных условиях, так как обычно достаточно забоксовать одной оси, чтобы вызвать затем боксование и других осей.

Тому же закону сцепления подчинено и нормальное движение поезда при торможении, если подразумевать под ним движение без скольжения колес. Но здесь вместо силы тяги приходится вводить силу торможения с учетом внутренних сил тормозных единиц, а вместо сцепного веса так называемый тормозной вес, т. е. вес, приходящийся на тормозные оси поезда. При принятых обозначениях закон нормального торможения для каждой тормозной оси определяется выражением:

$$R_{mc} \leqslant \rho G_m. \tag{297}$$

При практическом применении выведенных формул может возникнуть ряд вопросов. Наибольшие осложнения могут получиться при решении, на основании формулы (296), вопросов, связанных с пуском и разгоном поезда, когда применены регуляторы со ступенчатой регулировкой пускового тока, а следовательно, и пусковой силы тяги. Как было выяснено в главе об управлении поездом, при данных условиях сила тяги будет колебаться около своего среднего значения F_{cp} от F_{max} до F_{min}. С точки зрения тягового расчета, по существу, имеет значение только F_{cp}, так как только она фактически определяет средние условия движения. Между тем, при определении сцепной силы согласно формуле (296), для полного предупреждения боксования нужно вводить в расчет F_{max} Естественно, что при таком решении вопроса будет получена меньшая активная сила тяги при том же сцепном весе поезда, чем если бы в этой же формуле F соответствовало F_{cp}.

По указанной причине на практике часто имеют тенденцию не считаться с F_{max}, а вводить в формулу среднее тяговое усилие. Осложнением здесь может явиться подбоксовка колес до тех пор, пока пусковой ток на каждой новой ступени регуляторов не снизится от I_{max} до I_{cp}. При этом нужно быть готовым и к тому, что данный процесс может перейти в непрерывное боксование, так как с момента подбоксовки вероятно понижение коэфициента сцепления, усиливающееся по мере возрастания скорости скольжения колеса по отношению к рельсу.

Если в тяговом расчете нередко ведут расчет по F_{cp}, это объясняется тем, что при обычно применяемом осторожном выборе коэфициента сцепления, можно ждать только в редких случаях опасного последствия подбоксовки, особенно, если применять в таких случаях как можно более обильную посыпку рельсов песком. К тому же при достаточно опытных машинистах и вожатых подбоксовку по большей части можно сводить к minimum'у. Так, например, при ручном управлении поездом она наиболее опасна только при трогании с места, хотя эта опасность несколько смягчается тем, что в этот момент наиболее высок коэфициент сцепления. В дальнейшем после трогания поезда с места машинист может избегать подбоксовки более медленным темпом введения пусковых ступеней, благодаря чему будет понижаться I_{max}, а следовательно, и F_{max}. Это, конечно, повлечет за собой некоторое понижение ускорения поезда, но для исключительных случаев с этим можно вполне мириться. Несколько сложнее дело обстоит при автоматическом управлении, когда переход на I_{max} не зависит непосредственно от машиниста. В таком случае очень рекомендуется, как это часто и практикуется, иметь регулятор ускорения, действуя на который машинист, при плохом состоянии пути, может получить понижение F_{max}.

Вероятность боксования колес при работе со ступенчатыми регуляторами, естественно тем больше, чем сильнее колеблется сила тяги. В этом отношении находятся

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

в более благоприятных условиях электровозы, у которых число ступеней регуляторов обычно выше, чем у моторных вагонов.

Весьма большое влияние на процесс боксования оказывает степень эластичности связи между валом двигателя и ведущей осью. Наибольшее значение эластичность приобретает при достаточно быстрых колебаниях силы тяги, и, следовательно, до известной степени это влияние должно сказываться и на выше разобранном процессе скольжения при ступенчатой системе разгона поезда. Как общее правило, упругость передаточных звеньев демпфирует процесс боксования. При колебаниях силы тяги упругие звенья механизма сглаживают амплитуды колебаний, приближая их к среднему значению.

Интересное исследование влияния упругости передачи на боксование произвел Lenk (Л. 210). Он показал, что начавшееся по тем или другим причинам боксование при достаточно мягкой пружинной связи вала двигателя с ведущей осью может прекратиться само собой. К такому выводу его приводит то соображение, что при упругом промежуточном звене перемещения вала двигателя и ведущей оси, начиная с момента боксования, становятся неодинаковыми. Во время такого процесса тяговые усилия на полускатах, отделенных от двигателей эластичной связью, меняют свои значения и в периоды соответствующего уменьшения тяговой силы на полускатах последние могут выходить из процесса боксования. Если в такой момент поезд попадет на более благоприятный в отношении сцепления путь, то боксование может окончательно прекратиться. Нужно сказать, что отмеченное обстоятельство имеет большое практическое значение. Опыт показывает, что часто коэфициент сцепления сильно меняется на относительно коротких участках пути. Боксование может начаться на участке с пониженным сцепным коэфициентом, но благодаря упругости связи полускатов с двигателями оно часто прекращается само по себе, как только поезд переходит на другой участок с более высоким ρ. Из числа других факторов, влияющих на процесс самоосвобождения от боксования, Lenk отмечает целесообразность уменьшения масс, находящихся между эластичной связью и рельсами, т. е. главным образом масс полускатов.

Из отдельных передач, разбираемых в следующем отделе, с точки зрения эластичности менее совершенна жесткая зубчатая передача. Затем идет рычажная. Далее нужно поставить передачи с промежуточным пружинным зубчатым колесом или шестернями. Наиболее благоприятной с указанной точки зрения следует считать передачи с полым валом.

Говоря о боксовании, нельзя не коснуться влияния на этот процесс системы тяговых электродвигателей. В этом отношении двигатели постоянного тока и многофазные асинхронные не должны вызывать особых опасений. Они при данном режиме обладают постоянной силой тяги, не меняющейся в течение оборота оси.

Значительно сложнее обстоит вопрос с однофазными коллекторными двигателями. Как уже было выяснено в главе о тяговых двигателях, момент их пульсирует с частотой, удвоенной по сравнению с частотой сети, причем наибольшие значения моментов теоретически превышают в два раза их средние расчетные значения. Это обстоятельство принципиально влечет за собою такую же опасность в отношении боксования, на которую уже было обращено внимание при рассмотрении влияния на этот процесс ступенчатой регулировки пуска. Опыты, произведенные в Америке Bergmann'ом, до известной степени подтвердили это. Ввиду чрезвычайной важности этого явления для тяги, ставящего под угрозу возможность применения однофазной тяги, изучением его занялся ряд исследователей.

Первые в этом направлении исследования произвел Ossanna (Л. 208). В своей работе, произведенной ввиду сложности проблемы с рядом допущений, он пришел к выводу, что, благодаря инерции вращающихся масс электровоза, пульсация тяги настолько сглаживается, что практического значения она не должна иметь. Вслед за Ossanna более точное исследование того же вопроса произвел Brecht, введя в него учет эластичности передаточного механизма (Л. 211). Brecht обнаружил, что наибольшее влияние на смягчение пульсации оказывает именно этот фактор. Kummer, исследовавший тот же вопрос, составил уравнение колебаний, из которых он сделал вывод, что смягчение пульсации происходит как под влиянием инерции вращающихся масс, так и под влиянием упругости. Он также склоняется к тому, что преобладающее значение здесь имеет последний фактор, причем та или другая амплитуда колебаний силы тяги в значительной степени зависит от соотношения частоты первичного тока и частоты собственных колебаний передаточного механизма.

НТБ УИИНТ (ДИИТ)

Общий вывод исследователей рассматриваемого вопроса таков, что в отношении опасности боксования электровозы с однофазными двигателями практически мало отличаются от электровозов с двигателями постоянного и трехфазного тока.

Здесь полезно отметить, что в паровозах, вращающий момент которых меняется в зависимости от положения поршней, также имеет место только что разобранный процесс. Но здесь частота колебаний силы тяги значительно меньше, чем при однофазных двигателях. Ввиду этого опасность боксования колес у паровозов, при одной и той же средне-расчетной величине силы тяги, значительно более ощутима, чем у электровозов. Этим обстоятельством объясняется то, что в тяговых расчетах очень часто коэфициент сцепления при прочих равных условиях для паровозов берется несколько более низким, чем для электровозов.

Рассмотренные выше осложнения в реализации силы сцепления относились к процессу работы тяговых машин в качестве двигателей. Однако, много из того, что было изложено, нужно отнести и к процессу торможения поезда. В частности, при ступенчатой системе регулировки электрического торможения. тормозное усилие резко колеблется около среднего расчетного значения. Конструктивные особенности электровозов могут при торможении вызвать, как и при тяге, неправильное распределение давления на отдельные оси, причем оно особенно сильно может проявляться, когда в поезде тормозится только локомотив. При работе однофазных коллекторных машин в качестве однофазных генераторов при рекуперации, приходится учитывать пульсацию тормозного момента, происходящую по тому же закону, что и при работе их в качестве двигателей.

Основной закон сцепления колес с рельсами, выраженный формулами (296) и (297) дает возможность решить одну из важных задач тягового расчета — определение минимально возможных сцепных и тормозных весов. Для решения первой задачи, предварительно требуется установить для заданных условий движении наибольшее расчетное тяговое усилие, дабы ввести его в указанную формулу (296). Обращаясь к основному уравнению движения поезда, можно видеть, что сила тяги в общем случае определяется сопротивлением движению и силой инерции. Наибольшее сопротивление для каждой данной дороги нормально возникает на наиболее тяжелом подъеме, называемом расчетным или руководящим. Максимальное значение силы инерции при работе поезда под током получается обычно при процессе разгона поезда под регуляторами, когда ускорение поддерживается искусственно на наибольшей своей величине. В соответствии с этим расчетную силу тяги определяют, исходя или из условия движения поезда на руководящем подъеме, или из условия его разгона.

При магистральной тяге, особенно при товарном движении, выигрыш от высоких ускорений в отношении скорости при больших расстояниях между станциями получается относительно незначительный. Ввиду этого для поездов дальнего следования по большей части наибольшее расчетное значение силы тяги принято определять по руководящему подъему. В сумму сопротивлений здесь должны входить сопротивление подъема, самого поезда и кривой, если она имеется. Что касается ускорения на руководящем подъеме, то при расчете для него следует задаться такой только величиной, чтобы поезд в случае непредвиденной остановки на подъеме мог развить, хотя бы и очень медленно, достаточную скорость.

Для городского и пригородного движения при коротких перегонах требуются высокие ускорения, так как здесь они могут дать большое повышение коммерческой скорости движения. По этой причине здесь, как общее правило, наибольшая тяга получается при разгоне под регуляторами. Следует иметь в виду, что в данном случае сопротивление движению поезда нужно относить к скорости, соответствующей выключению последней ступени регулятора, так как оно получает в этот момент наибольшее свое значение.

Вторая важная задача, которую приходится решать с помощью закона сцепления — это определение тормозного веса поезда согласно формуле (297), фактически сводящееся к установлению необходимого количества тормозных осей в поезде. Эта тормозная задача требует, в первую очередь, установления наибольшей расчетной тормозной силы, входящей в указанную формулу. Последнюю почти всегда приходится определять из условий экстренного торможения поезда на руководящем скате. В основу этого определения обычно кладется требование иметь такое тормозное усилие, при котором можно при заданной скорости остановить поезд на расстоянии видимости сигнала. Последняя величина устанавливается соответству-

НБ УИИНТ (ДІІТ)

ющими нормами и берется чаще всего в пределах от 750 до 1200 m. Нужно указать, что эти нормы претерпевают изменения в зависимости от изменения организации движения. Ввиду важности этих норм требуется при решении тормозных задач каждый раз руководствоваться последними узаконениями в этом вопросе НКПС. По установленному таким образом тормозному пути и заданной скорости легко установить тормозное замедление, а вслед за этим по уравнению движения и требуемую расчетную тормозную силу (Л. 196).

V. ОБЩИЙ АНАЛИЗ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА И МЕТОДЫ ЕГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ.

1. Общий анализ уравнения движения.

В общем случае движения поезда возможны четыре различных режима: период ускорения под током, движение под током с постоянной скоростью, движение по инерции при выключенных двигателях (выбег) и торможение. Уравнение движения в применении к этим режимам, оставаясь по существу неизменным, получает, однако, различную форму.

В период ускорения под током сила тяги двигателя идет на покрытие сопротивлений движению и на ускорение. Для данного периода уравнение движения имеет общий вид:

$$F = \Sigma R + M_n \frac{dv}{dt}. \tag{298}$$

Первый член правой части данного уравнения, как было уже указано, выражает сумму сопротивлений движению поезда:

$$\Sigma R = (r + r_k \pm i) G_n \text{ kg}. \tag{299}$$

Второй член определяет силу инерции, причем под M_n следует подразумевать приведенную массу поезда.

Если $\frac{dv}{dt}$ выразить в m/sec², то

$$M_n = \frac{1000\, k\, G_n}{9{,}81}. \tag{300}$$

Если $\frac{dv}{dt}$ выражать в km/h/sec, то вместо M_n следует брать $\frac{M_n}{3{,}6}$.

Приращения скоростей dv при ускорениях следует брать со знаком плюс и при замедлениях со знаком минус.

Разгон поезда осуществляется первоначально при регулировке силы тяги посредством пусковых устройств, а по достижении определенной скорости — при непосредственном включении двигателей в сеть. Соответственно этому разгон поезда состоит из разгона под пусковыми регуляторами и движения с ускорением по автоматической кривой.

При движении с постоянной скоростью ускорение равно нулю, т. е. $\frac{dv}{dt} = 0$, и вся сила тяги покрывается суммой сопротивлений движению. Уравнение (298) принимает вид:

$$F = \Sigma R. \tag{301}$$

При выбеге движение происходит за счет живой силы поезда, причем изменение последней идет не только на покрытие потерь от сопротивлений движению поезда, но также на покрытие потерь в двигателях. Сила тяги равна нулю, а ускорение является отрицательной величиной.

Общее уравнение движения для выбега:

$$-M_n \frac{dv}{dt} = \Sigma R + R_м, \tag{302}$$

где $R_м$ — сила сопротивления всех двигателей и передаточных механизмов, отнесенная к ободу колеса. В том случае, когда при выбеге поезд идет на скате, может иметь место не замедление, а ускорение.

Процесс торможения отличается от выбега тем, что к общей сумме сопротивлений прибавляется сила торможения R_m:

$$-M_n \frac{dv}{dt} = \Sigma R + R_м + R_m. \tag{303}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Задача интегрирования уравнений движения в общем случае заключается в нахождении двух интегралов. Первый интеграл должен дать зависимость $v=f(t)$ и второй интеграл — зависимость $v=f(l)$ или $l=f(t)$.

Существующие методы интегрирования можно разбить на три основных класса: графоаналитический метод конечных приращений Mailoux, графические методы и методы аналитические.

При интегрировании уравнений движения, как и при решении прочих вопросов, связанных с тяговым расчетом, в дальнейшем необходимо иметь в виду определенную терминологию скоростей. Средне-ходовой или средне-технической скоростью движения (v_x) будет называться скорость, средняя за период фактического движения поезда (T_x), коммерческой скоростью или скоростью сообщения (v_k),—средняя скорость движения за период времени (T_k), с учетом времени движения и времени, затрачиваемого на остановки между отдельными перегонами, но без учета специальных остановок на конечных пунктах.

2. Интегрирование уравнений движения поезда методом конечных приращений Mailoux.

Построение кривых для отдельных периодов движения. Сущность этого метода заключается в том, что в уравнениях движения поезда бесконечно малые изменения скорости (dv) заменяются конечными малыми изменениями ее (Δv). При этом делается допущение, что при достаточно малых изменениях скорости уравнения движения остаются в силе, если для силы тяги F и силы всех сопротивлений ΣR подставляются значения, средние для каждого интервала изменения скорости.

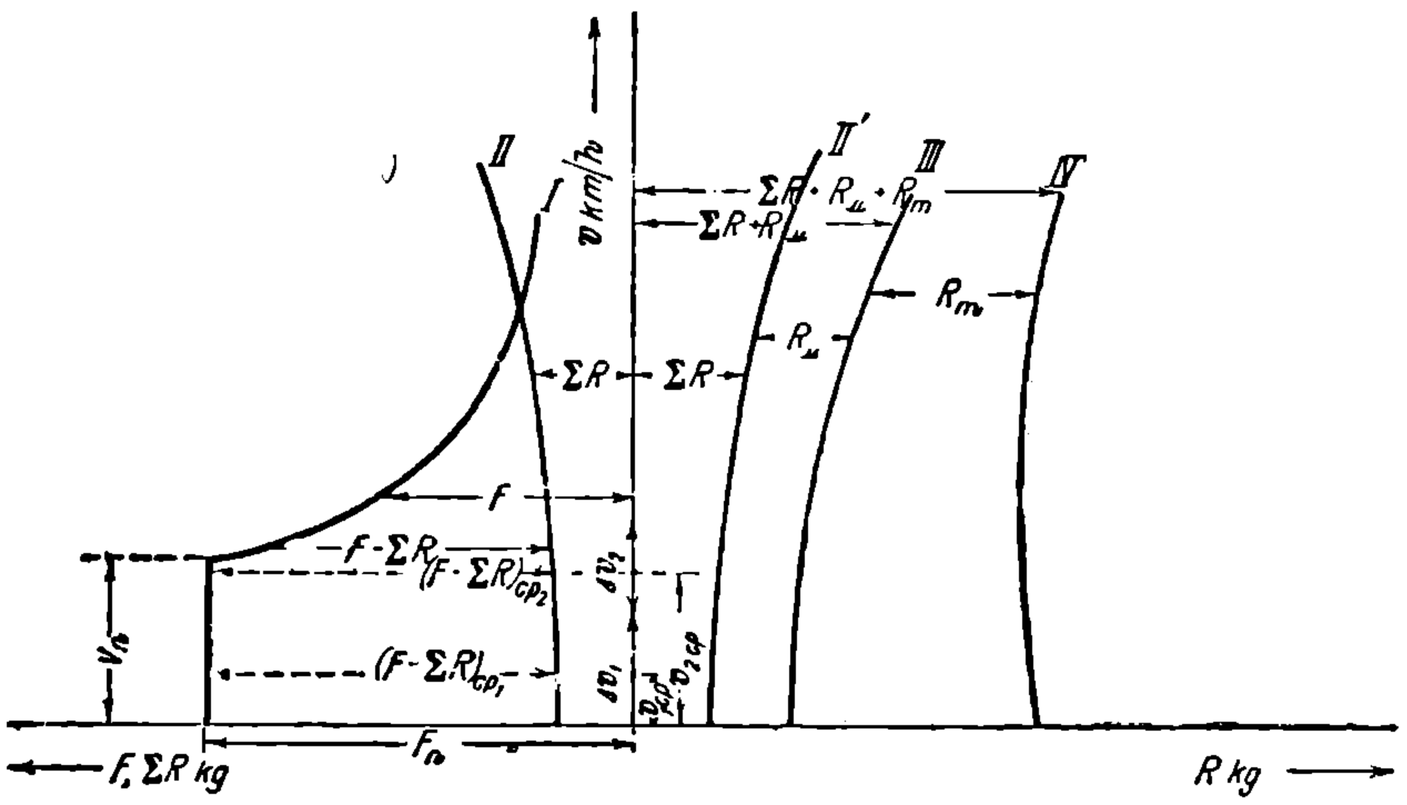


Рис. 343. Кривые силы тяги и сопротивлений движению.

Определение средних значений F и ΣR для соответствующих Δv производится графическим путем. Подставляя найденные F и ΣR в уравнения движения, можно аналитическим решением последних получить значения изменений времени Δt, соответствующие заданным Δv. Последовательный ряд таких решений дает возможность построить по точкам кривую зависимости скорости от времени $v=f(t)$. Точность решения, очевидно, увеличивается с уменьшением задаваемых изменений скорости. Для получения зависимости $v=f(l)$ необходимо произвести ряд определений:

$$\Delta l = v_{cp}\Delta t, \tag{304}$$

что можно проделать одновременно с предыдущими вычислениями.

При построении искомых кривых $v=f(t)$ и $v=f(l)$ предполагаются заранее установленными двигатели и их характеристики, а также и тип поезда, на основании которого выбираются те или другие формулы для определения его сопротивлений движению.

Ход построения кривых $v=f(t)$ и $v=f(l)$ таков. Сначала по характеристикам двигателей, выражая обычно v в km/h и F в kg, строят для всего поезда кривую зависимости $F=f(v)$ (рис. 343, кривая *I*). Из особенностей построения этой кривой следует отметить, что во все время движения поезда под пусковыми регуляторами до пусковой скорости v_n силу тяги F, ввиду действия пусковых регуляторов, можно принимать практически неизменной. Затем на том же рисунке наносится кривая сопротивлений движению поезда в функции от скорости (кривая *II*). Кривые *I* и *II*

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

определяют движение поезда под током. Для периода выбега и торможения поезда нанесены на том же рис. 343 справа кривые *III* и *IV*.

Следует указать, что совмещение построения кривых для движения под током и без тока, как это сделано на рис. 343, сокращает графическую работу, но не является обязательным.

Для первого периода движения поезда с ускорением уравнение (298) при замене dv и dt на Δv и Δt и с учетом выражения скорости в km/h принимает вид:

$$\Delta t = \frac{M_{\text{п}}}{(F - \Sigma R)_{cp}} \frac{\Delta v}{3{,}6}. \tag{305}$$

Вычисления рационально производить согласно табл. 55.

ТАБЛИЦА 55.

Порядок вычислений по методу конечных приращений.

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Δv km/h	v km/h	v_{cp} km/h	$(F-\Sigma R)_{cp}$ kg	Δt sec	t sec	Δl m	l m
Δv_1	$v_1 = \Delta v_1$	$v_{cp1} = \frac{\Delta v_1}{2}$	$(F-\Sigma R)_{cp1}$	Δt_1	$t_1 = \Delta t_1$	Δl_1	$l_1 = \Delta l_1$

Здесь Δv — задаваемое изменение скорости, в данном случае ее приращение; целесообразно брать Δv меньшим для тех периодов, когда F и ΣR сильно колеблются; там же, где F и ΣR меняются незначительно, Δv можно брать значительно бо́льшим; v — скорость в конце каждого периода, за который произошло изменение Δv; вычисляется она сложением скорости предыдущего периода с задаваемым Δv; v_{cp} — средняя скорость за время такого же периода; вычисляется она сложением предыдущей конечной скорости v с половиной задаваемого Δv; $(F - \Sigma R)_{cp}$ — избыток силы тяги над сопротивлением движению, так называемые ускоряющие усилия; эти величины определяются для значений v_{cp}, взятых из столбца III, как разность между кривыми F и ΣR на рис. 343; соответствующее значение заносится в графу IV; Δt — приращение времени, соответствующее изменению скорости Δv, вычисляется по формуле (305); t — время, истекшее от начального момента до конца рассматриваемого периода; вычисляется сложением всех предыдущих Δt с Δt рассматриваемого периода; Δl — расстояние, проходимое за время рассматриваемого периода:

$$\Delta l = \frac{v_{cp}}{3{,}6} \Delta t,$$

где v_{cp} берется из графы III, а Δt из графы V; Δl — в метрах, ввиду чего введен коэфициент 1/3,6; l — расстояние, проходимое до конца рассматриваемого периода; вычисляется оно сложением всех предыдущих Δl с Δl для рассматриваемого периода.

Такая таблица (графы II, VI и VIII) дает возможность построить кривые $v = f(t)$ и $v = f(l)$ для периода ускорения (кривые *I* и *I'* на рис. 344). За движением поезда с ускорением следует движение с постоянной скоростью. Этот процесс, являющийся продолжением разгона, характеризуется прямой, параллельной оси абсцисс. Длина этой прямой ограничивается началом выбега или торможения.

Дальше идет выбег поезда. Принцип определения $v = f(t)$ и $v = f(l)$ тот же, что и для режима ускорения. Уравнение движения в этом случае примет вид:

$$\Delta t = -\frac{M_{\text{п}}}{(\Sigma R + R_{\text{м}})_{cp}} \frac{\Delta v}{3{,}6}. \tag{305a}$$

Здесь приходится задаваться уменьшением скорости, причем за начальное значение v следует принять значение, немного превышающее $v_{\max}$.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ТАБЛИЦА 56.

Порядок вычислений при методе конечных приращений.

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
v km/h	Δv km/h	v_{cp} km/h	$(\Sigma R+R_м)_{cp}$ kg	Δt sec	t sec	Δl m	l m

Порядок определения кривой свободного выбега виден из табл. 56. Обозначения: v — скорость в начале рассматриваемого периода, т. е. для первого периода $v_{max}+(5-10)$ km/h, для второго $v_{max}+(5-10)-\Delta v_1$, для третьего $v_{max}+(5-10)-(\Delta v_1+\Delta v_2)$ и т. д.; Δv и v_{cp} — те же, что и в таблице; $(\Sigma R+R_м)_{cp}$ определяется графически по кривой рис. 343 для соответствующего v_{cp}; Δt вычисляется по формуле (305а), при этом Δt — в sec; Δv из графы II в km/h; t, Δl и l вычисляются так же, как для табл. 55. По данным табл. 56 строим кривые выбега $v=f(t)$ и $v=f(l)$ (кривые *II* и *II'* на рис. 344).

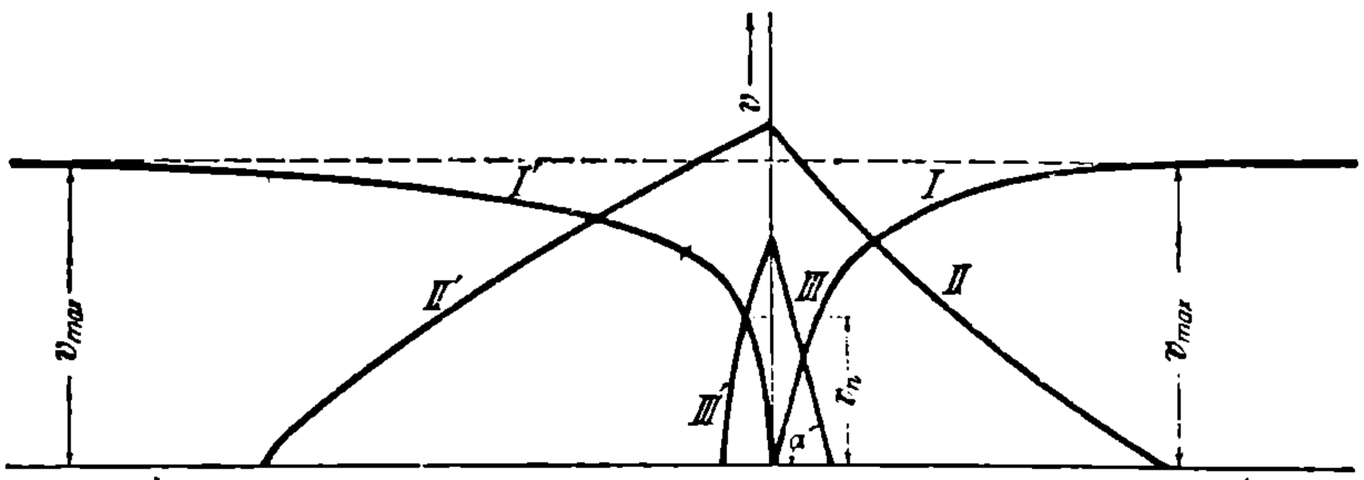


Рис. 344. Схема построения кривых движения по методу Mailoux.

Процесс торможения определяется точно так же, как и выбег, только в графу IV следует подставить значения $\Sigma R+R_м+R_m$. Эти значения для соответствующих v_{cp} дает кривая IV (рис. 343). Эти же величины войдут в формулу, определяющую Δt:

$$\Delta t=-\frac{M_n}{(\Sigma R+R_м+R_m)_{cp}}\frac{\Delta v}{3{,}6}. \qquad (305b)$$

Кривые торможения следует строить, начиная со скорости, несколько превышающей предполагаемую v_m (кривые *III* и *III'* на рис. 344).

При построении кривых рабочего торможения практически можно часто исходить из предположения, что замедление при торможении остается неизменным и равным заданному. При таких условиях кривая торможения должна быть прямой, наклон которой определяется замедлением на основании выражения:

$$\operatorname{tg}\alpha=\frac{m_v\,\Delta v}{m_t\,\Delta t}=\frac{m_v}{m_t}\,a_m, \qquad (306)$$

где m_v и m_t — масштабы скорости и времени.

Для экстренного торможения, когда используется наибольшая возможная тормозная сила, приходится строить кривую $R_m=f(v)$. В случае торможения колодками необходимо учитывать зависимость коэфициента трения колодок по бандажам от скорости. При электрическом торможении можно исходить из тормозных усилий, ограничение которых по скорости должно определяться зависимостью от нее коэфициента сцепления, так как интенсивность торможения можно увеличивать только до тех пор, пока не будет превзойден предел сцепления колес с рельсами. Конечно, электрический способ торможения можно применять в том лишь случае, если нет специального ограничения по работе машин с электрической точки зрения.

Построение кривой $v=f(t)$ для заданного перегона. Для получения окончательной картины движения поезда на перегоне заданной длины необходимо сочленить построенные на рис. 344 кривые, причем для заданного перегона

НБ УПУНТ (ДІІТ)

возможно бесконечно большое количество вариантов, в зависимости от того, какую среднюю ходовую скорость желательно получить на этом перегоне. При сочленении отдельных элементов кривой движения необходимо иметь в виду, что площадь кривой $v=f(t)$, являющаяся интегралом $\int v dt$, есть не что иное, как длина перегона, выраженная в некотором масштабе, обусловленном масштабами диаграммы m_v и m_t. Отрезок же оси абсцисс от 0 до конечной точки кривой выражает ходовое время T_x, т. е. зависит от выбранной средней ходовой скорости и должен меняться при изменении сочленения кривых так, чтобы площадь, ограниченная всей кривой, оставалась равной длине перегона.

На основании изложенного можно построить искомую кривую движения поезда на перегоне, руководствуясь следующими соображениями (рис. 345). Пусть заданы длина перегона l и средняя ходовая скорость v_x, откуда при принятых единицах измерения $T_x=\frac{3{,}6\,l}{v_x}$ sec. При построении прежде всего откладывается по оси абсцисс отрезок T_x в некотором масштабе m_t. В начале координат строится кривая разгона OE, которую можно перенести с рис. 344. Масштаб скорости принимается

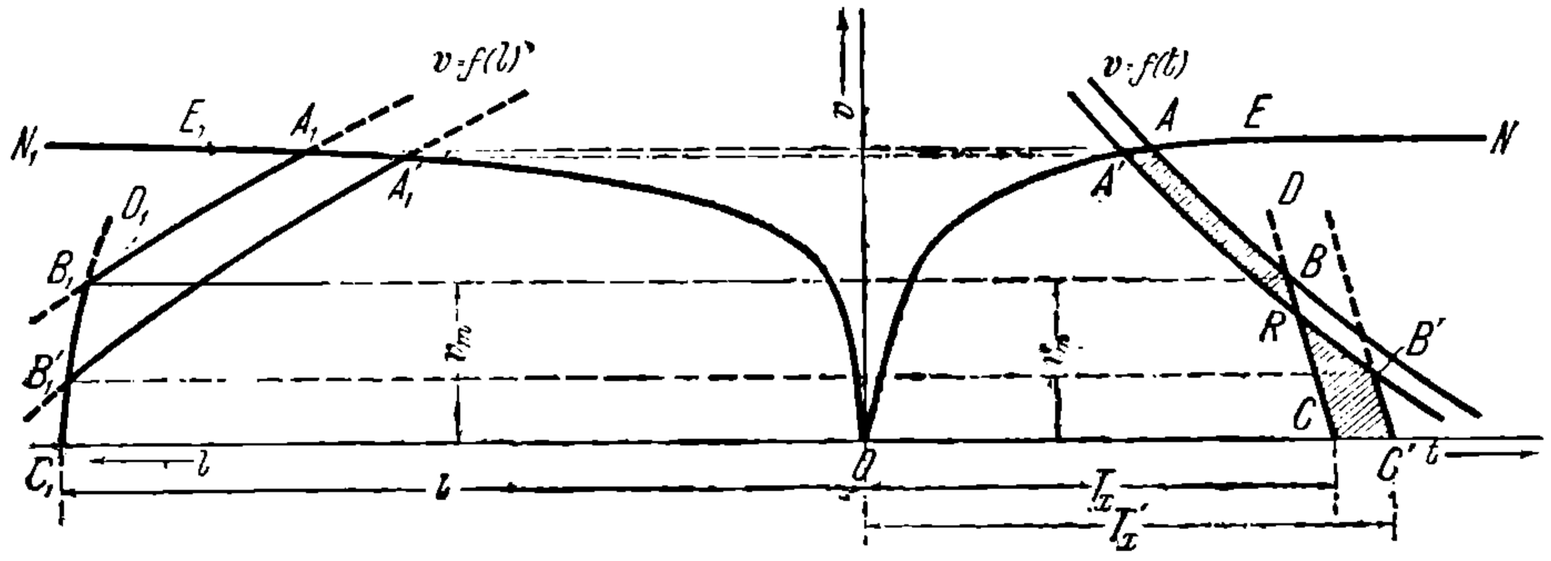


Рис. 345. Построение кривых движения по методу Mailoux.

равным m_v. Продолжением этой кривой будет прямая EN, параллельная оси абсцисс, что соответствует движению с постоянной скоростью v_{max}. От конца отрезка T_x строится кривая торможения CD (*III* на рис. 344). Далее надо провести кривую выбега. Ее следует расположить так, чтобы площадь, ограниченная кривой $OABC$ в определенном масштабе, равнялась длине перегона, равной $l=T_x v_x$. Если приняты масштабы: 1 km/h $=m_v$ mm и 1 sec $=m_t$ mm, то площадь кривой должна быть:

$$S=m_v m_t v_x T_x \text{ mm}^2. \tag{307}$$

Передвигая кривую AB параллельно оси абсцисс, нужно найти такое ее положение, при котором имеет место равенство (307). При желании уменьшить ходовую скорость, т. е. увеличить T_x, кривую AB надо было бы расположить так, чтобы $OA'B'C'=m_v m_t v_x T_x$, т. е. равнялось прежней площади $OABC$. Очевидно, что площадь $AA'RB$ должна равняться $RCC'B'$. Это условие необходимо соблюдать при построении различных вариантов $v=f(t)$ для различных v_x.

Построение $v=f(l)$. Для кривой $v=f(l)$ является обязательным, чтобы отрезок оси абсцисс от нуля до конца кривой $v=f(t)$ давал длину перегона, т. е. для одного и того же перегона — величину постоянную, не зависящую от способа сочленения элементов кривых. В соответствии с этим на оси абсцисс откладываем отрезок, равный длине перегона l. В начале координат строится кривая разгона и движения с постоянной скоростью, которую можно перенести с рис. 344. От конца отрезка l строится кривая торможения C_1D_1 (кривая III' с рис. 344). Кривую выбега A_1B_1 (кривая II' из рис. 344) следует расположить так, чтобы v_m равнялась той же величине из кривой $v=f(t)$, т. е. снести точку B в точку B_1. Если кривая выбега начинается до установления v_{max} (например, $A'B'$ и соответствующая ей $A_1'B_1'$), то можно снести и точку A' в точку A'_1. Очевидно, при правильном построении ординаты точек B' и B_1' должны быть тоже равны.

На практике часто удобнее строить сначала $v=f(l)$ и, только затем, на ее основании кривую $v=f(t)$. При этом методе сначала строятся кривая разгона ON_1 и

НВ УИУНТ (ДІІТ)

кривая торможения C_1D_1. После этого проводится кривая выбега A_1B_1. Точку A_1 можно снести на кривую $v=f(t)$ в виде точки A, исходя из которой строят кривую выбега, конечная точка которой B определяется снесением с кривой $v=f(l)$ точки B_1. Последний этап построения заключается в построении от точки B кривой торможения BC. Этот метод можно применить, если точка A_1 лежит ниже скорости установившегося режима. Средняя ходовая скорость определяется при этом по l и T_x. Для получения заданной средне-ходовой скорости приходится проделывать ряд вариантов с проведением кривых выбега.

Метод построения кривых движения, требующий начального построения кривой $v=f(l)$, может быть применен только при условии, что точки A и A_1 не находятся на участке установившихся скоростей. В последнем случае установить более или менее точно положение точки A не представляется возможным. При таком положении точек A и A_1 следует пользоваться первым методом и начинать построение с кривой $v=f(t)$.

3. Графические методы интегрирования уравнений движения.

Построение кривой $v=f(t)$ методом Desdouits. Графические методы интегрирования уравнений движения так же, как и разобранный выше метод Mailoux, строятся на принципе перехода от бесконечно малых приращений к конечно малым. Но в отличие от метода Mailoux вся задача решается только с помощью графических построений.

Среди методов определения зависимости $v=f(t)$ наибольшим распространением пользуется метод Desdouits. Обосновать его можно, исходя из уравнения движения, если изобразить последнее в конечно малых приращениях скорости и времени. При выражении скорости в km/h и времени в sec, уравнение движения можно изобразить в форме:

$$(F-\Sigma R)_{cp}\frac{\Delta t}{\Delta v}=\frac{M_n}{3{,}6}. \qquad (308)$$

Как и в способе Mailoux, в основу построения кладутся зависимости $F=f(v)$, $\Sigma R=f(v)$, $R_м=f(v)$ и $R_m=f(v)$.

По этим данным прежде всего строятся кривые $F-\Sigma R=f(v)$, $\Sigma R+R_м=f(v)$ и $\Sigma R+R_м+R_m=f(v)$ (рис. 346). Затем на осях абсцисс откладываются произвольно взятые приращения скоростей Δv_1, Δv_2, Δv_3 ... и т. д., и из середины каждого из них восстановляется перпендикуляр. Отрезки перпендикуляров до пересечения с построенными выше кривыми, очевидно, дадут за данный интервал средние значения усилий ускоряющих и усилий замедляющих, т. е. в последнем случае сопротивления при выбеге и при торможении. После этого из концов найденных средних значений, параллельно оси абсцисс, проводятся отрезки, равные некоторому отрезку ab, установление величины которого выяснится из последующего. Построение в верхней части диаграммы заканчивается проведением лучей *I*, *II*, *III* и т. д.

На основании диаграмм a и b строится искомая кривая $v=f(t)$, изображенная на том же рисунке снизу под буквой c. Для построения ее прежде всего откладывается от начала координат время T_x, в течение которого поезд должен пройти данный перегон, и затем, по оси ординат, как показано, переносятся с верхних диаграмм в том же масштабе взятые приращения скоростей Δv_1, Δv_2, Δv_3 ... и т. д. Затем из начала координат параллельно лучу *I* проводится луч *I'* до пересечения с горизонталью, проходящей через конец первого интервала скорости Δv_1. После этого из полученной точки пересечения параллельно лучу *II* проводится луч *II'* до пересечения с горизонталью второго интервала Δv_2 и т. д. Последний луч, проводимый на основании диаграммы a, в данном случае *VI'*, должен быть параллелен оси абсцисс и будет, очевидно, характеризовать собой режим установившейся скорости.

Для того, чтобы сомкнуть искомую кривую, построение лучей для выбега и торможения начинают с конца нанесенного выше отрезка T_x, причем первым наносится последний луч, в данном случае *XII*. Построение ведется совершенно так же, как и в только что разобранном случае. Оно заканчивается пересечением последних двух лучей *VI'* и *VII''* той и другой частей искомой кривой.

РЕПОЗИТОРИЙ УДУНТ (ДИТ)

Произведя указанные построения, необходимо проверить, действительно ли полученная кривая представляет собой искомую кривую $v=f(t)$, и, если это так, то не требуется ли для достижения этого каких-либо добавочных условий. Для проверки нужно взять любую пару соответственных интервалов из той или другой верхних диаграммы и из диаграммы нижней. Взяв такие интервалы и учтя масштабы, можно написать на основании диаграммы *a* равенство:

$$m_k(F-\Sigma R)_{cp}=ab\operatorname{ctg}\alpha.$$

На основании диаграммы *c*:

$$m_v\Delta v=m_t\Delta t\operatorname{ctg}\alpha.$$

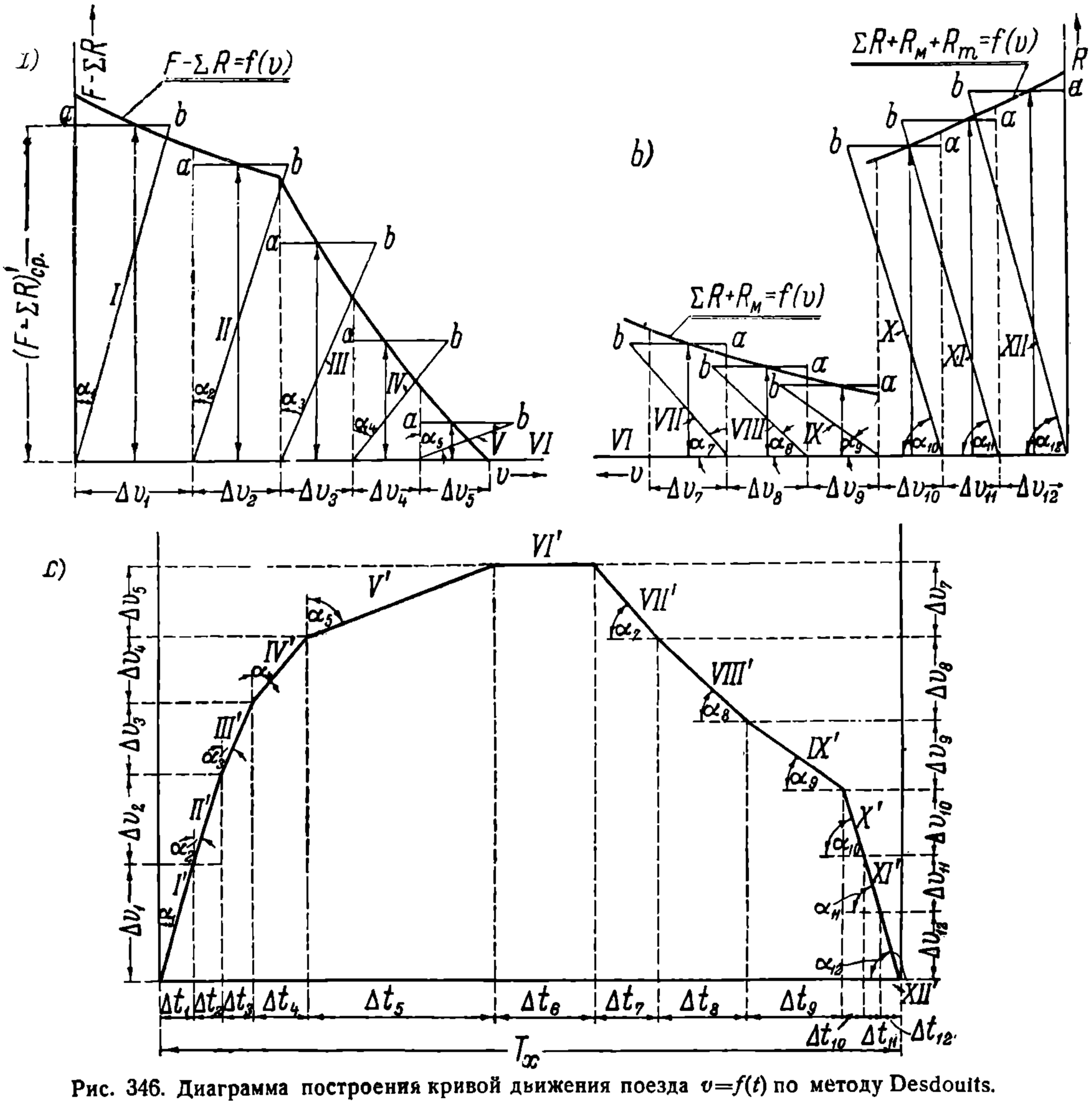


Рис. 346. Диаграмма построения кривой движения поезда $v=f(t)$ по методу Desdouits.

Индексы перед членами Δv, Δt, $(F-\Sigma R)_{cp}$ и α не поставлены, так как вместо взятых интервалов можно взять любую другую пару интервалов, и результат получится тот же самый.

Деля почленно полученные выражения и несколько их преобразуя, получаем выражение:

$$(F-\Sigma R)_{cp}\frac{\Delta t}{\Delta v}=\frac{m_v}{m_k m_t}ab. \qquad (309)$$

Сравнивая данное выражение с основным уравнением движения (308), видим, что левые части их равны друг другу. Отсюда следует, что произведенное построение

НБ УГУНТ (ДІІТ)

будет действительно правильно, соответствуя основному закону движения, если правые части уравнений (308) и (309) будут равны друг другу, т. е.

$$\frac{M_n}{3{,}6} = \frac{m_v}{m_k m_t} ab. \tag{310}$$

Данное соотношение и выражает то условие, соблюдение которого обеспечивает правильность построения. Оно свидетельствует о том, что при установлении величин m_v, m_t, m_k и ab можно произвольно задаваться только тремя из них. Четвертая же должна обязательно определяться из полученного выражения.

Второе условие правильности построения вытекает из уже разобранного, при изложении метода Mailoux, общего свойства кривой $v=f(t)$. Здесь, как и в предыдущем случае, площадь данной кривой в принятых масштабах должна обязательно равняться заданному перегону. В соответствии с этим необходимо и для данного построения соблюсти равенство (307). Если оно не получается, то нужно его добиться, применив вышеуказанный способ переноса кривой выбега, причем может оказаться, что принятая скорость начала торможения при окончательном оформлении построения изменит свое значение.

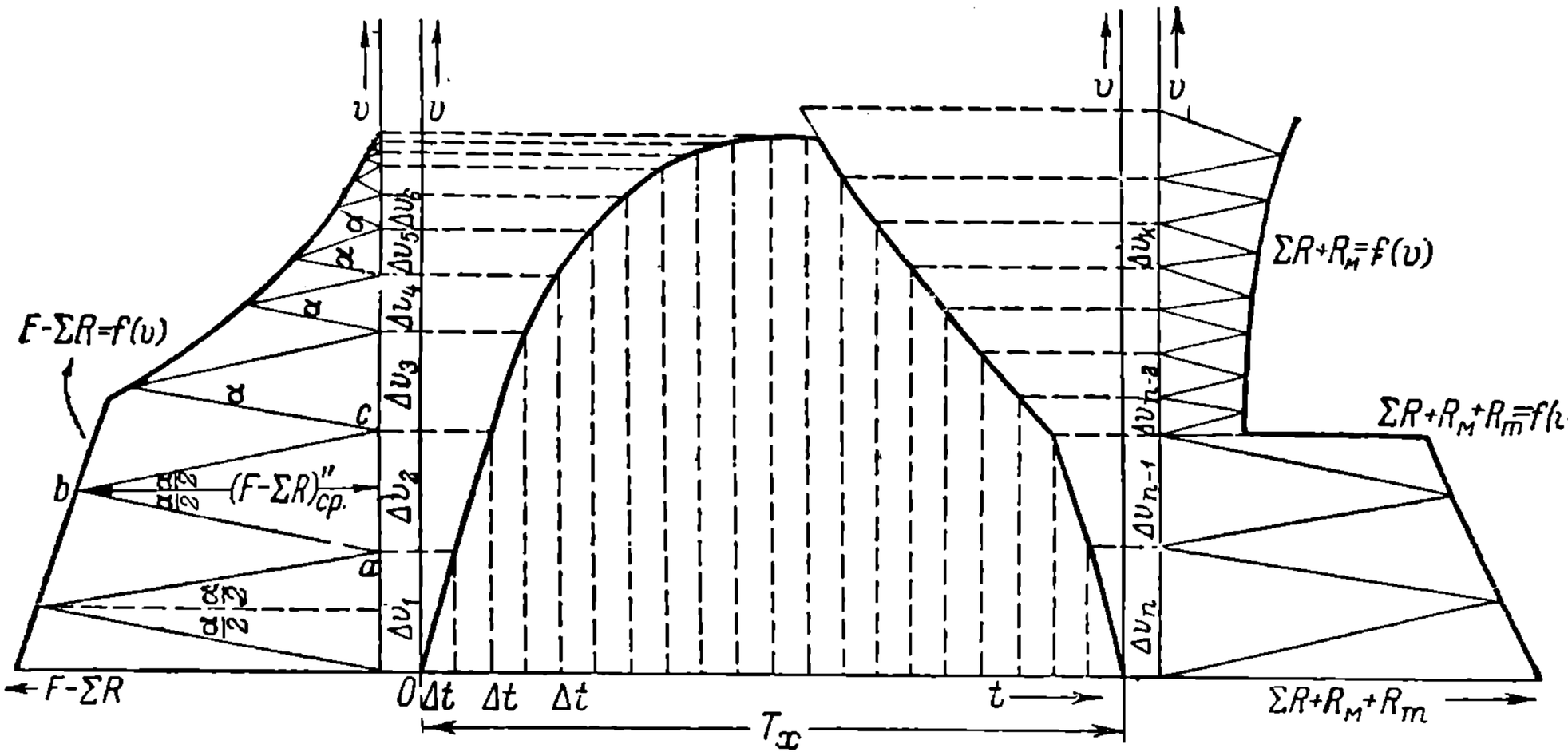


Рис. 347. Диаграмма построения кривых движения $v=f(t)$ по методу Дегтярева — Müller'a.

Построение кривой $v=f(t)$ по методу Дегтярева — Müller'a. Из других многочисленных вариантов построения кривой $v=f(t)$ полезно ознакомиться с методом, разработанным у нас инженером Дегтяревым, а в Германии — Müllero'м (Л. 206 и 207). Способ этот заслуживает внимания потому, что он исходит не из тех предпосылок, на которых основан метод Desdouits Применение его видно из рис. 347. Сущность построения становится очень ясной, если учесть, что оно базируется на двух основных положениях. Прежде всего, при его выполнении является обязательным исходить из постоянства элементов времени Δt. Величины этих элементов откладываются на оси абсцисс. Вторым фактором, характеризующим данный метод, является некоторый постоянный угол α, вершина которого непременно должна находиться на кривых $F-\Sigma R=f(v)$, $\Sigma R+R_м=f(v)$ и $\Sigma R+R_м+R_т=f(v)$. При построении угол передвигается с таким расчетом, чтобы биссектриса его была всегда перпендикулярна оси ординат. Если соблюсти нижеприведенное условие, то стороны этого угла будут отсекать на оси ординат приращения скоростей Δv_1, Δv_2, Δv_3 ... и т. д., соответствующие каждый раз одному и тому же выбранному элементу времени Δt.

Условия правилвности произведенного построения следуют из очень простых выкладок. На основании любого треугольника типа abc при принятых масштабах можно написать:

$$\frac{m_v \Delta v}{2} = m_k (P-\Sigma R)_{ср} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

или, преобразуя:

$$\frac{(F-\Sigma R)_{cp}}{\Delta v}=\frac{m_v}{2m_k \operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}} \tag{311}$$

Замечая, что основное уравнение движения можно представить в виде

$$\frac{(F-\Sigma R)_{cp}}{\Delta v}=\frac{M_n}{3{,}6\Delta t}, \tag{312}$$

нетрудно притти к заключению, что правильность построения, как и в предыдущем случае, должна определяться, при условии постоянства α и Δt, равенством правых частей последних двух уравнений. Следовательно, основное требование построения сводится к равенству:

$$\frac{M_n}{3{,}6\Delta t}=\frac{m_v}{2m_k \operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}}. \tag{313}$$

Данное выражение показывает, что при четырех величинах Δt, m_v, m_k и α, которыми можно оперировать при применении данного метода, произвольно можно задаться только тремя из них. Четвертая должна определиться из уравнения (313).

Естественно, что в отношении закона площадей кривая $v=f(t)$, построенная по этому методу, должна подчиняться общим правилам. Площадь, ограниченная ею, должна в принятых масштабах соответствовать заданной длине перегона.

Построение кривой $v=f(l)$. Графическим здесь приводимым методом построения кривой движения $v=f(l)$ является метод, основанный на работах Липеца. В основу его кладется непосредственное нахождение второго интеграла.

Обоснование данного способа как и в предыдущих случаях, следует из основного уравнения движения (3). При переходе к конечно малым изменениям оно может быть представлено в виде

$$\frac{(F-\Sigma R)_{cp}}{M_n v_{cp}}=\frac{\Delta v}{\Delta l}$$

или, если Δl выразить в m, а Δv и v_{cp} в km/h,

$$\frac{3{,}6(F-\Sigma R)_{cp}}{M_n v_{cp}}=\frac{\Delta v}{3{,}6\Delta l}. \tag{314}$$

Соотношение (314) и является той базой, на которой производится построение В основу его кладутся зависимости $F=f(v)$, $\Sigma R+R_м=f(v)$ и $\Sigma R+R_м+R_m=f(v)$ По этим данным строится кривая $(F-\Sigma R)=f(v)$, т. е. кривая ускоряющих усилий в функции от скорости (*a*, рис. 348). Затем по оси OX откладываются произвольно выбираемые приращения скорости Δv_1, Δv_2, Δv_3, ... и т. д., и для них определяются средние значения величин $(F-\Sigma R)_{cp_1}$, $(F-\Sigma R)_{cp_2}$ и т. д., т. е. средние ускоряющие усилия, имеющие место в промежутке нарастания скорости от 0 до Δv_1, от Δv_1 до Δv_2 и т. д. Из середины отрезков Δv_1, Δv_2 и т. д. проводятся прямые, параллельные оси ординат. Пересечения этих прямых с кривой соединяются с началом координат O лучами *I*, *II*, *III* и т. д.

На другой диаграмме (*c*; рис. 348), оси которой ориентированы параллельно осям диаграммы *a*, откладываются по оси орди ат те же отрезки Δv_1, Δv_2 и т. д. Из точки O проводится прямая I', параллельная лучу *I*, до пересечения с горизонталью, проходящей через конец отрезка Δv_1. Из этой последней точки проводится прямая II' параллельно лучу *II* до пересечения с горизонталью, проходящей через конец отрезка Δv_2 и т. д. Проекции лучей I', II', III' и т. д. на ось абсцисс дадут величины Δl, Δl_2, Δl_3 и т. д., но при этом необходимо соблюсти определенное правило в отношении масштабов.

Если предположить для скорости и времени прежние масштабы, а для расстояний и ускоряющих усилий взять масштабы m_l и m_k ($1\,\text{m}=m_l\,\text{mm}$ и $1\,\text{kg}=m_k\,\text{mm}$), то на основании диаграмм *a* и *c* рис. 348, беря любой один и тот же интервал можно написать соответственно выражения:

$$\operatorname{tg}\alpha=\frac{m_v v_{cp}}{m_k(F-\Sigma R)_{cp}} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg}\alpha=\frac{m_l\Delta l}{m_v\Delta v},$$

откуда:

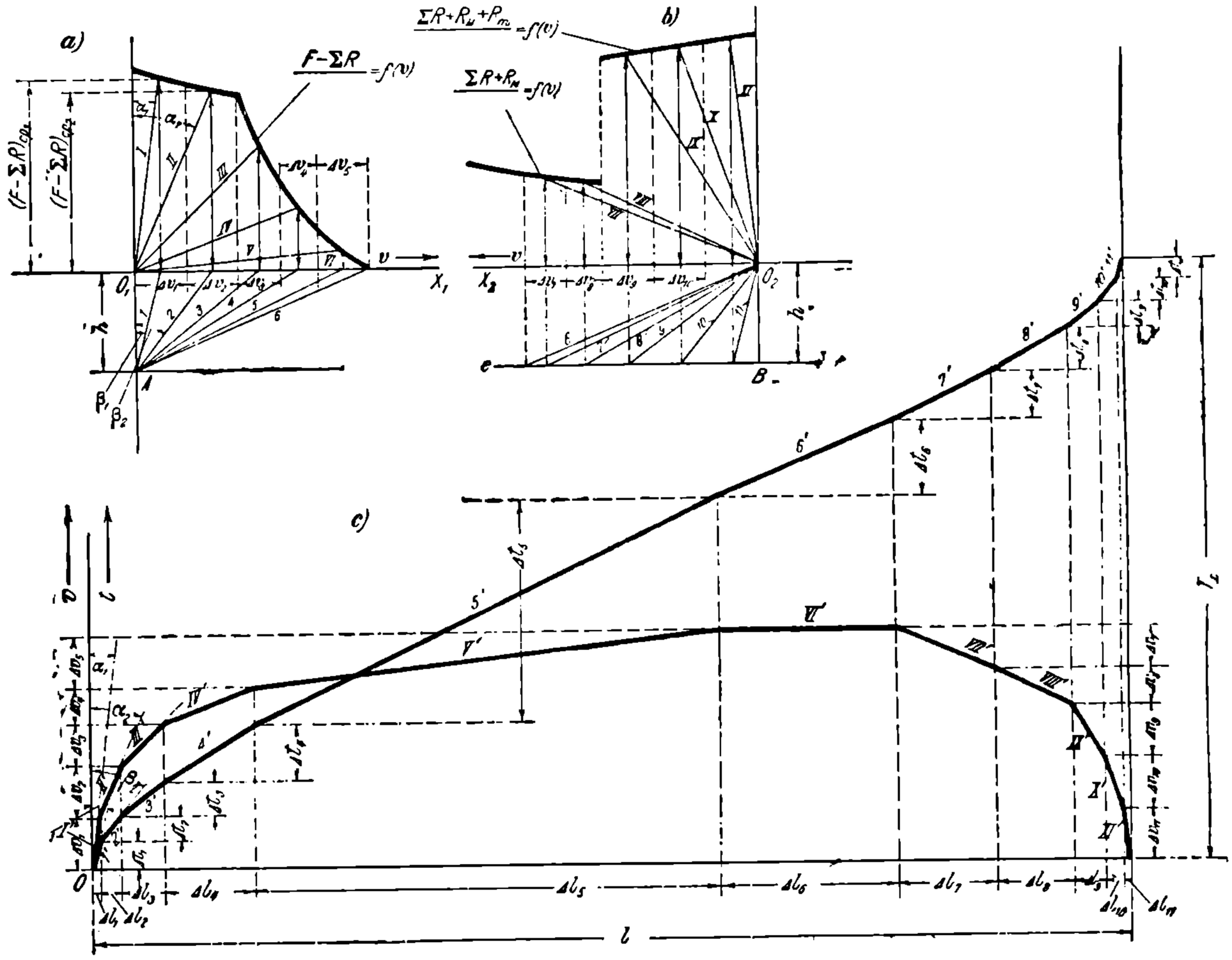
$$\frac{m_v v_{cp}}{m_k(F-\Sigma R)_{cp}}=\frac{m_l\Delta l}{m_v\Delta v}. \tag{315}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Приведенное построение, очевидно, дает для Δl правильные значения, если между членами данного уравнения соблюдено соотношение (314), а для этого необходимо, при принятых единицах измерений и принятых масштабах, соблюсти следующее основное соотношение между масштабами:

$$M_n m_k m_l = 3{,}6^2 m^2_v. \qquad (316)$$

Это выражение показывает, что произвольно задаться при данном методе можно только двумя масштабами, третий же определится из равенства (316).


a)
b)
c)
$F-\Sigma R=f(v)$
$\Sigma R+R_м=f(v)$
$\Sigma R+R_м+P_m=f(v)$
$(F-\Sigma R)_{cp_1}$
$(F-\Sigma R)_{cp_2}$
v
X_1
X_2
O_1
O_2
h
h'
β_1
β_2
α_1
α_2
$\Delta v_1+\Delta v_2$
$\Delta v_1+\Delta v_2+\Delta v_3$
$\Delta v_1+\Delta v_2+\Delta v_3+\Delta v_4$
$\Delta v_1+\Delta v_2+\Delta v_3+\Delta v_4+\Delta v_5$
$\Delta v_1+\Delta v_2+\Delta v_3+\Delta v_4+\Delta v_5+\Delta v_6$
$\Delta v_1+\Delta v_2+\Delta v_3+\Delta v_4+\Delta v_5+\Delta v_6+\Delta v_7$
$\Delta v_1+\Delta v_2+\Delta v_3+\Delta v_4+\Delta v_5+\Delta v_6+\Delta v_7+\Delta v_8$
$\Delta v_1+\Delta v_2+\Delta v_3+\Delta v_4+\Delta v_5+\Delta v_6+\Delta v_7+\Delta v_8+\Delta v_9$
$\Delta v_1+\Delta v_2+\Delta v_3+\Delta v_4+\Delta v_5+\Delta v_6+\Delta v_7+\Delta v_8+\Delta v_9+\Delta v_{10}$
$\Delta v_1+\Delta v_2+\Delta v_3+\Delta v_4+\Delta v_5+\Delta v_6+\Delta v_7+\Delta v_8+\Delta v_9+\Delta v_{10}+\Delta v_{11}$
v_{max}
v_m
l
l_1
Δl_1
Δl_2
Δl_3
Δl_4
Δl_5
Δl_6
Δl_7
Δl_8
Δl_9
Δl_{10}
Δl_{11}
θ_1
θ_2
θ_3
θ_4
θ_5
θ_6
θ_7
θ_8
θ_9
θ_{10}
θ_{11}
θ_{12}
θ_{13}
θ_{14}
θ_{15}
θ_{16}
θ_{17}
θ_{18}
θ_{19}
θ_{20}
θ_{21}
θ_{22}
θ_{23}
θ_{24}
θ_{25}
θ_{26}
θ_{27}
θ_{28}
θ_{29}
θ_{30}
θ_{31}
θ_{32}
θ_{33}
θ_{34}
θ_{35}
θ_{36}
θ_{37}
θ_{38}
θ_{39}
θ_{40}
θ_{41}
θ_{42}
θ_{43}
θ_{44}
θ_{45}
θ_{46}
θ_{47}
θ_{48}
θ_{49}

Метод построения кривой $l=f(t)$ приведен на рис. 349. Согласно условию предположено, что кривая $v=f(t)$ уже определена и что для каждого интервала Δv имеется соответственно Δt. Для построения $l=f(t)$ прежде всего строят пучки векторов с полюсными расстояниями h и с конечными точками в точках средних скоростей по отдельным интервалам последних. Слева на рис. 349 нанесен пучок для скоростных интервалов движения поезда под током, а справа — для выбега и торможения. Метод установления величины h будет указан ниже.

После построения пучков проводится параллельно лучу *1* луч *1'* до пересечения его с перпендикуляром, восставленным из конца имеющегося уже интервала Δt_1 кривой $v=f(t)$. Далее таким же образом наносятся лучи *2'*, *3'*, *4* и т. д. Теперь остается только доказать, действительно ли полученная указанным способом кривая будет искомой, и если это так, то не требуется ли при построении соблюдать какие либо условия для констант этого построения.

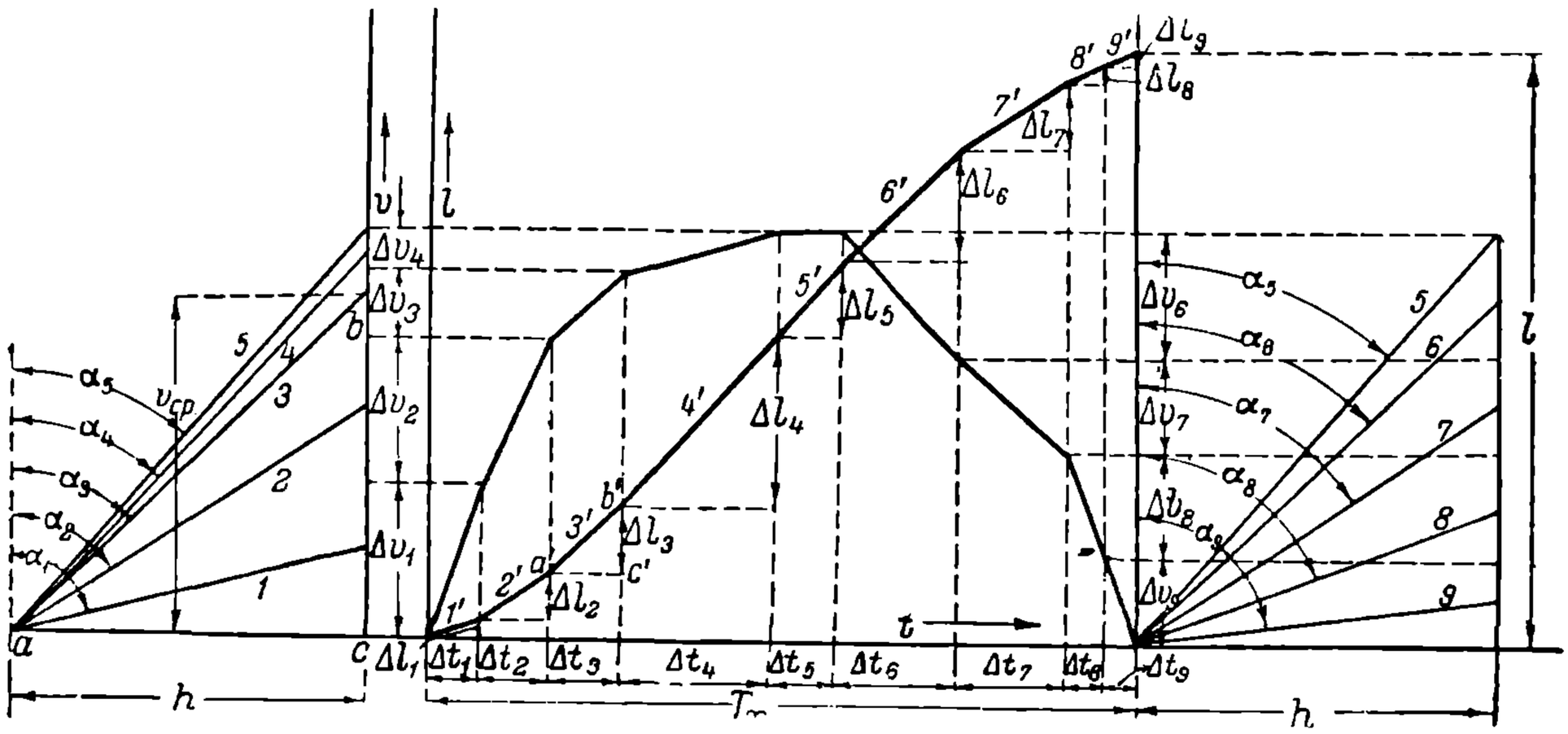


Рис. 349. Диаграмма построения кривой $l=f(t)$ по данной зависимости $v=f(t)$.

Для доказательства возьмем в любом интервале скорости, например Δv_3, уже построенный луч 3 и на основании любой пары треугольников типа abc и $a'b'c'$ напишем соотношения:

$$h = m_v v_{cp} \operatorname{tg} \alpha;$$

$$m_t \Delta t = m_l \Delta l \operatorname{tg} \alpha.$$

Значки перед отдельными членами здесь не поставлены, так как вместо треугольников abc и $a'b'c'$ можно взять любую другую соответствующую пару, и конечный результат получится тем же самым.

Путем деления первого выражения на второе и некоторого преобразования полученного результата приходим к выражению:

$$\Delta l = v_{cp} \Delta t \frac{m_v m_t}{m_l h}. \qquad (317)$$

Не требует, конечно, доказательств утверждение, что произведенное построение будет правильно только в том случае, если будет соблюдено в принятых единицах основное соотношение механики:

$$\Delta l = \frac{v_{cp}}{3{,}6} \Delta t. \qquad (318)$$

Анализируя полученное выражение (317), видим, что оно будет действительно соответствовать основному уравнению механики (318) в отношении своих переменных величин Δl, v_{cp} и Δt, но при условии, если будет иметь место следующее соотношение между константами построения:

$$3{,}6 m_v m_t = m_l h. \qquad (319)$$

Полученное выражение (319) указывает, что для правильности построения из четырех входящих в него величин произвольно можно задаваться только тремя.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Если масштабы m_v и m_t были уже выбраны в процессе построения кривой $v=f(t)$, то, очевидно, из двух оставшихся величин m_l и h задаться произвольно можно только одной.

Полезно указать, что при одновременном построении кривых $v=f(t)$ и $l=f(t)$ можно в некоторых случаях обойтись без измерения площади первой кривой. Определить правильность построения может тогда кривая $l=f(t)$, конечная ордината которой должна соответствовать длине перегона. Вариируя скорости начала выбега и начала торможения, можно с помощью параллельного перемещения кривых выбега и торможения добиться заданного T_x при заданном перегоне l.

Построение кривой $t=f(l)$ при известной кривой $v=f(l)$. Из числа способов построения искомого типа кривой здесь будет разобран метод инж. Лебедева. Обычно это построение сочетается с построением по методу Липеца. Ввиду этого очень удобно оба построения производить на одном и том же чертеже, что и сделано в данном случае (рис. 348).

Для построения диаграммы Лебедева откладывается вниз по оси ординат соответственно выбранный отрезок h. На диаграмме a точка A соединяется с концами отрезков v_{cp_1}, v_{cp_2} и т. д. лучами *1, 2, 3,* На диаграмме b через точку B проводится прямая BC, параллельная оси абсцисс; на нее сносятся концы отрезков v_{cp_7}, v_{cp_8} и т. д., и проводятся лучи *6, 7, 8* и т. д. (луч *6* на диаграмме a и *6* на диграмме b параллельны). Затем из точки O на диаграмме c проводится луч *1'*, параллельный лучу *1*, до пересечения с вертикалью, проходящей через конец отрезка Δl_1; из этой точки пересечения — луч *2'* параллельно лучу *2* до пересечения с вертикалью, проходящей через конец отрезка Δl_2 и т. д. Проекции отрезков *1', 2'* и т. д. на ось ординат дадут величины Δt_1, Δt_2 и т. д.

Действительно, из диаграмм a и c рис. 348 следует:

$$\operatorname{tg}\beta=\frac{m_v v_{cp}}{h} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg}\beta=\frac{m_l \Delta l}{m_t \Delta t}\,.$$

Отсюда:

$$\frac{m_v v_{cp}}{h}=\frac{m_l \Delta l}{m_t \Delta t}\,. \tag{320}$$

В принятых единицах измерений должно быть соблюдено равенство:

$$\frac{v_{cp}}{3{,}6}=\frac{\Delta l}{\Delta t}\,. \tag{321}$$

Из сопоставления равенств (320 и 321) видно, что произведенное построение дает правильное значение для Δt, если соблюдено соотношение:

$$3{,}6\, m_v m_t = m_l h. \tag{322}$$

При установленных выше масштабах m_v и m_t равенство (322) ограничивает свободу выбора m_l и h и допускает произвольный выбор только одной из этих величин, причем другая определяется из данного равенства путем вычисления.

Учет изменения профиля при графических методах. В тех случаях, когда поезд движется по меняющемуся профилю, сопротивления движению соответственно меняют свою величину в зависимости от уклонов. Перестраивать для каждого элемента профиля полностью диаграмму ускоряющих и замедляющих усилий, если не применить упрощающих это построение методов,—задача очень кропотливая.

Для того, чтобы по возможности ее упростить, удобнее всего, не перестраивая всей диаграммы, переносить в ней только центры отсчетов или положение осей абсцисс. На рис. 350 дана диаграмма ускоряющих усилий для метода Липеца с указанием, как нужно производить построение, если при основном первоначальном построении она была выполнена для $i=0$, а затем в некотором интервале скоростей, взятым для примера на рис. 350 под № *III*, поезд переходит на уклон $i=i_3$.

Из приведенного частного случая вытекает следующее общее правило. Во всех тех случаях, когда в каком-либо интервале Δv появляется уклон i_k, лучи следует проводить из нового центра, отстоящего на $\pm i_k G_n$ от основного, если основной взят для $i=0$. Для периода движения под током новые центры откладываются при подъемах вверх, при скатах — вниз. Для периодов выбега и торможения порядок откладывания обратный

НБ УДУНТ (ДІІТ)

По методам Destouits и Дегтярева — Müller'a вопрос принципиально решается таким же образом, но только в этих случаях следует передвигать на такие же расстояния не одну точку начала отсчетов, а всю ось абсцисс. При построении кривых типа $t=f(t)$ уклоны особых изменений не вносят. Форма этих кривых меняется сама собою в зависимости от изменения кривых $v=f(t)$ или $v=f(l)$, на базе которых они строятся.

В заключение изложения вопроса построения кривых движения поезда нужно указать, что все они строились, исходя из полных значений на весь поезд силы тяги F, ускоряющих усилий $F-\Sigma R$, замедляющих усилий $\Sigma R+R_{\kappa}$ и $\Sigma R+R_{\kappa}+R_{m}$. В практике расчетов иногда удобней исходить из удельных значений этих величин с отнесением их на одну тонну веса поезда. Естественно, что при этом методика построения остается без изменения.

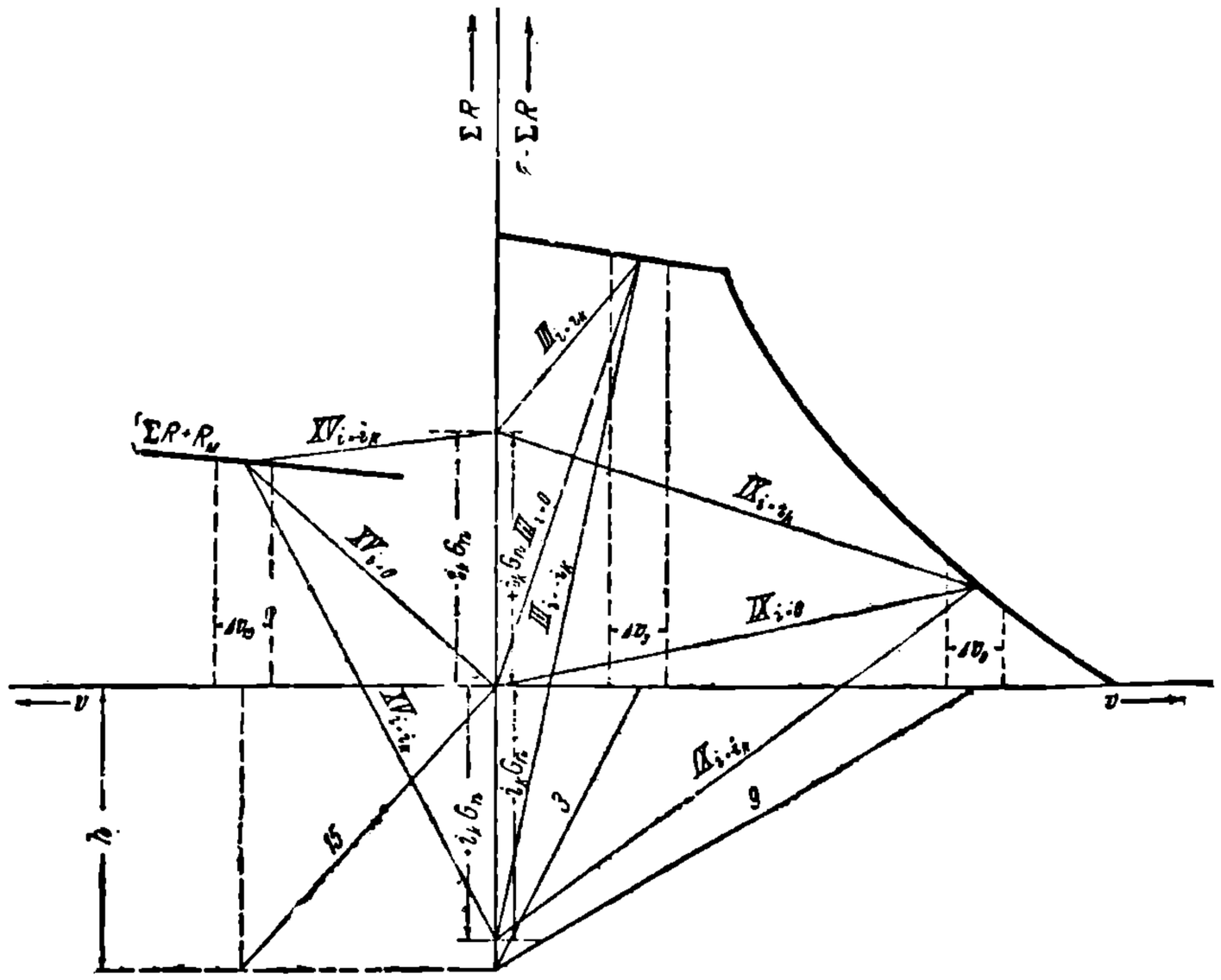


Рис. 350. Диаграмма для учета уклонов при методе Липеца.

4. Методы аналитического интегрирования уравнения движения.

Интегрирование уравнения движения аналитическим способом принципиально сулит большие преимущества. Однако, ряд больших осложнений не позволяет этому методу получить широкое практическое распространение. Для того, чтобы иметь возможность проинтегрировать уравнение движения, прежде всего необходимо ввести в него вместо трех переменных — времени, скорости и силы тяги — только две. Достигнуть этого удобнее всего можно, выразив силу тяги через скорость, для чего требуется представить в аналитической форме механическую характеристику $F=f(v)$.

В этом заключается первое осложнение, так как существующие типы электродвигателей, главным образом, вследствие насыщения магнитной системы, не обладают кривой $F=(v)$, точно соответствующей какой-либо определенной геометрической зависимости.

Ввиду этого искомую кривую приходится устанавливать приближенно, подбирая для нее коэфициенты на основе анализа существующих типов двигателей (Л. 196). Для последовательных двигателей, имеющих наибольшее применение, в качестве такой кривой можно рекомендовать:

$$F=\frac{AKW_h}{v-Bv_h}-CF_h. \qquad (323)$$

Для средних типов двигателей постоянного типа можно применять коэфициенты $A=200$, $B=0{,}58$ и $C=0{,}3$. Для коллекторных двигателей однофазного тока в среднем можно полагать $A=270$, $B=0{,}475$ и $C=0{,}4$. Нужно иметь в виду, что приведенные цифры дают только средние значения и что в отдельных случаях могут иметь место значительные от них отступления. Для шунтовых электродвигателей и, в частности, трехфазных асинхронных также можно путем анализа существующих типов определить аналитическую кривую $F=f(v)$. Задача здесь несколько облегчается тем, что в двигателях с шунтовой характеристикой скорость меняется относительно незначительно с изменением силы тяги в широких пределах (Л. 196).

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

При таком выражении кривой $F=f(v)$ интеграл уравнения движения применительно к последовательным двигателям примет форму:

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = \frac{1}{3{,}6} \int_{v_1}^{v_2} \frac{M_n dv}{\frac{AKW_h}{v-Bv_h} - \Sigma R - CF_h},$$

или если выразить ΣR через скорость:

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = \frac{1}{3{,}6} \int_{v_1}^{v_2} \frac{M_n dv}{\frac{AKW_h}{v-Bv_h} - (a+bv+cv^2)G_n - CF_h}. \qquad (324)$$

При таком виде интеграла решение его очень сложно, и практически он непригоден для нормальных расчетов. Необходимо его упростить, введя дальнейшие допущения. Первый способ упрощения может быть построен на допущении, что сопротивление движению есть постоянная величина, не зависящая от скорости, и равная среднему значению за данный период интегрирования. В целях уточнения расчетов можно рекомендовать интегрирование по отдельным периодам, для каждого из которых берутся соответствующие средние значения сопротивлений. При таких условиях порядок интегрирования может быть следующим.

Как известно пусковые устройства конструируются так, что сила тока регулируется на приблизительно постоянную силу тяги. Поэтому с начала движения до выхода на автоматическую кривую можно положить силу тяги постоянной, соответствующей выбранному ускорению:

$$F = F_n.$$

При таком условии время движения под регуляторами, выраженное в sec:

$$T_n = \frac{v_n}{3{,}6\,a_n}, \qquad (325)$$

где a_n—среднее ускорение в m/sec² за период T_n.

Второй интеграл определяет расстояние, проходимое поездом во время разгона под регуляторами. При l в метрах:

$$l_n = \int_0^{T_n} \frac{v\,dt}{3{,}6},$$

где v—скорости в период движения под регуляторами.

Дальше имеют место соотношения:

$$v = 3{,}6\,a_n t, \quad t = \frac{v}{3{,}6\,a_n} \quad \text{и} \quad dt = \frac{dv}{3{,}6\,a_n}.$$

Подставляя и интегрируя в пределах скорости от $v_1=0$ до $v_2=v_n$, можно получить:

$$l_n = \int_0^{v_n} \frac{v\,dv}{3{,}6^2 a_n},$$

или

$$l_n = \frac{v_n^2}{2\times 3{,}6^2 a_n}. \qquad (326)$$

При движении по автоматической кривой сила тяги является величиной переменной, зависящей от скорости. При условии $\Sigma R = \text{const}$ основной интеграл (324) примет следующую форму:

$$T'_a = \int_{t_1}^{t} dt = \frac{1}{3{,}6} \int_{v_1}^{v} \frac{M_n}{\frac{AKW_h}{Bv_h} - (\Sigma R + CF_h)}\, dv,$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

где t и v — текущие значения, а t_1 и v_1 — значения в начальный момент данного режима. Интегрирование дает:

$$T'_a = -\frac{M_n}{3{,}6(\Sigma R + CF_h)}\left[(v - v_1) + \frac{AKW_h}{\Sigma R + CF_h}\ln\frac{\frac{AKW_h}{\Sigma R + CF_h} - (v - Bv_h)}{\frac{AKW_h}{\Sigma R + CF_h} - (v_1 - Bv_h)}\right]. \quad (327)$$

Это уравнение позволяет построить кривую $v = f(t)$; для этого надо задаваться значениями v и вычислением получать соответствующие значения t. Если желательно определить только период времени, за который скорость меняется от v_n до v_{max}, то надо подставить в формулу (327) значения $v_1 = v_n$ и $v = v_{max}$. Последнюю скорость можно определить, исходя из того соображения, что при v_{max} сумма всех сопротивлений равна силе тяги ($\Sigma R_{max} = F$). Пользуясь универсальной формулой (323), находим:

$$v_{max} = \frac{AKW_h}{\Sigma R_{max} + CF_h} + Bv_h. \quad (328)$$

При этом, однако, нужно иметь в виду, что слишком большие интервалы могут повлечь за собой значительную ошибку, почему переходить от v_n к v_{max} по одной ступени интегрирования следует с большой осторожностью.

Второй интеграл дает расстояние, проходимое поездом за время нарастания скорости с v_n до v:

$$l'_a = -\frac{M_n}{3{,}6^2(\Sigma R + CF_h)} \times$$

$$\times\left[\frac{v^2 - v_n^2}{2} + \frac{AKW_h}{\Sigma R + CF_h}(v - v_n) + \frac{AKW_h}{\Sigma R + CF_h}\left(\frac{AKW_h}{\Sigma R + CF_h} + Bv_h\right)\ln\frac{\frac{AKW_h}{\Sigma R + CF_h} - (v - Bv_h)}{\frac{AKW_h}{\Sigma R + CF_h} - (v_n - Bv_h)}\right]. \quad (329)$$

Для получения всего расстояния, пройденного за время увеличения скорости от v_n до v_{max}, надо в эту формулу подставить значение $v = v_{max}$.

После периода ускорения начинается движение с постоянной скоростью. Если l''_a — расстояние, пройденное с постоянной скоростью v_{max}, то время, за которое это расстояние проходится поездом:

$$T''_a = \frac{3{,}6\, l''_a}{v_{max}}. \quad (330)$$

При допущении постоянства сопротивления движению ΣR и сопротивления двигателей $R_м$, для выбега будет иметь место выражение:

$$T_в = \frac{M_n}{3{,}6(\Sigma R + R_м)}(v_{max} - v_m). \quad (331)$$

Здесь v_m — скорость, при которой начинается торможение. Расстояние, проходимое поездом по инерции до момента торможения:

$$l_в = \frac{M_n}{2 \times 3{,}6^2(\Sigma R + R_м)}(v_{max}^2 - v_m^2). \quad (332)$$

Следует указать, что основной интеграл движения (324) для выбега без допущений постоянства ΣR получает форму:

$$T_в = -\frac{1}{3{,}6}\int_{v_{max}}^{v_m}\frac{M_n\, dv}{(a + bv + cv^2)G_n + R_м + CF_h} \quad (333)$$

Данный интеграл берется относительно легко, ввиду чего при желании уточнить расчет можно исходить из его решения.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Время торможения, определяемое таким же образом, как и для выбега, должно быть взято в пределах от v_m до 0. При допущении постоянства $\Sigma R + R_и + R_т$ оно выразится:

$$T_m = \frac{M_n}{3{,}6(\Sigma R + R_и + R_т)} v_m, \tag{334}$$

или иначе:

$$T_m = \frac{v_m}{3{,}6\, a_m},$$

где a_m — замедление при торможении в m/sec².

Расстояние, пройденное поездом за время торможения:

$$l_m = \frac{v_m^2}{2 \times 3{,}6^2\, a_m}. \tag{335}$$

В случае желания уточнить расчет торможения можно исходить так же, как при выбеге, из уравнения типа (333), причем для R_m можно ввести выражение его в функции от скорости. Например, при торможении колодками оно определится зависимостью от скорости коэфициента трения колодок по бандажам (191).

Суммируя полученные значения времени и расстояний, можно определить все ходовое время:

$$T_x = T_п + T'_a + T''_a + T_в + T_m \tag{336}$$

и пройденное поездом расстояние:

$$l = l_п + l'_a + l''_a + l_в + l_m. \tag{337}$$

Произведенный способ интегрирования уравнения движения предполагает, что сопротивления движению приняты постоянными. Другой способ решения той же задачи заключается в подборе зависимости ускоряющих и замедляющих усилий непосредственно от скорости, не выражая эту зависимость отдельно для тяги и сопротивлений движению. Следуя методу Carter'a, выражение для остаточных тяговых усилий можно представить в виде:

$$F - \Sigma R = \frac{P_0}{v - v_0} + F_0. \tag{338}$$

Для определения постоянных, входящих в это уравнение, необходимо иметь предварительно построенную кривую ускоряющих усилий для площадки. Для каких-либо трех ее точек определяются соответствующие значения $F - \Sigma R$ и v, и затем применительно к выражению (338) составляются три уравнения с неизвестными P_0, v_0 и F_0, откуда последние и определяются по общим правилам алгебры. После этого интегрирование производится совершенно так же, как и в предыдущем случае, потому что по форме интегралы совершенно идентичны.

В том случае, если поезд движется не на площадке, а на уклоне, уравнение (338) при тех же постоянных должно принять форму:

$$F - \Sigma R = \frac{P_0}{v - v_0} + F_0 \pm iG_п.$$

Весь процесс интегрирования останется тем же самым, только вместо F_0 войдет величина $F_0 \pm iG_п$.

5. Определение времен хода поезда методом установившихся скоростей.

В зависимости от характера расчета, построение кривых движения можно вести по одному из разобранных выше методов, причем в случае коротких перегонов чаще применяют метод Mailoux, а в случае длинных обычно прибегают к методу Липеца — Лебедева. Метод аналитического интегрирования уравнений движения на практике применяется очень редко.

В случае линий большой протяженности применение точных методов построения кривых движения поезда требует чрезмерно большой затраты времени и практически поэтому часто невозможно. В таких случаях прибегают обыкновенно к методу установившихся скоростей, называемому часто графоаналитическим. В основе его лежит допущение, что скорость движения мгновенно устанавливается, как только поезд вступает на новый участок пути, уклон которого или является величиной постоянной, или может быть принят за постоянный.

Неточность этого метод вызывается трудностью учета влияния переломов профиля, а также периода разгона и торможения поезда на время хода. Первой неточ-

НБ УИУНТ (ДІІТ)

ностью часто пренебрегают, считая, что выигрыши и проигрыши времени, вызываемые переломами профиля, взаимно компенсируют друг друга. Для смягчения второй неточности рекомендуется вводить специальные поправки. При ориентировочных расчетах можно принимать их для электрической тяги равными около 2 минут на перегон, учитывая этой цифрой потерю времени на разгон и торможение поезда. При более точных подсчетах рекомендуется для установления поправок строить специальные кривые разгона и торможения поезда. Они должны быть построены для наиболее характерных уклонов, на которых производятся разгон и торможение поезда. Путем интерполирования этих кривых можно быстро и достаточно точно определить искомые поправки для каждого перегона в отдельности, а затем и для всей линии.

ТАБЛИЦА 57.

Порядок вычисления по методу установившихся скоростей.

Величина уклона на каждом данном участке профиля $i^0/_{00}$	Скорость в km/h, соответствующая данному уклону v_i	Длина рассматриваемого участка в m Δl	Время хода по данному участку в min $\Delta t = \frac{0{,}06\,\Delta l}{v_i}$
i_1	v_1	Δl_1	Δt_1
i_2	v_2	Δl_2	Δt_2
i_n	v_n	Δl_n	Δt_n

При применении метода установившихся скоростей полезно придерживаться порядка вычислений согласно табл. 57.

Сумма $\sum_1^n \Delta l$ должна дать длину рассматриваемого участка линии, $\sum_1^n \Delta t$ — время хода и $\frac{0{,}06\sum_1^n \Delta l}{\sum_1^n \Delta t}$ — средне-ходовую или, если учитывались остановки, коммерческую скорость движения.

Для составления табл. 57 полезно предварительно построить кривые рис. 351. Кривая *A* (рис. 351) дает механическую характеристику поезда. Кривая *I* представляет сопротивления движению для участков пути с $i=0$, кривые *II*, *III*, ... для $i>0$ и кривые *II'*, *III'* ... для $i<0$. При наличии кривых рис. 351, построив по ним кривую $v_i=f(i)$, легко найти для каждого уклона соответствующую ему скорость установившегося режима.

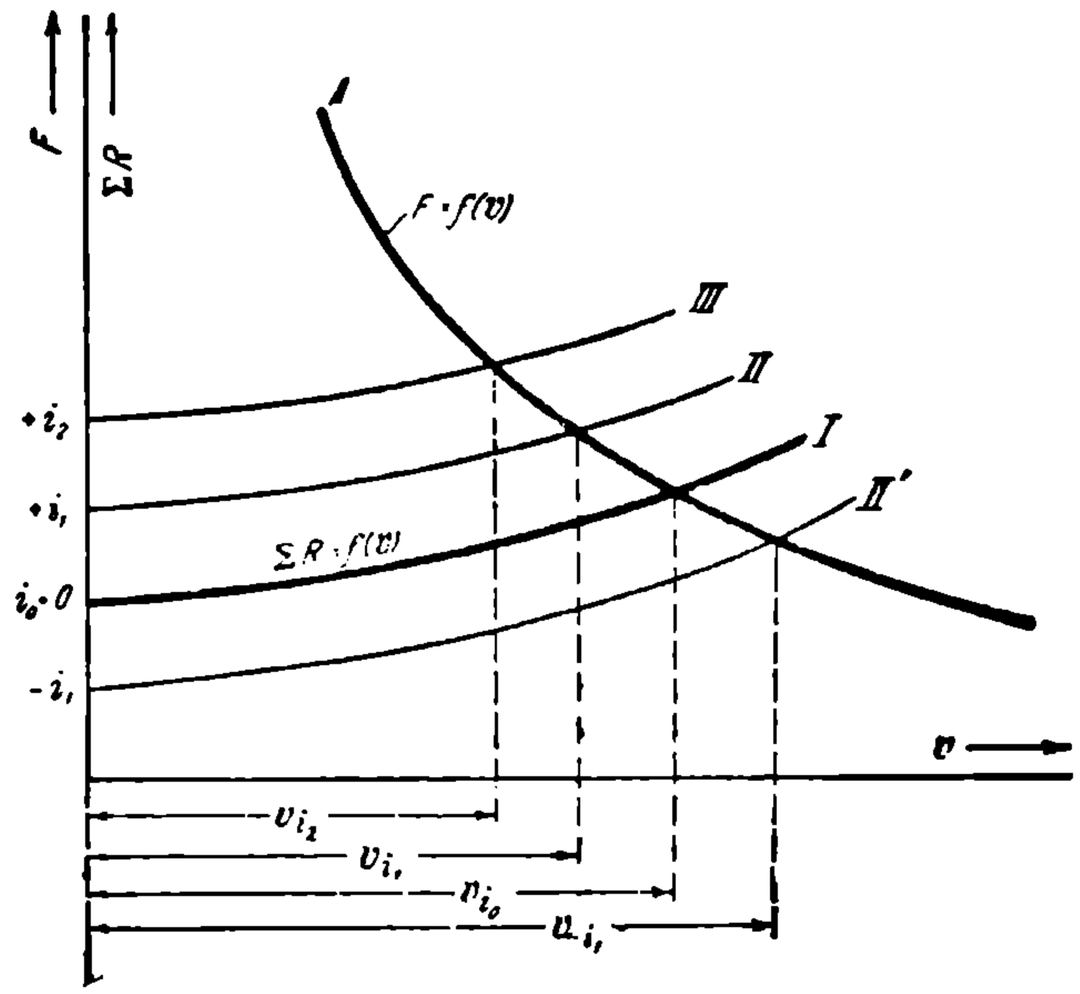


Рис. 351. Диаграмма к методу установившихся скоростей.

VI. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТОКА И ЭНЕРГИИ НА ДВИЖЕНИЕ.

1. Определение потребления тока.

Кривую потребления тока поездом наиболее рационально строить в зависимости от времени. Имея зависимость $I=f(t)$, можно от нее легко перейти к средним значениям тока за определенный интервал времени, а затем определить и средний ток за время того или другого периода движения.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Для построения кривой $I=f(t)$ необходимо иметь предварительно построенными характеристики двигателей и кривую движения поезда $v=f(t)$, причем последняя может быть заменена кривыми $v=f(l)$ и $l=f(t)$, так как наличие этих двух

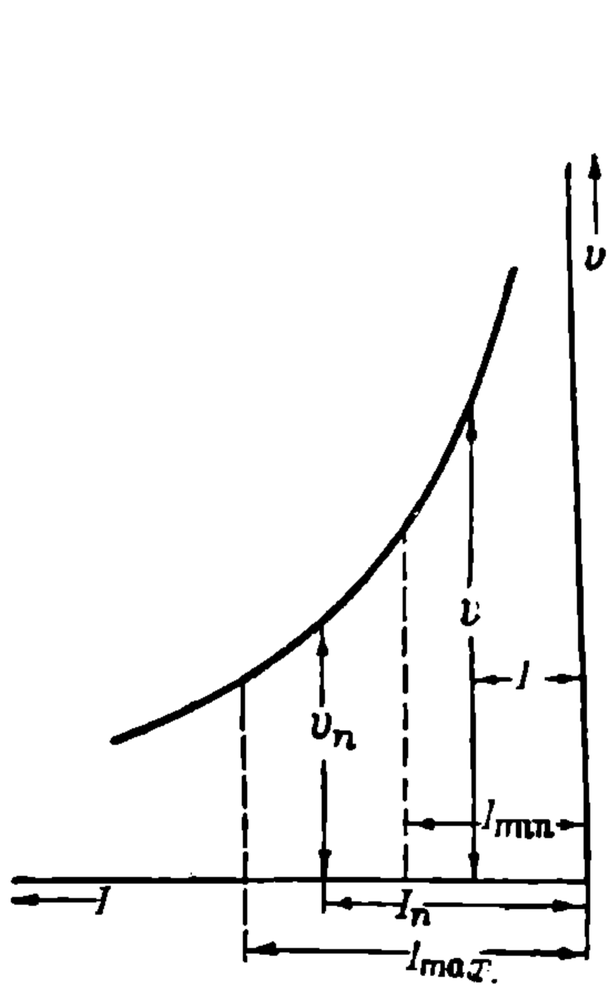


Рис. 352. Диаграмма к определению кривой потребления тока.

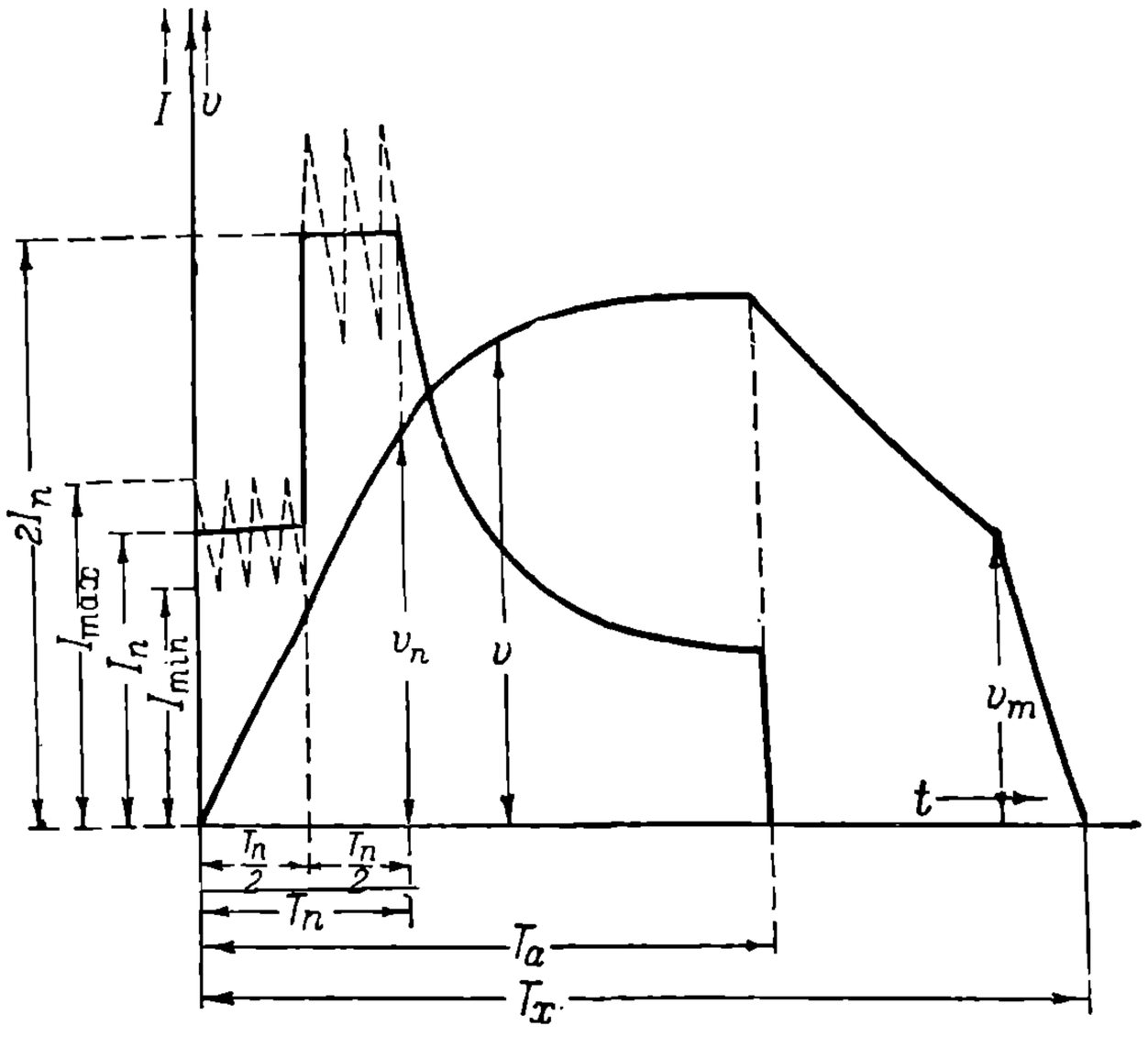


Рис. 353. Кривая $I=f(t)$ для двухступенчатого пуска в ход тяговых электродвигателей.

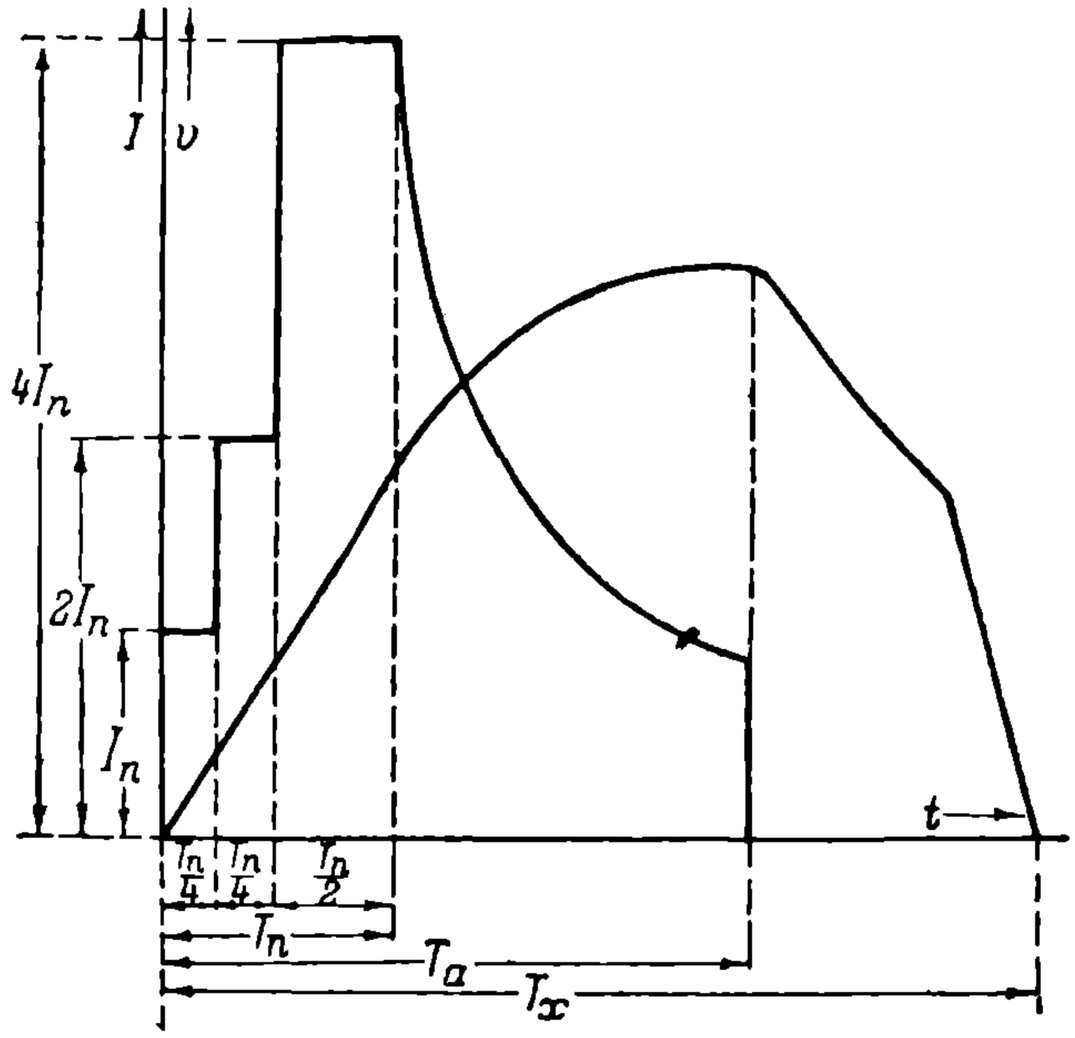


Рис. 354. Кривая $I=f(t)$ для трехступенчатой системы пуска в ход тяговых электродвигателей.

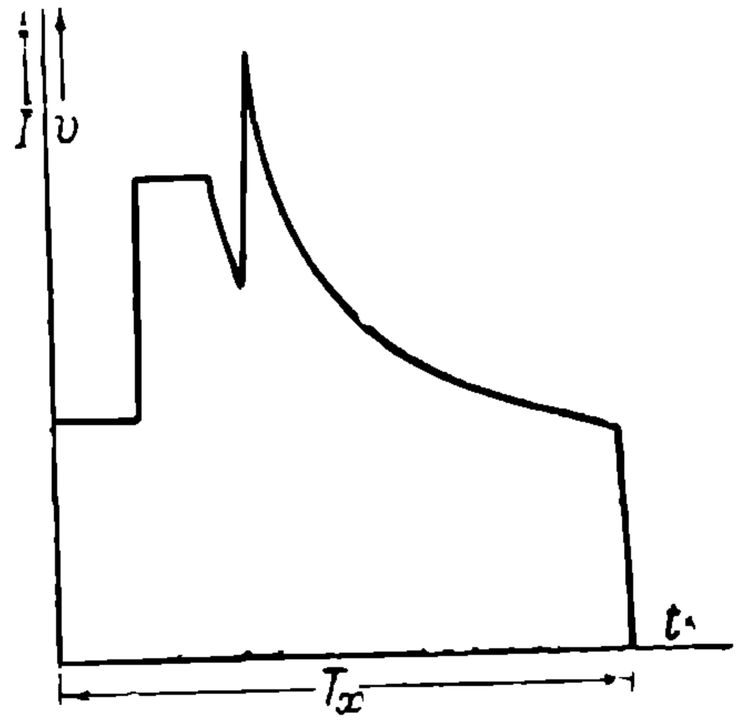


Рис. 355. Кривая $I=f(t)$ при применении ослабления поля.

кривых также дает возможность для каждой точки работы установить связь между I и t. При построении искомой кривой для каждого данного момента времени t определяют по кривой $v=f(t)$ или комбинации кривых $v=f(l)$ и $l=f(t)$ соответствующую скорость поезда v и затем по характеристике двигателя $v=f(I)$ устанавливают ток, потребляемый последним при этой скорости (рис. 352).

При работающих параллельно двигателях или группах последовательно включенных двигателей, следует силу тока, определяемую по характеристике, умножать на число параллельных групп. Это положение остается в силе и для пускового периода при комбинированном включении двигателей.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

На рис. 353 приведено построение кривой $I=f(t)$ для случая двух двигателей или двух групп последовательно включенных двигателей. При пуске двигатели сначала включены последовательно, а затем переводятся на параллельное включение. При последовательном их включении общий ток цепи равен току одного двигателя, а при параллельном — удвоенной его величине. Время разгона поезда под реостатами T_n, как было уже выяснено в отделе III, если не учитывать небольшого влияния изменения в процессе разгона сопротивления движению, должно поделиться приблизительно поровну между последовательным и параллельным периодами разгона. При расчете пусковой ток принимается равным среднему его значению, между тем как в действительности он претерпевает колебания от I_{max} до I_{min}. На диаграмме последнее явление отмечено пунктирно показанными зубцами. Рис. 354 дает картину трехступенчатого пуска при четырех двигателях. Здесь при первых двух положениях (при последовательном включении всех четырех двигателей и при последовательно-параллельном) длительность определяется величиной $^1/_4\ T_n$, а на третьей ступени, при четырех параллельно включенных двигателях — $^1/_2\ T_n$.

В случае ослабления поля при пуске построение диаграммы тока принципиально остается тем же самым. Здесь нужно еще только иметь характеристики двигателей при ослабленном поле. В том же отделе III было отмечено, что для поддержания постоянной пусковой тяги ступени с ослабленным полем должны получить ток больший, чем при нормальном поле (рис. 355). При поддержании тока постоянным, как это нередко делают, период разгона с ослаблением поля проходит при уменьшенной тяге, а следовательно, и при некотором снижении среднего пускового ускорения.

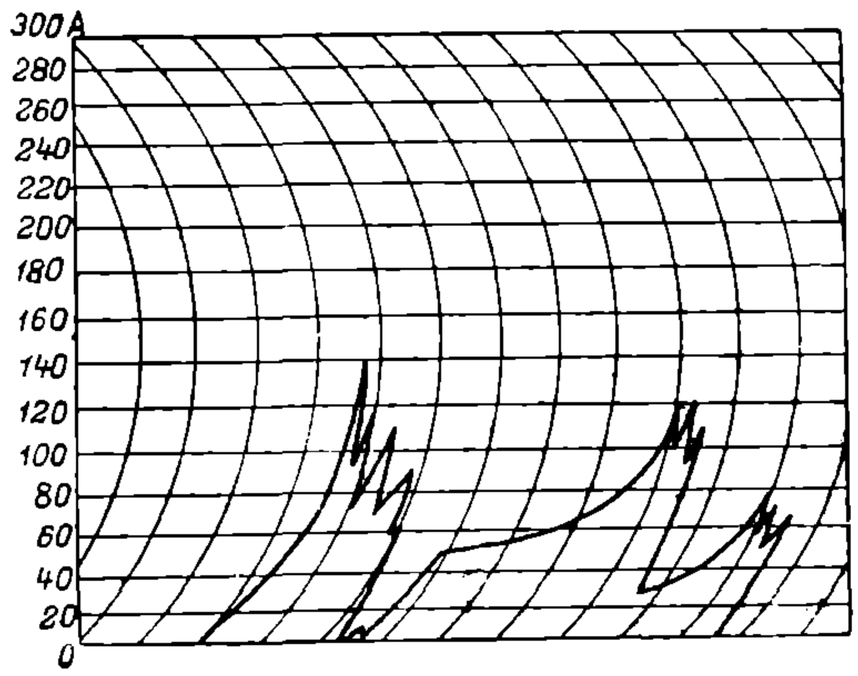


Рис. 356. Кривая $I=f(t)$ при движении трамвайного вагона при тяге и при электрическом рабочем торможении.

Для иллюстрации изменения тока в цепи двигателей на рис. 356 приведены кривые, снятые автором с помощью самопишущих искровых приборов Ленинградского индустриального института. Кривые характеризуют работу моторного вагона ленинградского трамвая при электрическом торможении. Правые части диаграммы относятся к процессу потребления тока, а левые — к току машин во время электрического торможения. Масштаб времени на оси абсцисс определяется расстояниями между дугами диаграммы, равными 6 секундам.

2. Определение расхода энергии.

Определение расхода энергии при данной зависимости $I=f(t)$. При наличии кривой $I=f(t)$ определение расхода энергии не представляет особых затруднений. За любой промежуток времени t оно определяется при условии постоянства напряжения сети U интегралом:

$$A=U\int_0^t Idt. \tag{339}$$

При однофазном токе необходимо считаться с коэфициентом мощности. При точном решении вопроса интеграл должен содержать активную составляющую тока, определяемую по характеристикам двигателя с учетом $\cos\varphi$. При трехфазном токе в формулу (339), а также и во все последующие такого же типа, помимо $\cos\varphi$, необходимо вводить коэфициент, равный $\sqrt{3}$.

Расход энергии при известной кривой $I=f(t)$ наиболее точно определяется путем измерения площади этой кривой, так как она в принятых масштабах соответствует интегралу $\int Idt$. При масштабах времени m_t и тока m_i расход энергии определяется выражением:

$$A=\frac{U[\text{площ}\ I=f(t)]}{m_i m_t}. \tag{340}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

В тяговых расчетах расход энергии чаще всего характеризуется удельной его величиной, представляющей собой количество ватт-часов, потребных для перевозки одной тонны груза на один километр. Тогда удельный расход энергии, при перегоне l в m и G_n в t на основании формулы (340) выражается:

$$\Delta A = \frac{U[\text{площ } I=f(t)]}{3{,}6\, m_t m_l l G_n} \text{ Wh/tkm.} \quad (341)$$

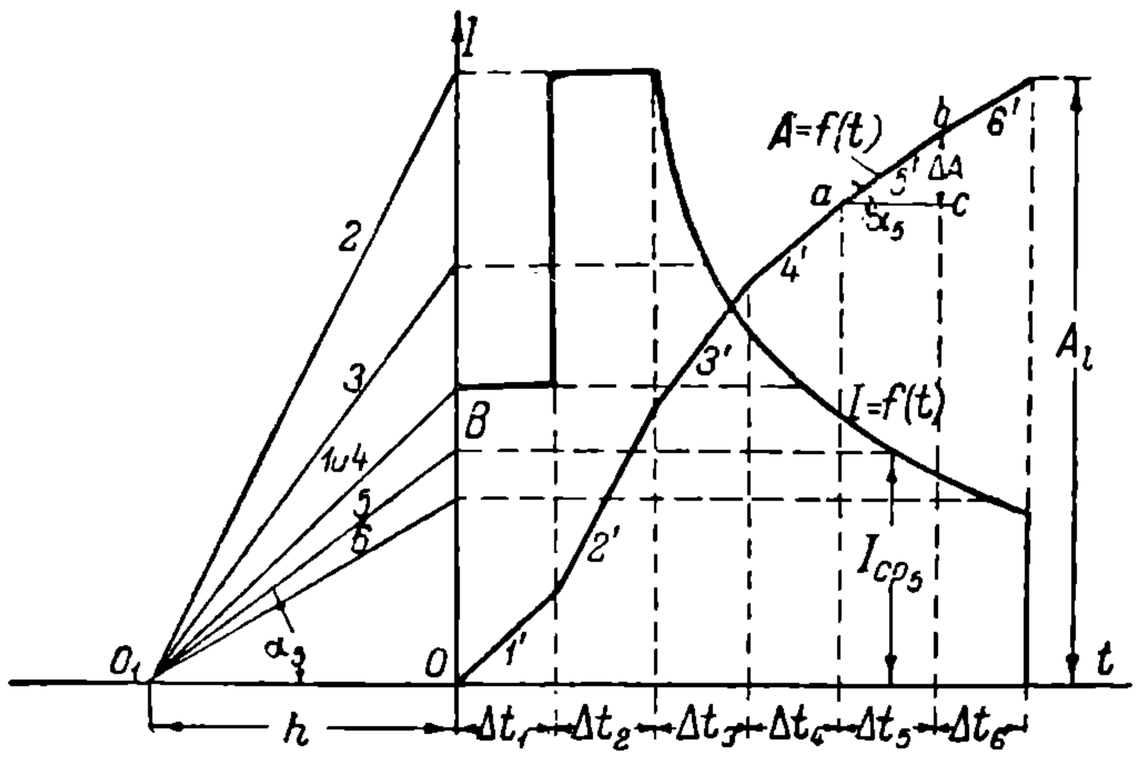


Рис. 357. Диаграмма графического определения расхода электрической энергии на движение.

Вместо нахождения площади, расход энергии более приближенно можно определить путем аналитического суммирования энергии по отдельным элементам времени, в пределах которых ток или остается величиной постоянной, или может быть принят за таковую с достаточной степенью точности. При разделении по такому принципу всего времени нахождения двигателей под током на n элементов удельный расход энергии может быть определен по формуле:

$$\Delta A = \frac{U \sum_1^n I_{cp} \Delta t}{3{,}6\, l G_n} \text{ Wh/tkm.} \quad (342)$$

Помимо разобранных способов, расход энергии легко определить графическим методом. Ввиду аналогии между выражениями $l = \int v dt$ и $A = \int I dt$ представляется возможным определить расход энергии в функции от времени по тому же методу, что и кривую $l = f(t)$, пользуясь для построения, вместо кривой $v = f(t)$ зависимостью $I = f(t)$. Построение приведено на рис. 357. Оно основано на соблюдении не требующего доказательства равенства:

$$\Delta A = U I_{cp} \Delta t, \quad (343)$$

где ΔA в отличие от предыдущих формул здесь и при выводе формулы (344) должно пониматься, как приращение энергии за Δt.

Соотношение (342) указывает, что в пределах каждого интервала времени расход энергии определяется произведением среднего за этот интервал значения тока на данный интервал, причем напряжение сети предполагается постоянным. Как следует из построения рис. 357, все время нахождения поезда под током разбито на ряд элементов, в данном случае на 6. Середины этих элементов, соответствующие средним значениям токов, снесены на ось ординат. Для интервалов, в пределах которых сила тока постоянна, как, например, в *1* и *2*, точки сносятся с учетом этого постоянства. После этого от точки *O* вправо откладывается полюсное расстояние h, из конца которого проводятся лучи *1*, *2*, *3*, *4*, *5* и *6*. Следует отметить, что совпадение лучей *1* и *4* здесь случайное. Далее на основной диаграмме проводится луч *1'* параллельно лучу *1* до пересечения с вертикалью первого интервала времени Δt_1. Затем проводится луч *2'* параллельно *2* и т. д.

Теперь требуется проверить, действительно ли полученная кривая соответствует искомой кривой $A = f(t)$, и если это так, то не требуется ли соблюдения добавочных условий для этого соответствия. Для проверки можно взять $\triangle O_1OB$ и $\triangle abc$ на основании их написать соотношения:

$$m_l I_{cp} = h \operatorname{tg} \alpha$$

и

$$m_A \Delta A = m_t \Delta t \operatorname{tg} \alpha,$$

Так как вместо взятых треугольников можно взять любую другую пару соответствующих, то для обобщения в написанных формулах значки номера интервала опущены. Здесь из новых величин следует иметь в виду m_A, представляющую масштаб энергии.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Деля второе уравнение на первое и преобразуя, получаем:

$$\Delta A = l_{cp} \Delta t \frac{m_i m_t}{m_A h}. \tag{344}$$

Сравнивая полученное выражение с выражением (343), можно сделать заключение, что построение будет произведено правильно, если будет соблюдено условие:

$$m_A h U = m_i m_t. \tag{345}$$

Последнее соотношение показывает, что при $U = \text{const}$ из четырех входящих сюда членов произвольно задаваться допустимо только тремя, как и при построении кривой $l = f(t)$.

Определение расхода энергии методом работы. В тех случаях, когда кривой $I = f(t)$ не имеется, расход энергии на движение приходится определять приближенным методом на основании общего уравнения работы. Энергия, затрачиваемая на перемещение поезда, определяется вредными сопротивлениями движению. В общем случае эти сопротивления разделяются на две основных группы. К первой относятся сопротивления естественные — пути, уклонов, подвижного состава и воздушные. Ко второй группе принадлежат сопротивления, искусственно создаваемые при процессе торможения. Если через l_m обозначить путь, на котором производится торможение поезда, то работа вредных сопротивлений может быть выражена двучленом, в котором первый член означает работу сил сопротивлений до момента торможения, а второй — сопротивления при торможении:

$$A = \int_0^{l - l_m} \Sigma R dl + \int_{l - l_m}^{l} (\Sigma R + R_m)\, dl. \tag{346}$$

Первый интеграл данного выражения приближенно можно выразить через среднее за данный интервал значение сопротивления движению r_{cp} и через некоторый уклон $i_э$, эквивалентный по своему эффекту реально имеющимся на рассматриваемом участке уклонам:

$$\int_0^{l - l_m} \Sigma R dl = (r_{cp} \pm i_э)(l - l_m) G_n.$$

Второй интеграл очень удобно выражается через потерю живой силы при торможении:

$$\int_{l - l_m}^{l} (\Sigma R + R_m)\, dl = \frac{1000 k G_n}{2 \times 9{,}81 \times 3{,}6^2} v_m^2$$

При определении полной энергии, потребной для движения, помимо механических потерь на движение, необходимо учесть потери, связанные с пусковыми реостатами. В главе об их расчете была приведена формула (171) для определения этих потерь. Учитывая, кроме того, потери в самих электродвигателях средним коэфициентом полезного действия η_{cp} можно общее выражение для энергии в джоулях представить в виде:

$$A = [9{,}81 (r_{cp} \pm i_э)(l - l_m + k_n l_n) + 38{,}5\, k (v_m^2 + k_n v_n^2)] \frac{G_n}{\eta_{cp}}. \tag{347}$$

Отсюда удельный расход энергии:

$$\Delta A = [9{,}81 (r_{cp} \pm i_э)(l - l_m + k_n l_n) + 38{,}5\, k (v_m^2 + k_n v_n^2)] \frac{1}{3{,}6\, \eta_{cp} l} \text{ Wh/tkm}. \tag{348}$$

Для предварительных расчетов, при достаточно больших перегонах формулу (348) можно несколько упростить, представив ее в виде:

$$\Delta A = \frac{2{,}73 k_{nm}}{\eta_{cp}} (r_{cp} \pm i_э) \text{ Wh/tkm}. \tag{349}$$

Упрощение это произведено введением поправочного коэфициента k_{nm} взамен второго члена в скобках. При перегонах порядка 20—80 km этот коэфициент для товарных поездов ориентировочно колеблется от 1,15 до 1,06, а для пассажир-

НБ УГУНТ (ДІІТ)

ских—от 1,3 до 1,15. Значение $r_{ср}$ следует определять, исходя из среднеходовых скоростей. Величина $i_э$ определяется по общему правилу нахождения среднего или эквивалентного уклона (Л. 196). Под последним нужно понимать такой общий для всей линии или отдельной ее части уклон, при котором получается такой же расход энергии, как и при учете истинного профиля.

Следует иметь в виду, что все приведенные расчеты энергии относятся к теоретическим случаям. В реальных условиях очень часто наблюдается значительное превышение расчетной энергии. Особенно это относится к трамваям. Из-за уличного движения и общей нерегулярности трамвайного движения неизбежны частое подтормаживание поезда и случайные пуски в ход с относительно длинными периодами нахождения под реостатами. Кроме того, подтормаживать поезд здесь приходится часто и в моменты подхода к кривым, чтобы войти на них с допустимой скоростью. Все это в условиях трамвайного движения вызывает большой добавочный расход энергии, вследствие чего нередко теоретически расход повышается на 30—40%.

Представление о среднетеоретических расходах энергии для равнинных типов дорог при эквивалентном уклоне порядка 0,5—0,8‰ может дать табл. 58.

ТАБЛИЦА 58.

Средние данные расхода энергии на движение.

Типы движения	Перегоны в m	Коммерческая скорость в km/h	Удельный расход энергии Wh/tkm
Трамвайное	350	11—18	35—65
То же	450	12—20	32—60
То же	600	13—22	32—55
Пригородное	2 000	24—48	21—64
То же	3 000	35—56	20—50
То же	5 000	38—68	20—40
Магистральное пассажирское	25 000	40—60	15—35
То же	50 000	40—85	12—36
То же, товарное	50 000	20—55	11—19

При значительных подъемах цифры табл. 58 должны соответственно возрастать, так как каждая тысячная подъема повышает расход энергии примерно на 3 Wh/tkm.

Большой интерес представляет вопрос о распределении расхода энергии по отдельным элементам движения. Ответ на него может дать формула (348). Из нее следует, что чем меньше перегон, тем относительно большее значение приобретают периоды пуска и торможения, вызывая соответственное повышение удельного расхода. Так, например, для трамвайного движения при средних его условиях распределение расхода энергии может быть иллюстрировано табл. 59.

ТАБЛИЦА 59.

Распределение расхода энергии на движение по отдельным составляющим.

Потребление энергии по отдельным элементам	Wh/tkm	Процент от общего расхода
Сопротивление движению	17,0	32,7
Сопротивление уклонов и кривых при 2‰	6,0	11,5
Потери в пусковых реостатах	6,5	12,5
Потери при торможении	9,5	18,3
Потери в двигателях	6,5	12,5
Потери на добавочное подтормаживание и пуски	9,5	12,5
Итого	52,0	100,0

В условиях железнодорожного движения, помимо приведенных категорий расходов, необходимо особо учитывать потери на вспомогательные нужды по обслужи-

НБ УИИНТ (ДІІТ)

ванию подвижного состава. Представление об этом может дать табл. 60, составленная на основании исследования электровозов германских железных дорог типа 1-B-B-1.

ТАБЛИЦА 60.

Соотношение расхода энергии на вспомогательные нужды электровоза.

Категории расхода энергии	Процент от общей энергии, расходуемой на движение
Потери в трансформаторе	4,90
Расход на охлаждение двигателей	2,60
Расход на охлаждение трансформатора	1,10
Расход на компрессоры для торможения	0,97
Расход на управление поездом и освещение электровоза	0,12
Расход на отопление электровоза	0,60
Итого	10,30

При тяговом расчете вообще и в частности при определении расхода энергии на движение в случае большого количества отдельных перегонов приходится иметь дело с громоздкими выкидками. Для их упрощения очень часто отдельные перегоны, если они не особенно значительно отличаются по длине и профилю, заменяются одним эквивалентным. Последний по длине определяется средне-арифметическим из отдельных объединяемых перегонов с присвоением ему уклона, равного эквивалентному (Л. 196).

VII. МЕТОДЫ ПОНИЖЕНИЯ РАСХОДА ЭНЕРГИИ НА ДВИЖЕНИЕ.

Для осуществления движения поезда по одному и тому же пути, при одной и той же средней скорости, можно израсходовать больше или меньше энергии, причем существует определенный minimum ее, ниже которого опуститься уже не представляется возможным. Одной из задач тягового расчета является определение того метода ведения поезда, при котором этот minimum имеет место.

Для суждения о том, какие факторы движения оказывают влияние на расход энергии, наиболее рационально воспользоваться формулой (348). Из нее видно, что имеются четыре величины, $\eta_{ср}$, $r_{ср}$, v_m и v_n, на которые можно воздействовать в целях понижения расхода энергии. Прежде всего, конечно, понятно, что, чем выше будет средний коэфициент полезного действия двигателей и передачи, тем меньше будет требование энергии от сети. При переменном режиме работы η меняется. Для наиболее экономной работы выгодно иметь максимальное значение его при такой нагрузке, при которой двигатели перерабатывают наибольшее количество энергии. Так, например, если большее количество энергии потребляется двигателями при нагрузке около трех четвертей от часовой, то желательно иметь maximum их коэфициента полезного действия при той же примерно нагрузке. Отсюда понятно, почему у современных двигателей η_{max} чаще всего устанавливают в пределах между часовым и длительным режимами: в этом именно интервале они по большей части работают наиболее длительный промежуток времени.

Однако, бывают и исключения из этого правила. При магистральной тяге, особенно при наличии отдельных длительных подъемов, очень часто наибольшее время работы приходится на периоды с нагрузочными токами ниже длительных. Для того, чтобы выдержать работу на подъемах, двигатели при подходах к ним должны иметь запас в температуре, а возможно это только при условии, если перед этим они достаточно долго работали при мощностях ниже длительных.

Теперь нужно выяснить, как можно влиять на сопротивление движению $r_{ср}$. Последнее зависит от того, какую форму имеет кривая движения поезда $v=f(t)$, так как одну и ту же среднюю скорость можно получить при различных видах этой кривой. Для уменьшения средней величины сопротивления движению желательно, чтобы скорость по возможности не менялась, а была все время близка к среднеходовой. Менее выгодно, если кривая скорости имеет резкие колебания. В этом

РВУ УДУНТ (ДІІТ)

случае $r_{ср}$, определяемое, как среднее по скорости, будет больше, так как согласно вышеприведенным формулам в состав его входят зависимости, пропорциональные квадрату скорости. Средние же квадратичные величины всяких функций, в том числе и данных, тем больше, чем более резко меняются текущие их значения, из которых составляются искомые средние значения. Ввиду этого, с точки зрения рассматриваемого фактора, движение выгодно планировать при сколь возможно постоянной скорости. Нужно, однако, иметь в виду, что форма кривой $v=f(t)$ в реальных условиях влияет на $r_{ср}$ относительно мало. Этим объясняется то, что с влиянием $r_{ср}$ на расход энергии нормально не считаются.

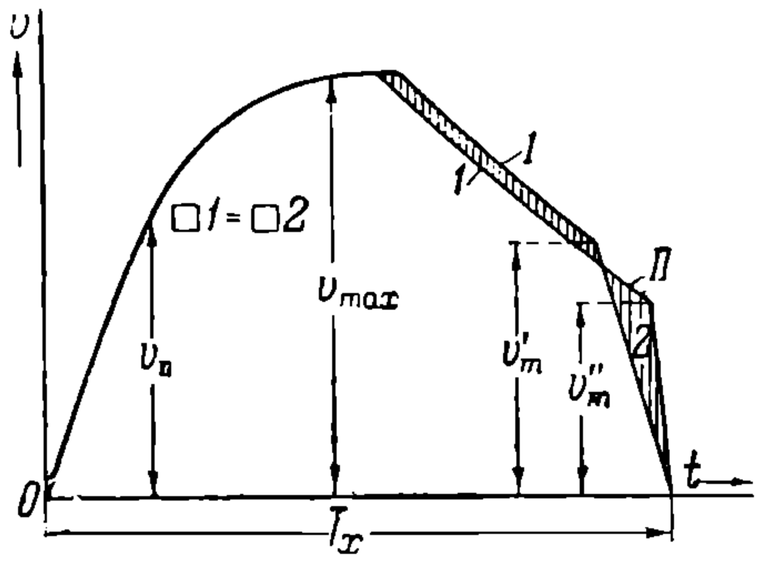


Рис. 358. Кривые движения поезда при различных тормозных замедлениях.

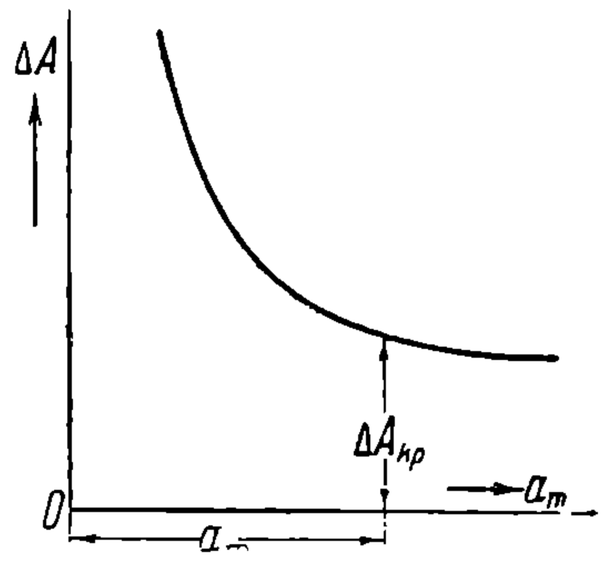


Рис. 359. Кривая расхода энергии на движение в зависимости от величин торм. замедлений.

Значительно большую возможность в отношении экономии энергии может дать воздействие на величины v_m и v_n. Влияние их возрастает по мере увеличения скоростей движения и уменьшения длин перегонов. Нужно иметь в виду, что произвольно варьировать v_m и v_n нельзя. Изменить их допустимо только с таким расчетом, чтобы площадь кривой $v=f(t)$ и величина T_x оставались неизменными. Это условие по большой части связывает величины v_m и v_n. Очень часто изменение одной из них требует изменения и другой. В общем случае, для уменьшения расхода энергии требуется так варьировать v_m и v_n, чтобы в формуле (348) сумма, зависящая от их квадратов, была наименьшая.

Наибольшую возможность понизить v_m дает увеличение замедления при торможении. Рис. 358 дает две кривых $v=f(t)$, из которых первая построена при меньшем замедлении, а вторая при большем. Как видно, в последнем случае получается меньшая скорость начала торможения, чем в первом. Чем больше будет замедление, тем меньше будет v_m. Характер зависимости расхода энергии от тормозного замедления a_m выражается кривой, приведенной на рис. 359. Из нее видно, что существенное снижение расхода энергии имеет место только до определенного критического значения a_m.

Величина наивыгоднейшего тормозного замедления меняется в зависимости от условия движения. Чем меньше перегонов и чем выше средне-ходовые скорости, тем большее значение имеет увеличение a_m. Для нормальных условий трамвайного движения оно колеблется чаще всего в пределах 0,6—0,85 m/sec², для метрополитенов 0,75—1,5 m/sec², для пригородного движения 0,7—0,9 m/sec². При дальнем движении с большими перегонами тормозное замедление особого значения не имеет. Для пассажирского движения оно берется порядка 0,3—0,6 и для товарного 0,2—0,4 m/sec². При точном определении наивыгоднейшей величины a_m нужно найти для различных его значений кривые $v=f(t)$ и по ним построить кривую по типу рис. 359. Варьирование тормозных замедлений очень существенно отзывается на удельном расходе энергии. Для трамвайных условий движения, в пределах возможных a_m, можно ждать колебания ΔA порядка 20%, а для пригородного и особенно метрополитенного движения эта цифра может подниматься до 40—50%.

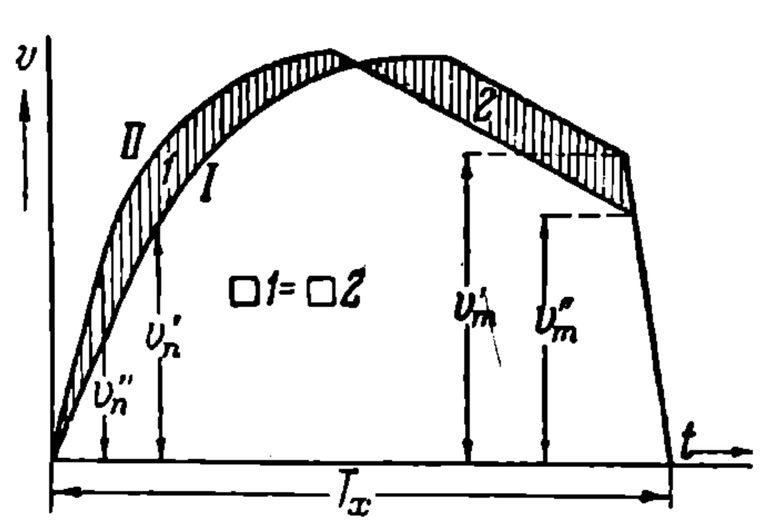


Рис. 360. Кривые движения поезда при различных начальных ускорениях.

Кроме тормозного замедления, большое влияние на расход энергии оказывает

НБ УДУНТ (ДІІТ)

начальное ускорение. При неизменном соотношении ампервитков якоря и возбуждения, а также при одном и том же передаточном механизме можно достигать увеличения a_n, увеличивая пусковой ток двигателей. На рис. 360 приведены кривые, построенные для двух различных ускорений, причем для кривой *II* принято ускорение более высокое, чем для кривой *I*. Обе эти кривые, как это видно из равенства их площадей, построены для одного и того же перегона, а также и для одной и той же средней скорости, о чем свидетельствует общая величина T_x.

Из рассмотрения приведенных кривых следует, что экономия энергии здесь достигается как снижением пусковой скорости, так и уменьшением скорости начала торможения. Практически здесь большее значение имеет скорость v_m, так как снижение v_n при больших пусковых токах, несмотря даже на значительное возрастание последних, относительно невелико. Как показывает рис. 361, зависимость расхода

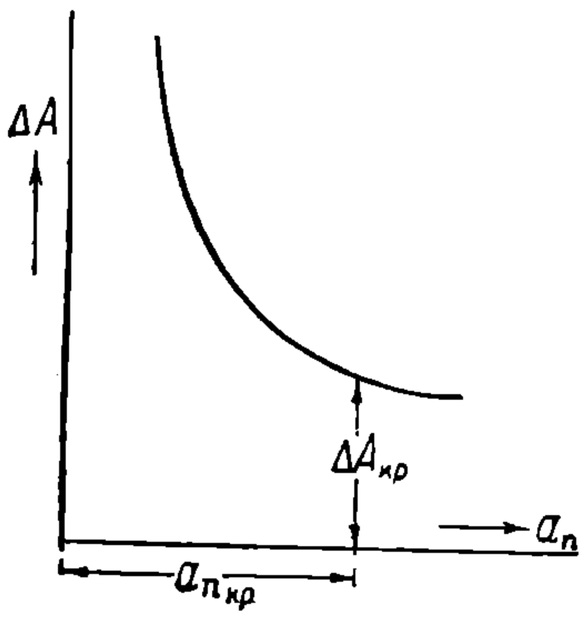


Рис. 361. Кривая расхода энергии в зависимости от начальных ускорений.

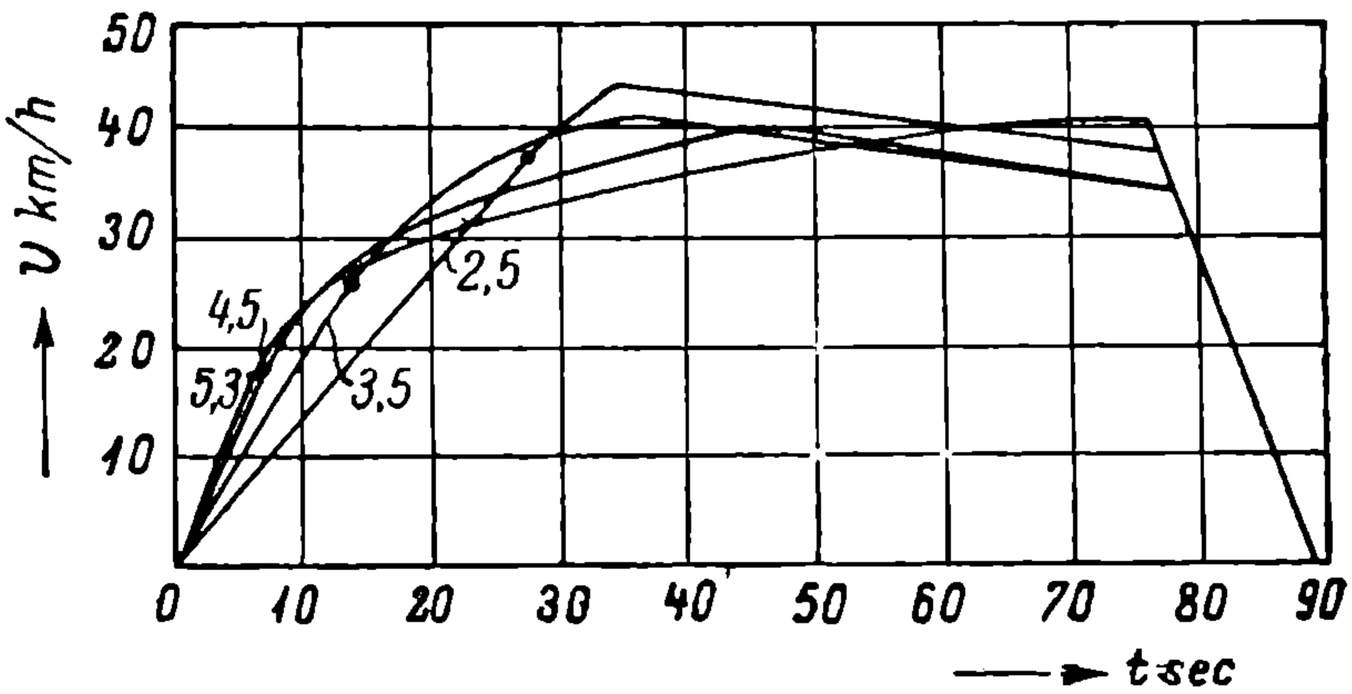


Рис. 362. Кривые движения поезда на перегоне 780 m при коммерческой скорости 25,7 km/h в случаях различных передаточных чисел.

энергии от a_n выражается кривой такого же вида, как и при процессе изменения a_m. Здесь имеется также некоторое критическое значение ускорения, превосходя которое, существенной экономии энергии получить уже нельзя. Здесь играет также роль необходимость держать перегрузку двигателей в определенных нормах, не превосходя нормально удвоенной величины часового тока. Экономия в энергии при правильном выборе начальных ускорений может доходить до 20—30%. Для средних трамвайных условий a_n чаще всего берут в пределах 0,45—0,75 m/sec². Для дальнего движения начальные ускорения особо существенного влияния на расход энергии не оказывают. При пассажирском движении они в среднем колеблются около 0,15—0,35 m/sec², а при товарном около 0,05—0,2 m/sec². Для пригородного движения ускорения берутся по большей части в пределах 0,4—0,7 m/sec².

Следует указать, что здесь было рассмотрено влияние тормозных замедлений и начальных ускорений с точки зрения того влияния, которое они оказывают при каждой данной средней скорости движения на расход энергии. Нужно помнить, что в процессе борьбы за увеличение средне-ходовых скоростей всегда выгодно стремиться к возможно высоким тормозным замедлениям и начальным ускорениям. Очень показателен в этом отношении опыт Америки, где даже в условиях трамвайного движения применяют иногда колоссальные начальные ускорения порядка 2—2,2 m/sec². Точно так же и рабочие a_m доводят иногда до 2,2—2,4 m/sec².

В рассмотренном случае вариирование начального ускорения производилось путем изменения пусковой мощности. Однако, его можно изменять и не меняя последней. Из подобного рода способов наиболее часто применяется метод изменения передаточного числа зубчатых зацеплений. Если при одной и той же пусковой мощности изменять передачу, то будет изменяться и соотношение между пусковой силой тяги и пусковой скоростью: При увеличении передаточного числа будет расти F_n и уменьшаться v_n. При уменьшении его картина получится обратная. В первом случае начальное ускорение будет увеличиваться, во втором уменьшаться.

На рис. 362 приведены кривые $v = f(t)$ при различных передаточных числах моторвагонного поезда, взятые из книги Dover'a. Здесь, в отличие от предыдущего,

РБ УДУНТ (ДІІТ)

характерно, что при превышении известного предела для $a_п$ тормозная скорость не уменьшается, а наоборот, увеличивается. В результате, несмотря на понижение пусковой скорости, расход энергии возрастает.

Зависимость расхода энергии от передаточного числа $k_з$ для данного случая приведена на рис. 363-а. Следует обратить внимание на то, что, помимо пусковых потерь в реостатах и потери живой силы при торможении, на расход энергии, как уже было отмечено, влияют некоторые изменения в сопротивлении движению и потери в двигателях. Для рассмотренного случая, применительно к кривой рис. 362, изменение расхода энергии в зависимости от основных факторов, влияющих на него, приведено на рис. 363-b. Кривая *A* дает расход энергии, вызываемый процессом торможения, кривая *C* дает потери в реостатах, кривая *B* — потери на преодоление сопротивлений движению и кривая *D* — потери механические в самих машинах и в передачах. Как и следовало ожидать, наибольшее влияние на изменение расхода оказывают потери на торможение и в реостатах. Следует иметь в виду, что наивыгоднейшее передаточное число зависит от условий движения. Если для нормальных типов трамвайных двигателей оно лежит в пределах 4 5—6, то для пригородного движения оно опускается обычно до 2,5—5. При особо быстроходных двигателях указанные числа могут сдвигаться в сторону их увеличения.

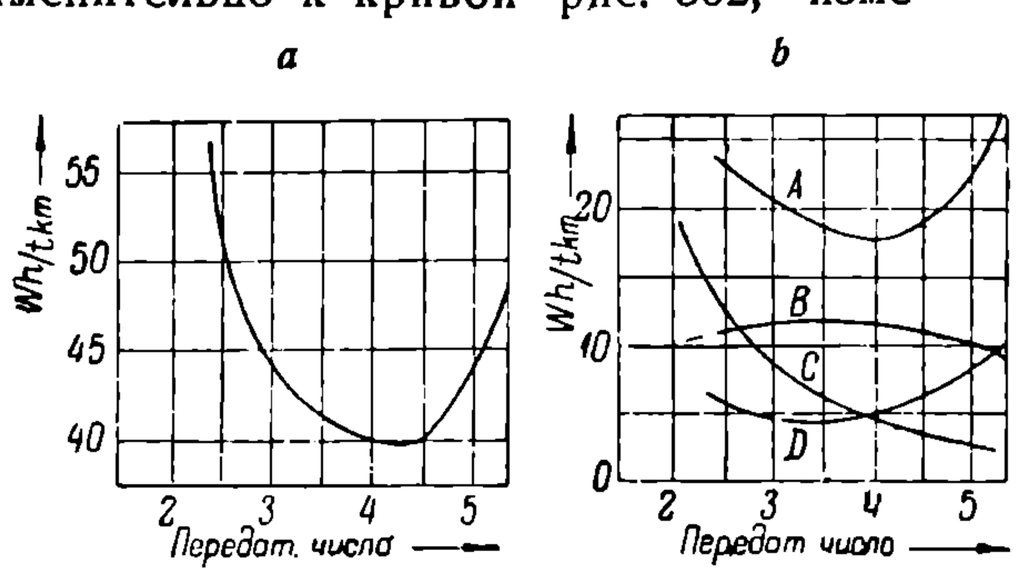


Рис. 363. Кривые, характеризующие расход энергии в зависимости от передаточных чисел.

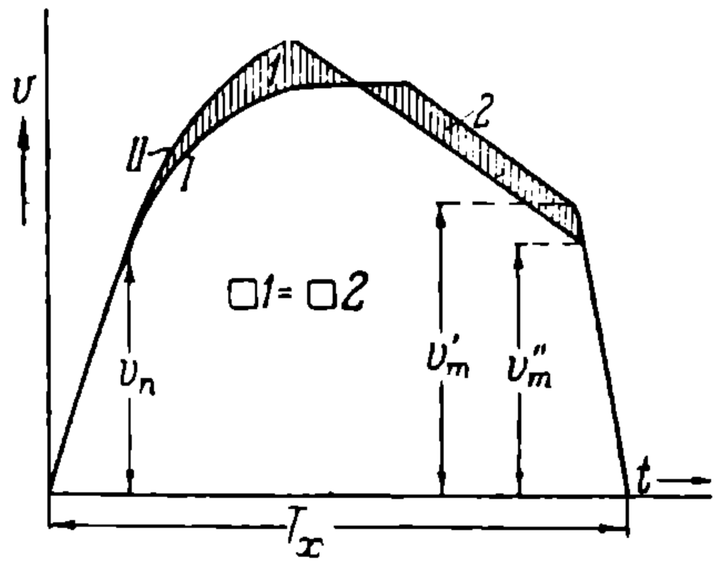


Рис. 364. Кривые движения поезда при полном и ослабленном поле после пускового периода.

Вторым способом изменения начального ускорения при условии неизменной мощности является варьирование соотношения ампервитков якорной и возбудительной обмоток. Увеличение ампервитков возбуждения по отношению к ампервиткам якоря соответствует повышению передаточного числа, а уменьшение — понижению его. Регулируя ампервитки возбуждения в двигателе, можно как бы иметь своего рода коробку скоростей и распоряжаться ею в зависимости от потребностей.

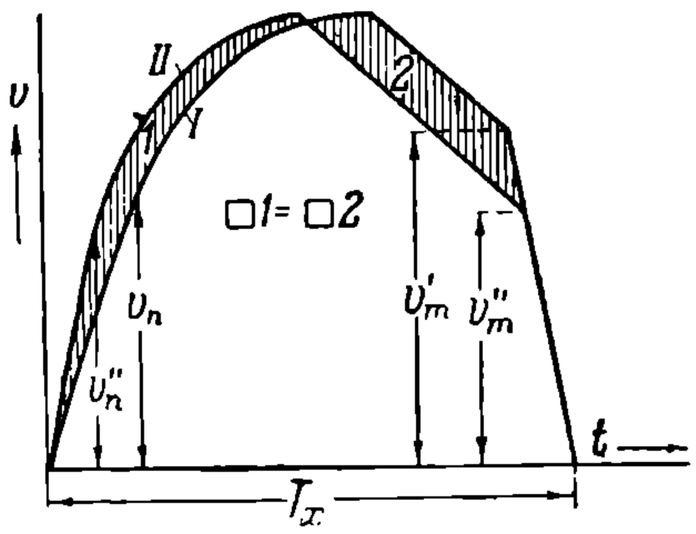


Рис. 365. Кривые движения поезда при усилении поля в период разгона поезда под реостатами.

В большинстве случаев при применении указанного метода выгодно в период разгона усилить возбудительные ампервитки, чем достигается при том же токе в главной цепи увеличение $F_п$ и $a_п$ и в то же время понижение $v_п$. После того как первый период разгона под реостатами пройден, дальше можно перейти на ослабленное поле. Выгодно это потому, что при ослабленном поле двигатель начинает работать на характеристике с меньшим насыщением. В результате получается более значительное нарастание скорости, дающее возможность увеличить ход поезда по инерции и снизить скорость начала торможения. Невыгодным такое ведение поезда может оказаться только в том случае, если работа двигателей попадает в зону пониженных коэфициентов полезного действия их.

На рис. 364 кривая *I* дает картину движения без регулирования поля, а кривая *II* построена для случая, когда в начальный пусковой период поезд идет при полном поле, а затем после выключения реостатов переходит на ослабленное. Кривая *I* рис. 365 дает, как и в первом случае, картину движения при нормальном поле, а кривая *II* того же рис. 365 изображает движение при условии, что в период

БГУТ (ДИТ)

пускового разгона двигатели работают с усилением поля, а затем переходят на поле нормальное. Как видно из рисунков, в обоих случаях путем регулирования поля понижаются скорости начала торможения, а во втором случае снижается также и пусковая скорость.

Несколько понизить расход энергии при регулировке поля можно также уменьшением пусковых реостатных ступеней, заменив их, как уже отмечалось в отделе III, ступенями с регулировкой поля. Как общее правило, эффект регулирования поля в наибольшей степени проявляется при относительно коротких перегонах, главным образом в условиях городского и пригородного движения. Для магистральной тяги с точки зрения расхода энергии он имеет меньшее значение.

Кроме разобранных методов, можно добиться понижения расхода энергии варьированием пусковой мощности, не изменяя начального ускорения. Практически этого можно достигнуть путем одновременного изменения пусковой мощности и передаточного числа. Тогда регулировка будет проявляться в увеличении пусковой скорости. На рис. 366 кривая *I* построена для пониженной пусковой мощности, а кривая *II* для повышенной. Как видно из последней кривой, такой метод увеличения мощности обеспечивает понижение начальной тормозной скорости, но вместе с тем вызывает увеличение скорости пусковой. Благодаря этому зависимость расхода энергии от пусковой мощности (рис. 367) имеет вид U-образной кривой. Минимальный расход получается при наиболее выгодной комбинации v_m и v_n.

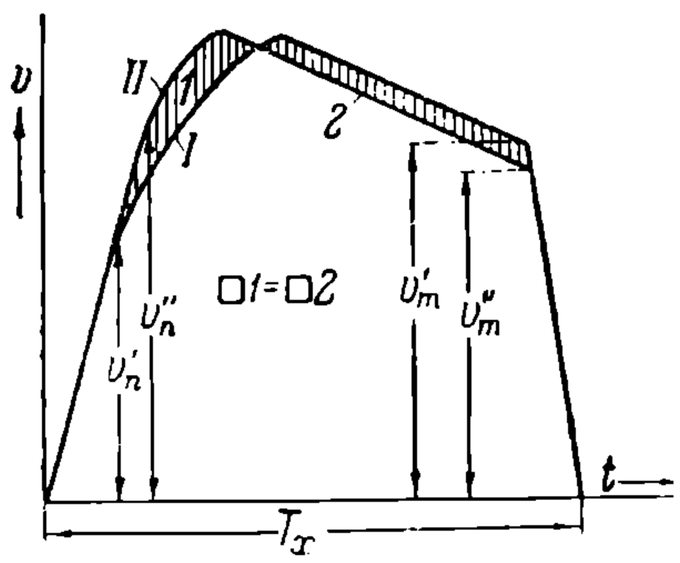


Рис. 366. Кривые движения поезда при одинаковых начальных ускорениях и различных пусковых мощностях.

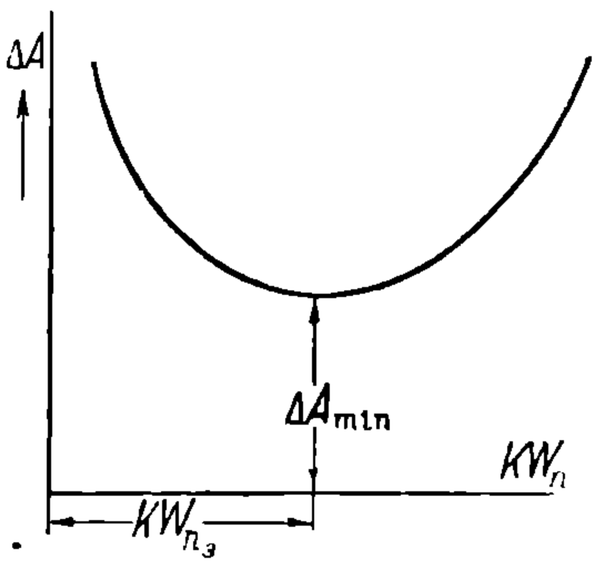


Рис. 367. Диаграмма наивыгоднейшей по расходу энергии пусковой мощности.

Теперь полезно еще выяснить, как влияет на расход энергии варьирование мощности двигателей. С точки зрения их стоимости желательно иметь наименьшие мощности, возможные по условиям нагрева. Иначе обстоит вопрос с точки зрения расхода энергии. Здесь увеличение мощности в известных пределах действует благоприятно. Для каждого данного случая с точки зрения расхода энергии существует наивыгоднейшая мощность, обычно лежащая несколько выше минимально возможной.

При решении вопроса о расходе энергии в общем случае можно рекомендовать следующий метод. Прежде всего для заданной коммерческой скорости определяется тем или другим способом наименьшая возможная по нагреву мощность. После этого берется еще несколько двигателей с постепенно возрастающей мощностью. Затем для каждого двигателя выясняется наивыгоднейшая система ведения поезда, т. е. определяются наивыгоднейшие тормозное замедление, пусковое ускорение, передача, регулировка поля и пусковая перегрузка. Это дает возможность для каждого двигателя установить минимально возможный для него расход энергии. После этого уже легко установить, какой из двигателей с точки зрения расхода энергии является наивыгоднейшим.

VIII. ВЫБОР ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ.

1. Преимущества и недостатки двигателей с последовательной, шунтовой и компаундной характеристиками.

Вопрос о наивыгоднейших характеристиках тяговых электродвигателей приходится решать с различных точек зрения. При решении его необходимо учитывать влияние их на процесс электроснабжения дороги, на расход энергии, на пропускную способность дороги, а также и на ряд вопросов, связанных с самими двигателями, их нагреванием, коммутаций и конструкцией.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

На рис. 368 и 369 приведены типовые характеристики последовательных и шунтовых электродвигателей. Отличительной особенностью их является степень зависимости потока возбуждения от тока якоря. У последовательных двигателей эта зависимость определяется непосредственным образованием потока главным током. Если пренебречь насыщением, поток должен меняться прямо пропорционально току. Если же учитывать насыщение, то прямая пропорциональность между потоком и током не имеет места.

При идеально насыщенной системе, несмотря на увеличения тока, поток будет оставаться неизменным. В соответствии с этим, вращающий момент или пропорциональная ему сила тяги для последовательных двигателей должна принять форму:

$$F = k'_F I\Phi \cos(I\Phi) \cong k_F I^{\alpha} \tag{350}$$

Здесь величина α будет колебаться в пределах от 2 до 1. При идеально ненасыщенной системе α будет равна двум, а при идеально насыщенной единице. Величина cos ($I\Phi$) для двигателей постоянного тока, естественно, отпадает, а для однофазных коллекторных двигателей она практически также близка к единице.

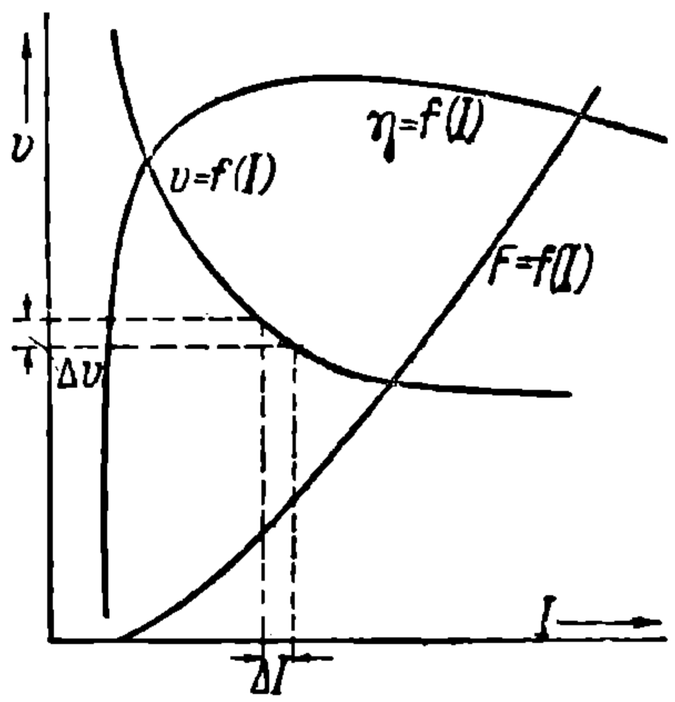


Рис. 368. Нормальные характеристики двигателей последовательного типа.

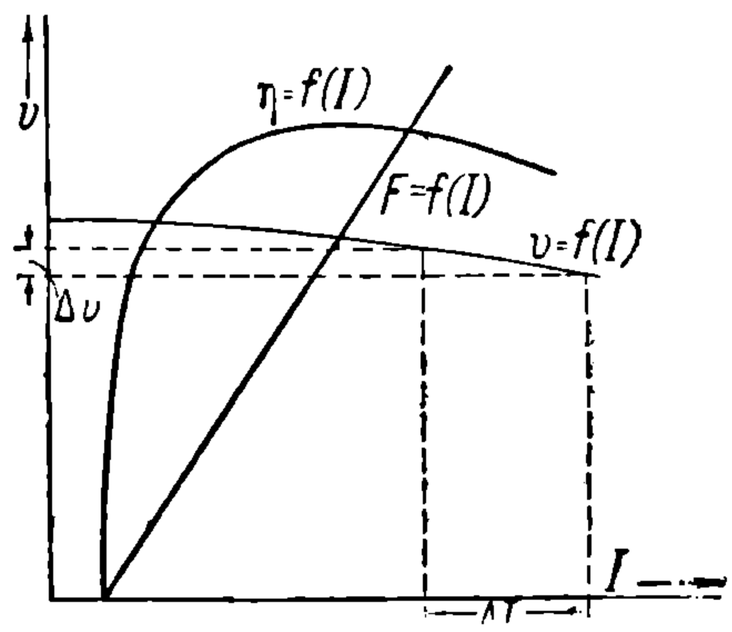


Рис. 369. Нормальные характеристики шунтовых двигателей

У шунтового двигателя постоянного тока картина образования потока и момента иная. Поток здесь в основном не зависит от тока. Он определяется напряжением, приложенным к обмотке возбуждения:

$$\Phi = k_{\phi} U.$$

Сила тяги для шунтового двигателя принимает вид:

$$F = k_f UI. \tag{351}$$

В последних двух выражениях предполагается, что коэфициенты k_{ϕ} и k_f зависят не только от постоянных параметров системы, но и от степени насыщения двигателей. С увеличением U, а следовательно, и насыщения эти коэфициенты должны падать по величине.

Все приведенные соображения в реальных условиях еще несколько осложняются неучтенным здесь влиянием реакции якоря на основной рабочий поток. При расположении щеток по геометрической нейтрали, необходимом ввиду реверсивности тяговых двигателей, практически приходится считаться, главным образом, с поперечной реакцией, действие которой с увеличением нагрузочного тока сказывается в некотором повышении магнитного сопротивления машины, а следовательно и в уменьшении основного рабочего потока. Вообще это влияние, а также некоторое воздействие добавочных полюсов не оказывает существенного влияния на характеристики двигателей, и потому для рассматриваемых целей с ним можно не считаться. Еще меньшее значение отмеченное обстоятельство имеет для двигателей с компенсационными обмотками.

Формула (351) показывает, что сила тяги шунтового двигателя постоянного тока зависит от напряжения в рабочей сети. Еще больше это напряжение имеет на нее влияние при двигателях асинхронных, работающих также по шунтовой характеристике. Как показывает формула (52), здесь вращающий момент при условии пренебрежения насыщением сильно зависит от приложенного напряжения.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

Из приведенных соображений вытекает, что с увеличением рабочего тока сила тяги у последовательных двигателей растет значительно быстрее, чем у шунтовых. Изменение же скорости с нагрузкой дает картину обратную. Как видно из приведенных кривых, с увеличением рабочего тока скорость у последовательных двигателей падает более резко нем у шунтовых. Последние в очень широких пределах нагрузки работают с относительно очень небольшим изменением скорости.

Полезно иметь в виду, что степень „сериесности" последовательных двигателей определяется насыщением магнитной системы. Чем меньше насыщена машина, тем ближе она по характеристике к идеальным сериесным, у которых сила тяги изменяется пропорционально квадрату тока. В нормальных условиях при больших нагрузочных токах последовательная машина сильно насыщена, приближаясь благодаря этому к машине с шунтовой характеристикой. Действительно, кривая скорости последовательного двигателя показывает, что при больших токах скорость его меняется относительно незначительно, подобно скорости нормальной шунтовой машины

Для выяснения преимуществ и недостатков последовательных и шунтовых характеристик важно прежде всего выяснить влияние их на рабочую сеть дороги и на работу подстанций. С точки зрения сети и подстанций, или, обобщая, с точки зрения электроснабжения дороги, вообще желательно иметь как можно более постоянную нагрузку. Идеальным решением вопроса была бы работа поездов при постоянной мощности, что обеспечило бы постоянную нагрузку подстанций и неизменный ток в рабочей сети. При таких условиях использование оборудования подстанций и сечения контактной сети было бы идеальным, между тем как в действительности из-за резких пиков и вообще резких колебаний нагрузки это использование для условий тяги получается по большей части далеко неполным. Для получения от двигателя неизменной мощности согласно формуле (7) требуется иметь механическую характеристику двигателей, выражающую зависимость силы тяги от скорости в виде равнобокой гиперболы:

$$F = \frac{\text{const}}{v}.$$

Представляя большие примущества в отношении электроснабжения, постоянство мощности локомотива не является выгодным в отношении тяги и общей организации движения. В период разгона поезда не представляется тогда возможным иметь большие ускорения: для получения их нужны пусковые мощности, значительно превышающие средние рабочие. Кроме того, при тяжелых подъемах, требующих больших тяговых усилий, локомотивы с постоянной мощностью резко снижают скорость, понижая этим общую пропускную способность дороги

Наиболее ярко выраженную противоположность локомотиву постоянной мощности представляют собой электровозы с шунтовой характеристикой. Их скорость мало изменяется с изменением силы тяги. В результате на тяжелых подъемах, несмотря на резкое увеличение силы тяги, они идут почти с такими же скоростями, как и на площадке. В отношении скорости движения это имеет преимущество, однако влечет за собой и целый ряд осложнений, главным оброзом, с точки зрения электроснабжения дороги. Резкое увеличение мощностей на тяжелых уклонах вызывает большие нагрузочные токи, перегружающие как двигатели, так и рабочую сеть дороги с ее подстанциями.

Осложнения эти усугубляются еще и тем, что сила тяги шунтовых двигателей, особенно асинхронных, зависит от напряжения на токоприемнике поезда. В силу этого при локомотивах с шунтовой характеристикой приходится допускать значительно меньшее падение напряжения в рабочей сети, чем для двигателей последовательных. Это требует увеличения сечений контактных проводов и уменьшения расстояний между подстанциями, что неизбежно имеет последствием удорожение сооружения дороги.

Из приведенных соображений видно, что с точки зрения общих интересов электрифицированной дороги невыгодно, с одной стороны, иметь локомотивы с постоянной мощностью, а с другой стороны, — и локомотивы с резко меняющейся мощностью.

В этом отношении электровозы с последовательными двигателями занимают промежуточное положение. Характеристики их занимают среднее положение между двигателями с постоянной мощностью и двигателями шунтовыми. Благодаря этому, при них на тяжелых подъемах можно не опасаться резкого снижения скоростей и в то же время чрезмерной перегрузки сети и подстанций.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Наиболее ясно можно видеть различие в работе последовательных и шунтовых электродвигателей, если исходить в обоих случаях из электровозов одной и той же мощности. На практике весьма часто мощность электровозов определяется работой их на наиболее тяжелом подъеме или, как говорят, на руководящем подъеме дороги. Если принять для обоих типов электровозов на таком подъеме одну и ту же скорость, то, очевидно, при одной и той же силе тяги, определяемой уклоном, расчетная мощность последовательных и шунтовых двигателей в первом приближении будет одна и та же. Преимущество последовательных двигателей в этом случае будет состоять в том, что при выходе с руководящего подъема они разовьют большую скорость, чем шунтовые, в результате чего средняя скорость движения при них получается более высокой. Если же последнюю взять одинаковой для обоих типов, допустив для последовательных двигателей некоторое снижение скорости на руководящем подъеме, то мощность для электровоза с последовательной характеристикой может быть взята меньшей, чем для электровоза с шунтовой. Точно так же будут понижены мощность подстанций и сечения контактной сети.

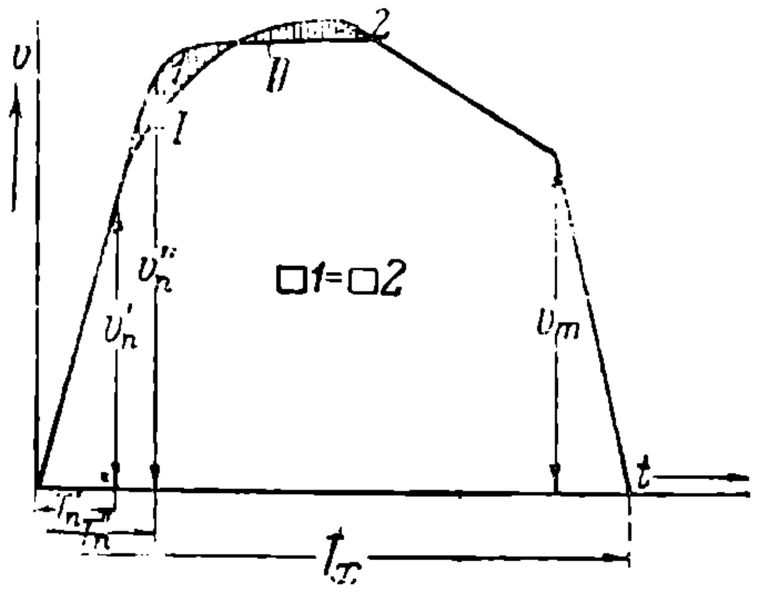


Рис. 370. Кривые движения поезда при последовательных и шунтовых двигателях для одного и того же перегона и одной и той же средне-ходовой скорости.

Большим достоинством последовательных двигателей является практически отсутствие при них зависимости силы тяги от напряжения сети. Понижение последнего в этом случае сказывается только во временном уменьшении скорости, что какого-либо катастрофического влияния на движение оказать не может и при умелом действии машиниста в последующем может быть легко наверстано. При шунтовых же двигателях, как уже было отмечено, понижение напряжения влечет за собой уменьшение силы тяги. Но для того, чтобы взять поезд на подъеме, нельзя иметь силу тяги ниже соответствующей этому подъему. Чтобы развить ее, согласно формуле (351), тяговый двигатель при понижении напряжения должен потреблять больший ток I, что вызовет дальнейшее увеличение падения напряжения, а следовательно, и уменьшения F. В результате и двигатели и сеть будут сильно перегружены токами, а в некоторых случаях может даже быть нарушена устойчивая работа электровоза.

На рис. 370 приведены кривые движения поезда при последовательных и шунтовых двигателях. Кривая I относится к последовательным двигателям, кривая II к шунтовым. Кривые I и II имеют одну и ту же площадь и одно и то же время хода T_x, следовательно, они построены для одного и того же перегона и для одной и той же средне-ходовой скорости движения. Анализ этой диаграммы показывает, что для достижения одинаковых средних скоростей реостаты у шунтового двигателя должны выключаться при значительно более высокой скорости, чем у последовательного. Соответственно и время нахождения под реостатами T_n'' больше для шунтового, чем для последовательного двигателя T_n' Отсюда потери в пусковых реостатах, определяемые формулами (171), для шунтовых характеристик значительно выше, чем при последовательных.

Неблагоприятно для шунтовых двигателей и сравнение в отношении пусковых мощностей, определяемых моментом выключения пусковых регуляторов. Кривые рис. 370 построены при одном и том же ускорении и, следовательно, при одной и той же пусковой силе тяги. Поэтому разница между пусковыми мощностями определяется разницей между пусковыми скоростями v_n' и v_n'' Понятно, что бо́льшая пусковая нагрузка шунтовых двигателей вызывает и больший их нагрев, и что поэтому для них требуются и более значительные расчетные мощности. Таким образом, шунтовая характеристика является менее выгодной как с точки зрения расхода энергии, так и с точки зрения потребнои мощности двигателя.

Улучшить работу шунтовых тяговых двигателей можно путем регулирования их магнитного потока. Если, в зависимости от нагрузки, менять соответствующим образом ток возбуждения, то шунтовую машину до известной степени можно приблизить к последовательной. В этом случае при пуске или на тяжелом подъеме можно давать наибольшее возбуждение, а затем, по мере увеличения скорости

НБ УИУНТ (ДІІТ)

разгона или при переходе на более легкие уклоны, ослаблять возбудительный ток. Однако, такая регулировка может улучшить работу шунтовых двигателей далеко не всегда. Особенно мало удовлетворительно обстоит этот вопрос при асинхронных двигателях. У них регулировать характеристики практически можно только с помощью каскадного включения и переключения числа полюсов. Однако, эти методы не могут дать достаточно удовлетворительных результатов, так как интервалы между отдельными ступенями скоростей здесь получаются очень большими. Помимо этого, коэфициент полезного действия и $\cos\varphi$ для каскадного включения, а также и для различных комбинаций числа полюсов, кроме комбинации основной, получаются недостаточно удовлетворительными. Ввиду этого каскадом и переключением полюсов нормально пользуются, главным образом, при пусковом периоде, а не для исправления основных характеристик локомотива.

Очень большие осложнения при шунтовых двигателях могут возникать при неодинаковых диаметрах ведущих колес в случае индивидуальных передач. Неравенство диаметров может быть вызвано неодинаковой обточкой бандажей. Разность между диаметрами новых бандажей и после последней их обточки практически может доходить до 3—6%. При таких условиях числа оборотов отдельных осей, а следовательно, и сочлененных с ними двигателей будут получаться различными. Для того, чтобы давать одну и ту же скорость, соответствующую поступательному движению поезда, оси с колесами меньших диаметров должны делать больше оборотов, чем оси, имеющие колеса больших диаметров. Неодинаковое число оборотов, естественно, вызывает неравенство нагрузочных токов. Двигатели, вращающиеся с бо́льшим числом оборотов, оказываются недогруженными, а с меньшим — перегруженными. Это может вызвать недопустимый перегрев последних, а также может сказаться и в некотором повышении расхода энергии из-за ненормальных условий работы отдельных двигателей.

Особенно опасно данное явление при шунтовых характеристиках. Из диаграмм рис. 368 и 369 видно, что при одном и том же изменении скорости Δv изменение тока ΔI при шунтовом двигатели несравненно больше, чем при последовательном. Особенно легко это явление может возникать при двойной тяге. Если еще за диаметрами колес одного же электровоза можно следить, то при комбинированной работе двух или нескольких тяговых единиц надеяться на одинаковые у них диаметры колес практически не представляется возможным.

Такой же эффект неодинаковой нагрузки при индивидуальных передачах может получаться и в случае различия между тяговыми характеристиками отдельных двигателей. В условиях заводского производства некоторое расхождение между характеристиками является нередким случаем. Технические требования на постановку двигателей почти всегда содержат определенные допуски в отношении этого расхождения. Порядок таких допусков в наших условиях, применительно к последовательным двигателям, определяется в 2—3%. Это нужно понимать таким образом, что при одном и том же нагрузочном токе различие между скоростями электродвигателей не должно превосходить эту границу. Для последовательных двигателей этот допуск не является особенно опасным, хотя и он может вызвать перегрузку отдельных двигателей на 2—8%. Степень влияния неодинаковых диаметров бандажей и характеристик на работу последовательных двигателей сильно зависит от того, на какой части характеристики преимущественно идет их работа. Чем большему насыщению соответствует эта часть характеристик, тем сильнее должна проявляться неравномерность их нагрузки.

Что касается шунтовых электродвигателей, то при указанных допусках перегрузка отдельных из них может дойти до 30—40%. В особо же неблагоприятных случаях этот процент может подняться и выше. Само собой разумеется, что при таких условиях работа делается совершенно неприемлемой. Отмеченные обстоятельства сильно осложняют эксплоатацию электровозов с шунтовыми характеристиками, требуя за ними очень тщательного наблюдения. Кроме того, и в отношении производства шунтовых электродвигателей требуется особая точность, дабы характеристики как можно меньше отличались друг от друга.

Дальнейшим преимуществом последовательных двигателей перед шунтовыми является бо́льшая их стойкость в отношении перегрузочной способности. Последняя в коллекторных машинах преимущественно определяется коммутацией. Как уже было выяснено в отделе втором, при больших нагрузочных токах коммутацию затрудняет, главным образом, реакция якоря. Влияние последней становится

НБ УИУНТ (ДІТ)

тем сильнее, чем больше процентное отношение якорного потока к главному. В последовательных двигателях с увеличением нагрузочного тока растут одновременно оба потока, благодаря чему, если соотношение между ними и меняется из-за влияния насыщения, то во всяком случае не в такой степени, как в шунтовых двигателях. У этих последних главный поток при увеличении нагрузки, а следовательно, и потока якоря, остается постоянным, даже может несколько падать из-за повышения насыщения благодаря воздействию потока реакции якоря. Это обстоятельство объясняет, почему без наличия компенсационных обмоток шунтовой двигатель в отношении перегрузок менее стоек, чем последовательный.

Большим осложнением в шунтовых двигателях является наличие у них двух отдельных параллельных цепей. Прежде всего, это увеличивает число мест замыкания тока в цепи управления. В силу этого вся система управления получается более сложной и громоздкой, а также и более дорогой в эксплоатации.

Кроме того, наличие шунтовой обмотки очень сильно осложняет и самую конструкцию двигателя. Обмотку приходится делать из относительно тонких проводов, требующих много места. Особенно должна осложняться задача при высоких напряжениях, когда необходимость в надежной изоляции диктует еще большие размеры шунтовых катушек. Следует считать, что размеры у шунтовых двигателей, особенно высоковольтных, должны быть, как общее правило, больше, чем у последовательных. В отношении стоимости эксплоатации от шунтовых двигателей нужно также ожидать бо́льших затруднений, так как пробой возбудительных катушек у них более вероятен чем у последовательных. Точно так же нужно ждать бо́льших осложнений и с коллектором.

Преимущество одной цепи у тяговых двигателей имеет значение также и с точки зрения их пуска в ход. По целому ряду соображений, как, например, для достижения по возможности плавного трогания с места поезда и как можно более плавного перехода от одной ступени пусковых регулировок к следующей желательно, чтобы якорный ток при включении и переключении нарастал как можно медленнее. В последовательных двигателях благодаря наличию в якорной цепи обмотки возбуждения это достигается в значительно большей степени, чем в шунтовых, так как цепь одних только якорных обмоток имеет относительно малую самоиндукцию

Как преимущество шунтовых двигателей следует отметить то, что при жестком ограничении наибольших допустимых скоростей они могут дать более высокие средне-ходовые скорости. Это объясняется тем, что у шунтового двигателя, доведенного в конце пуска до скорости, близкой к наибольшей, скорость эта затем поддерживается почти постоянной на всем дальнейшем пути. Что же касается последовательного двигателя, то его скорость в момент перехода на автоматическую кривую значительно меньше максимальной. Пока он достигнет последней, будет потеряно время, да и кроме того, чтобы не превзойти ее в дальнейшем, приходится иногда выключать ток и затем снова его включать. Практически отмеченное преимущество шунтовых двигателей теряет свое значение, все больше и больше по мере увеличения длины перегона. Однако, в процессе борьбы за увеличение средних скоростей движения отмеченное преимущество шунтовых двигателей может иметь в ряде случаев существенное значение. Наиболее существенное преимущество шунтовых двигателей обнаруживается в тех случаях, когда нужно иметь рекуперативное торможение. Кроме того, некоторое положительное их свойство, правда, не имеющее особенно большого практического значения, проявляется при боксовании колес. Последовательные двигатели имеют склонность при боксовании развивать очень большое число оборотов, тогда как скорость шунтовых двигателей остается близкой к нормальной. Особо следует отметить преимущества асинхронных двигателей. Как уже отмечалось в отделе тяговых двигателей, большим их достоинством можно считать отсутствие коллектора и прочность конструкции.

Кроме рассмотренных последовательных и шунтовых тяговых электродвигателей, третью категорию составляют двигатели со смешанным возбуждением. Им присущи многие из тех недостатков, которые были отмечены у шунтовых машин. Однако, во многих отношениях они имеют и существенные преимущества.

Прежде всего, они обладают значительно лучшими тяговыми свойствами. При работе в качестве двигателей последовательные обмотки у них действуют в магнитном отношении в одном направлении с шунтовыми. Благодаря этому тяговые характеристики их до известной степени приближаются к последовательным. При ре-

НБ УИИНТ (ДІІТ)

ОПЕЧАТКИ

Напечатано	*Должно быть*
$e^{-\frac{\Delta k_t}{T_k}}$	$e^{-\frac{\Delta t_к}{T_{э к}}}$

Стр.	*Строка*
327	формула 352

Заказ 2070

НБ
УДУНТ
(ДІІТ)

куперативном торможении машины со смешанным возбуждением также обладают преимуществами по сравнению с чисто шунтовыми. Как было отмечено в главе о рекуперации, последовательную и шунтовую обмотку рационально для рекуперации включать диференциально, что обеспечивает бóльшую электрическую устойчивость рекуперативного торможения. Отмеченные положительные стороны двигателей со смешанным возбуждением позволяют предполагать, что в отдельных случаях тяги, главным образом при рекуперации энергии, они могут найти себе значительную область применения (рис. 287). Особенно заслуживают внимания двигатели со смешанным возбуждением в тех случаях, когда шунтовые их обмотки питаются от специальной возбудительной машины. При таких условиях эти обмотки могут быть изготовлены на низкое напряжение, что устраняет ряд отмеченных недостатков. Подобные конструкции теперь начинают получать применение в электровозах умформерного типа, а также и в тепловозах.

2. Определение пригодности двигателя в отношении нагрева при работе его на линии.

Методы непосредственного определения температур нагрева. При движении поезда тяговые электродвигатели работают при переменном режиме. В зависимости от профиля и типа поезда в определенные моменты они потребляют бóльшие или меньшие токи. Временами они работают с большими перегрузками, временами же без всякой нагрузки, при выключенном токе. Наиболее тяжелые условия работы двигателя по большей части получаются в периоды разгона поезда под регуляторами и на тяжелых подъемах.

При установлении метода определения нагрева двигателей на линии можно, по существу, воспользоваться теорией этого вопроса, данной во втором отделе при рассмотрении переменного режима работы тяговых двигателей. Здесь можно применять методы тепловых характеристик, двухступенчатый и эквивалентного однородного тела. В первую очередь рационально разобрать последний метод, как обычно требующий наименьшего количества данных о тепловых параметрах тяговых электродвигателей.

При применении метода эквивалентного однородного тела необходимо иметь предварительно построенными кривые движения поезда для всех перегонов полного рейса поезда, а также знать токи, потребляемые каждым отдельным двигателем. Кроме того, необходимо предварительно построить кривые $B_э = f(v)$ и $T_э = f(v)$ или $B_э = f(I)$ и $T_э = f(I)$, применив один из вышеуказанных методов. В результате должна получиться совокупность кривых, показанных на рис. 371-а.

При применении этого метода следует разбить все время пробега поезда на такие элементы, для которых величины I, $B_э$ и $T_э$ могут быть приняты за постоянные. В случае, если указанные величины в течение данного элемента времени не остаются неизменными, нужно брать средние значения их за рассматриваемый промежуток времени. Согласно формуле (127), если перед началом пробега данного рейса превышение температуры двигателя над окружающей средой было τ_0, то для каждого последующего элемента времени превышение температуры определится выражениями:

$$\left.\begin{aligned}
\tau_1 &= \frac{I_1^2}{B_{э_1}}\left(1-e^{-\frac{\Delta t_1}{T_{э_1}}}\right)+\tau_0 e^{-\frac{\Delta t_1}{T_{э_1}}}\\
\tau_2 &= \frac{I_2^2}{B_{э_2}}\left(1-e^{-\frac{\Delta t_2}{T_{э_2}}}\right)+\tau_1 e^{-\frac{\Delta t_2}{T_{э_2}}}\\
&\vdots\\
\tau_к &= \frac{I_к^2}{B_{э_к}}\left(1-e^{-\frac{\Delta t_к}{T_{э_к}}}\right)+\tau_{к-1} e^{-\frac{\Delta к_t}{T_к}}\\
&\vdots\\
\tau_n &= \frac{I_n^2}{B_{э_n}}\left(1-e^{-\frac{\Delta t_n}{T_{э_n}}}\right)+\tau_{n-1} e^{-\frac{\Delta t_n}{T_{э_n}}}
\end{aligned}\right\}. \qquad (352)$$

На основании этих выражений можно построить кривую повышения температуры двигателя в зависимости от времени движения (рис. 371-b). Если по условиям

НБ УЛУНТ (ДІІТ)

исследования в такой кривой нет надобности, то повышение температуры в конце рассматриваемого рейса можно установить, объединив выражения (352) в формулу:

$$\left.\begin{aligned}\tau_n = \frac{I_n^2}{B_{э_n}}\left(1-e^{-\frac{\Delta t_n}{T_{э_n}}}\right)+\frac{I^2_{n-1}}{B_{э_{(n-1)}}}\left(1-e^{-\frac{\Delta t_{n-1}}{T_{э_{(n-1)}}}}\right)e^{-\frac{\Delta t_n}{T_{э_n}}}+\ldots\ldots\\ \ldots\ldots+\frac{I_к^2}{B_{э_к}}\left(1-e^{-\frac{\Delta t_к}{T_{э_к}}}\right)e^{-\sum_{к+1}^{n}\frac{\Delta t}{T_э}}+\ldots+\frac{I_1{}^2}{B_{э_1}}\left(1-e^{-\frac{\Delta t_1}{T_{э_1}}}\right)e^{-\sum_{2}^{n}\frac{\Delta t}{T_э}}+\tau_0 e^{-\sum_{1}^{n}\frac{\Delta t}{T_э}}\end{aligned}\right\} \quad (353)$$

или приравнивая в правой части этого равенства все члены, кроме последнего к Θ_1:

$$\tau_n = \Theta_1 + \tau_0 e^{-\sum_{1}^{n}\frac{\Delta t}{T_э}} \quad (354)$$

Формула (354) дает превышение температуры в конце первого рейса или его части Практически, однако, электрический поезд за рабочий день в большинстве случаев делает по несколько рейсов. В этом случае приходится ставить задачу об

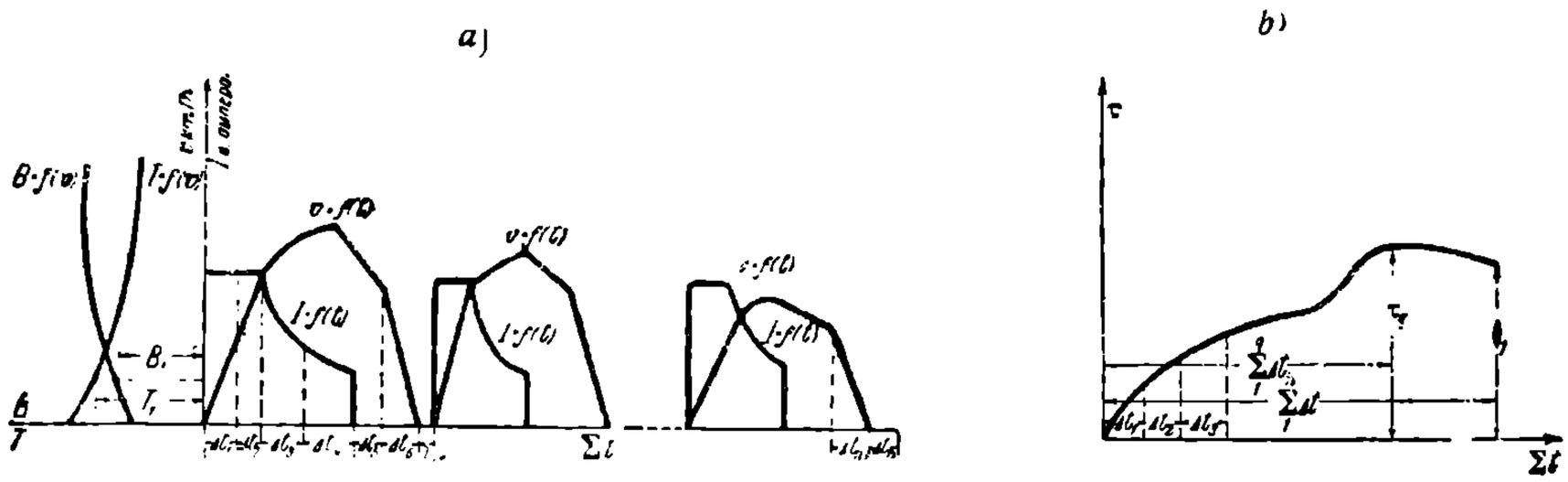


Рис. 371. Диаграмма для определения нагрева двигателя на линии.

определении превышения температуры в конце рабочего дня. Расчет удобнее всего вести следующим образом. Если положить, как этого нормально нужно ждать, что перед первым рейсом практически $\tau_0 = 0$, то превышение температуры в конце первого рейса будет равно Θ_1, а затем, в конце второго и последующих, согласно формуле (354), превышения температуры получат форму:

$$\Theta_2 = \Theta_1 + \Theta_1 e^{-\sum_{1}^{n}\frac{\Delta t}{T_э}} = \Theta_1(1+a),$$

$$\Theta_3 = \Theta_1 + \Theta_2 e^{-\sum_{1}^{n}\frac{\Delta t}{T_э}} = \Theta_1(1+a+a^2),$$

$$\Theta_к = \Theta_1 + \Theta_{к-1} e^{-\sum_{1}^{n}\frac{\Delta t}{T_э}} = \Theta_1(1+a+a^2+\ldots+a^{к-1}),$$

$$\Theta_m = \Theta_1 + \Theta_{m-1} e^{-\sum_{1}^{n}\frac{\Delta t}{T_э}} = \Theta_1(1+a+a^2+\ldots+a^к+\ldots+a^{m-1}).$$

Отсюда превышение температуры в конце последнего рейса изобразится очень простой формулой:

$$\Theta_m = \Theta_1 \frac{a^m-1}{a-1} = \Theta_1 \frac{1-e^{-m\sum_{1}^{n}\frac{\Delta t}{T_э}}}{1-e^{-\sum_{1}^{n}\frac{\Delta t}{T_э}}}. \quad (355)$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Если начальным превышением температуры перед первым рейсом пренебречь нельзя, то формула (355) на основании общего закона учета влияния превышения температуры приняла бы вид:

$$\Theta_m = \Theta_1 \frac{1 - e^{-m\sum_1^n \frac{\Delta t}{T_э}}}{1 - e^{-\sum_1^n \frac{\Delta t}{T_э}}} + \tau_0 e^{-m\sum_1^n \frac{\Delta t}{T_э}} \tag{356}$$

Формула (355) в общем случае, учитывая остановки на конечных пунктах рейса, дает превышение температуры в конце последнего рейса с учетом времени простоя после последнего пробега. Так как время последнего простоя, по существу, не должно учитываться, то при продолжительности t_f остановки на каждом конечном пункте для введения соответствующей поправки может служит формула:

$$\Theta_{m_f} = \Theta_1 \frac{1 - e^{-m\sum_1^n \frac{\Delta t}{T_в}}}{1 - e^{-\sum_1^n \frac{\Delta t}{T_э}}} e^{\frac{t_f}{T_{вf}}}. \tag{357}$$

Если остановки на конечных пунктах не особенно длительны, то их можно совсем не вводить в расчет, оставляя некоторый запас в отношении нагрева двигателя на случайные перегревы, вызываемые нарушением планомерности движения и случайными превышениями сопротивления движению.

Применяя данный метод, нетрудно найти и наибольшую температуру электродвигателя, являющуюся основным критерием его пригодности для данных условий работы. Если наибольшей температуры нужно ждать по условиям профиля в момент $\sum_1^q \Delta t$ (рис. 371-b), и если этому моменту в период первого рейса соответствовало превышение температуры τ_q, то величина наибольшего, нормально возможного превышения температуры, ожидаемого, естественно, в период последнего рейса, определится выражением:

$$\Theta_{max} = \tau_q + \Theta_{m-1} e^{-\sum_1^q \frac{\Delta t}{T_в}} \tag{358}$$

При тяговых расчетах в большинстве случаев исходят из положения, что температуру двигателя после 5—10 часов работы на линии можно считать установившейся. Чтобы судить о возможной здесь ошибке, можно предложить формулу, определяющую для данных условий движения то превышение температуры, которое имел бы двигатель после бесконечно длительной работы его на линии. Вывести его можно из формулы (355), положив в ней число рейсов $m = \infty$:

$$\Theta_\infty = \frac{\Theta_1}{1 - e^{-\sum_1^n \frac{\Delta t}{T_в}}}. \tag{359}$$

Приведенный способ изучения процесса нагревания тягового электродвигателя в большинстве случаев можно в отношении выкладок значительно упростить. Особенно просто решается вопрос, когда все отдельные перегоны можно свести к одному эквивалентному. В этом случае достаточно определить изменение температуры для одного только характерного перегона. Если в конце первого такого перегона превышение температуры будет τ_n, то при полном числе перегонов за день, равном p, конечное превышение температуры в конце рабочего дня получит выражение:

$$\Theta_p = \tau_n \frac{1 - e^{-p\sum_1^n \frac{\Delta t}{T_в}}}{1 - e^{-\sum_1^n \frac{\Delta t}{T_в}}}. \tag{360}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Для упрощения выкладок иногда можно, чтобы избежать вычисления повышений температур по показательным выражениям, воспользоваться принципом разложения показательных функций в ряд (116).

Если показатели $\frac{\Delta t}{T_э}$ невелики, то всеми членами высшего порядка допустимо пренебречь, и тогда выражения (352) примут вид:

$$\left.\begin{aligned}
\tau_1 &= \frac{I_1^2 \Delta t_1}{B_{э_1} T_{э_1}} + \tau_0 \left(1 - \frac{\Delta t_1}{T_{э_1}}\right) \\
\tau_2 &= \frac{I_2^2 \Delta t_2}{B_{э_2} T_{э_2}} + \tau_1 \left(1 - \frac{\Delta t_2}{T_{э_2}}\right) \\
&\vdots \\
\tau_к &= \frac{I_к^2 \Delta t_к}{B_{э_к} T_{э_к}} + \tau_{к-1} \left(1 - \frac{\Delta t_к}{T_{эк}}\right) \\
\tau_n &= \frac{I_n^2 \Delta t_n}{B_{э_n} T_{э_n}} + \tau_{n-1} \left(1 - \frac{\Delta t_n}{T_{э_n}}\right)
\end{aligned}\right\} \qquad (361)$$

Дальнейшие вычисления следует вести по показательным формулам (355) и (356). Разложение их в ряд может повлечь за собой значительную ошибку, так как здесь показатели степеней, выражаясь суммами, могут иметь относительно большие величины и быть больше единицы. Для небольших же промежутков формулы (361) дают вполне достаточную точность.

Второй способ, посредством которого можно установить температуру нагрева двигателя на линии, можно обосновать на методе двухступенчатого нагрева. Пользоваться им удобнее всего, применяя формулу двухступенчатого нагрева в виде:

$$\tau = \frac{P_n}{B_{ж}} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_{ж}}}\right) + \tau_{ж_0} e^{-\frac{\Delta t}{T_{ж}}} + \frac{I^2}{B'_м} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_м}}\right) + \tau_{м_0} e^{-\frac{\Delta t}{T_м}} \qquad (362)$$

По своему виду данная формула не отличается от формулы однородного эквивалентного тела, только число членов удваивается. Нетрудно видеть, что если рассмотренную теорию эквивалентного тела применить отдельно к первому и второму членам формулы, а затем к третьему и четвертому, то, по существу, для каждой отдельно взятой группировки будут получаться те же самые выражения, что и при только что рассмотренном методе. В каждый данный момент искомое превышение температуры τ будет равно сумме превышения температуры железа над температурой атмосферы и температуры меди над температурой железа.

В соответствии с этим формула (362) может быть переписана в виде:

$$\tau_n = \tau_{ж_n} + \tau_{м_n} \qquad (363)$$

В данном случае:

$$\left.\begin{aligned}
\tau_{ж_n} = {} & \frac{P_{n_n}}{B_{ж_n}} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_n}{T_{ж_n}}}\right) + \frac{P_{n_{(n-1)}}}{B_{ж_{(n-1)}}} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_{n-1}}{T_{ж_{(n-1)}}}}\right) e^{-\frac{\Delta t_n}{T_{ж_n}}} + \ldots + \\
& + \ldots + \frac{P_{n_к}}{B_{ж_к}} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_к}{T_{ж_к}}}\right) e^{-\sum_{к+1}^{n} \frac{\Delta t}{T_ж}} + \ldots + \frac{P_{n_1}}{B_{ж_1}} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_1}{T_{ж_1}}}\right) e^{-\sum_{2}^{n} \frac{\Delta t}{T_ж}} + \tau_{ж_0} e^{-\sum_{1}^{n} \frac{\Delta t}{T_ж}}
\end{aligned}\right\} \qquad (364)$$

Здесь потери, как было указано выше, определяются по к. п. д. двигателя, за исключением потерь в передаче.

Таким же самым образом:

$$\left.\begin{aligned}
\tau_{м_n} = {} & \frac{I_n^2}{B'_м} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_n}{T_м}}\right) + \frac{I_{n-1}^2}{B'_м} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_{n-1}}{T_м}}\right) e^{-\frac{\Delta t_n}{T_м}} + \ldots + \\
& + \ldots + \frac{I_к}{B'} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_к}{T_м}}\right) e^{-\sum_{к+1}^{n} \frac{\Delta t}{T_м}} + \ldots + \frac{I_1^2}{B'_м} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_1}{T_м}}\right) e^{-\sum_{2}^{n} \frac{\Delta t}{T_м}} + \tau_{м_0} e^{-\sum_{1}^{n} \frac{\Delta t}{T_м}}
\end{aligned}\right\} \qquad (365)$$

Далее можно написать аналогично формуле (354):

$$\tau_{ж_n} = \Theta_{ж} + \tau_{ж_0} e^{-\sum_{1}^{n} \frac{\Delta t}{T_ж}};$$

$$\tau_{м_n} = \Theta_{м_1} + \tau_{м_0} e^{-\sum_{1}^{n} \frac{\Delta t}{T_м}}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ОПЕЧАТКИ

Стр.	*Строка*	*Напечатано*	*Должно быть*
330	формула 365	$\frac{I_к}{B'_м}$	$\frac{I_к^2}{B'_м}$
330	2 сн.	$\Theta_{ж}$	$\Theta_{ж1}$

Заказ 2070

НБ
УДУНТ
(ДІІТ)

Отсюда температура в конце рабочего дня, по аналогии с формулой (355):

$$\Theta_m = \Theta_{ж_1}\frac{1-e^{-m\sum_1^n\frac{\Delta t}{T_{ж}}}}{1-e^{-\sum_1^n\frac{\Delta t}{T_{ж}}}} + \Theta_{м_1}\frac{1-e^{-m\sum_1^n\frac{\Delta t}{T_{м}}}}{1-e^{-\sum_1^n\frac{\Delta t}{T_{м}}}} + \tau_{ж_0}e^{-m\sum_1^n\frac{\Delta t}{T_{ж}}} + \tau_{м_0}e^{-m\sum_1^n\frac{\Delta t}{T_{м}}} \qquad (366)$$

Таким же образом получаются и все прочие формулы, приведенные в методе эквивалентного тела. Тепловые коэфициенты, входящие в формулы двухступенчатого нагрева, определяются по способам, разобранным в отделе тяговых двигателей. Вычисления значительно упрощаются благодаря тому, что коэфициенты $B'_м$ и $T_м$, а для двигателей закрытых и с независимой вентиляцией также $B_ж$ и $T_ж$ принимаются постоянными.

Третий способ определения температуры двигателя при работе его на линии основан на методе тепловых характеристик. Токи, потребляемые двигателями в каждый рассматриваемый период, определяются так же как и в только что разобранных методах. Самый же способ определения температур совершенно такой же, как рассмотренный в отделе тяговых электродвигателей. Практически метод тепловых характеристик применим для такой работы двигателей, при которой интервалы нагрузок достаточно велики. В условиях городского и даже пригородного движения, где интервалы отдельных элементов измеряются секундами, пользоваться тепловыми характеристиками, имеющими по оси абсцисс в большинстве случаев часы или минуты, очень трудно. Главная область применения тепловых характеристик — магистральные железные дороги.

Определение пригодности двигателя по методу средне-нагревательного тока. Данный метод пользуется еще и до настоящего времени широким применением. Принцип его заключается в переходе от переменного режима работы двигателя к режиму постоянному, эквивалентному первому в отношении нагревания. Задача, по существу, сводится к отысканию такого тока, который дал бы такое же повышение температуры двигателя, какое он имел бы на линии при условии одинаковой продолжительности обоих процессов. При определении средне-нагревательного тока или, как часто называют, эквивалентого тока, достаточно исходить из одного основного цикла изменений нагрузок, регулярно повторяющегося. Основываясь на том, что и при постоянном режиме, и при действительной работе на линии повышение температуры двигателя будет одинаково, величину эквивалентного тока, если принять соответствующие ему тепловые коэфициенты равными $B_э$ и $T_э$, можно вывести из уравнения (353):

$$\frac{I_э^2}{B_э}\left(1-e^{-\frac{1}{T_э}\sum_1^n t}\right)+\tau_0 e^{-\frac{1}{T_э}\sum_1^n t}=\frac{I_n^2}{B_n}\left(1-e^{-\frac{\Delta t_n}{T_n}}\right)+\frac{I_{n-1}^2}{B_{n-1}}\left(1-e^{-\frac{\Delta t_{n-1}}{T_{n-1}}}\right)e^{-\frac{\Delta t_n}{T_n}}+\ldots+$$
$$+\ldots+\frac{I_к^2}{B_к}\left(1-e^{-\frac{\Delta t_к}{T_к}}\right)e^{-\sum_{к+1}^n\frac{\Delta t}{T}}+\ldots+\frac{I_1^2}{B_1}\left(1-e^{-\frac{\Delta t_1}{T_1}}\right)e^{-\sum_2^n\frac{\Delta t}{T}}+\tau_0 e^{-\sum_1^n\frac{\Delta t}{T}}. \qquad (367)$$

Преобразование этой формулы производится путем разложения в ряд ее показательных членов. Для примера можно показать разложение члена:

$$\frac{I_к^2}{B_к}\left(1-e^{-\frac{\Delta t_к}{T_к}}\right)e^{-\sum_{к+1}^n\frac{\Delta t}{T}}=\frac{I_к^2}{B_к}\left(e^{-\sum_{к+1}^n\frac{\Delta t}{T}}-e^{-\sum_к^n\frac{\Delta t}{T}}\right).$$

Разложение дает при пренебрежении членами высшего порядка выражение:

$$\left.\begin{aligned}\frac{I_к^2}{B_к}\Big[1-\Big(\frac{\Delta t_n}{T_n}+\frac{\Delta t_{n-1}}{T_{n-1}}+\ldots+\frac{\Delta t_{к+1}}{T_{к+1}}\Big)-1+\\ +\Big(\frac{\Delta t_n}{T_n}+\frac{\Delta t_{n-1}}{T_{n-1}}+\ldots+\frac{\Delta t_{к+1}}{T_{к+1}}+\frac{\Delta t_к}{T_к}\Big)\Big]=\frac{I_к^2\Delta t_к}{B_к T_к}\end{aligned}\right\}. \qquad (368)$$

Если эквивалентность провести при условии одинаковых начальных превышений температур, равенства $\sum^n\frac{\Delta t}{T}=\frac{1}{T_в}\sum_1^n\Delta t$ и соотношения (368), то, применяя принцип

НБ УДУНТ (ДІІТ)

разложения ко всем показательным членам (367), можно притти к общепринятой формуле определения эквивалентного тока:

$$I_в = \sqrt{\frac{I_n^2 \Delta t_n + I_{n-1}^2 \Delta t_{n-1} + \quad + I_к^2 \Delta t_к + \ . \ . \quad + I_1^2 \Delta t_1}{\sum^{n} \Delta t}} \tag{369}$$

Метод средне-нагревательного тока удобен благодаря своей простоте. Дефект его заключается в недостаточной точности. Точность его будет достаточной только при условии относительной незначительности пренебрегаемых членов высшего порядка, что требует малых значений $\frac{\Delta t}{T}$. Особенно нужно опасаться ошибок при железнодорожных двигателях значительной мощности с интенсивной вентиляцией. Для них T относительно малы, а время полного изменения нагрузок может быть велико. Другим недостатком разбираемого метода является невозможность более или менее точно установить при нем наибольший нормально возможный перегрев машины. Очень легко может случиться, что двигатель с точки зрения средне-нагревательного тока пригоден, между тем как временами его температура может достигать недопустимых величин. Последнего особенно нужно опасаться при двигателях с искусственной вентиляцией, имеющих по сравнению с закрытыми при одинаковых длительных мощностях меньшую теплоемкость.

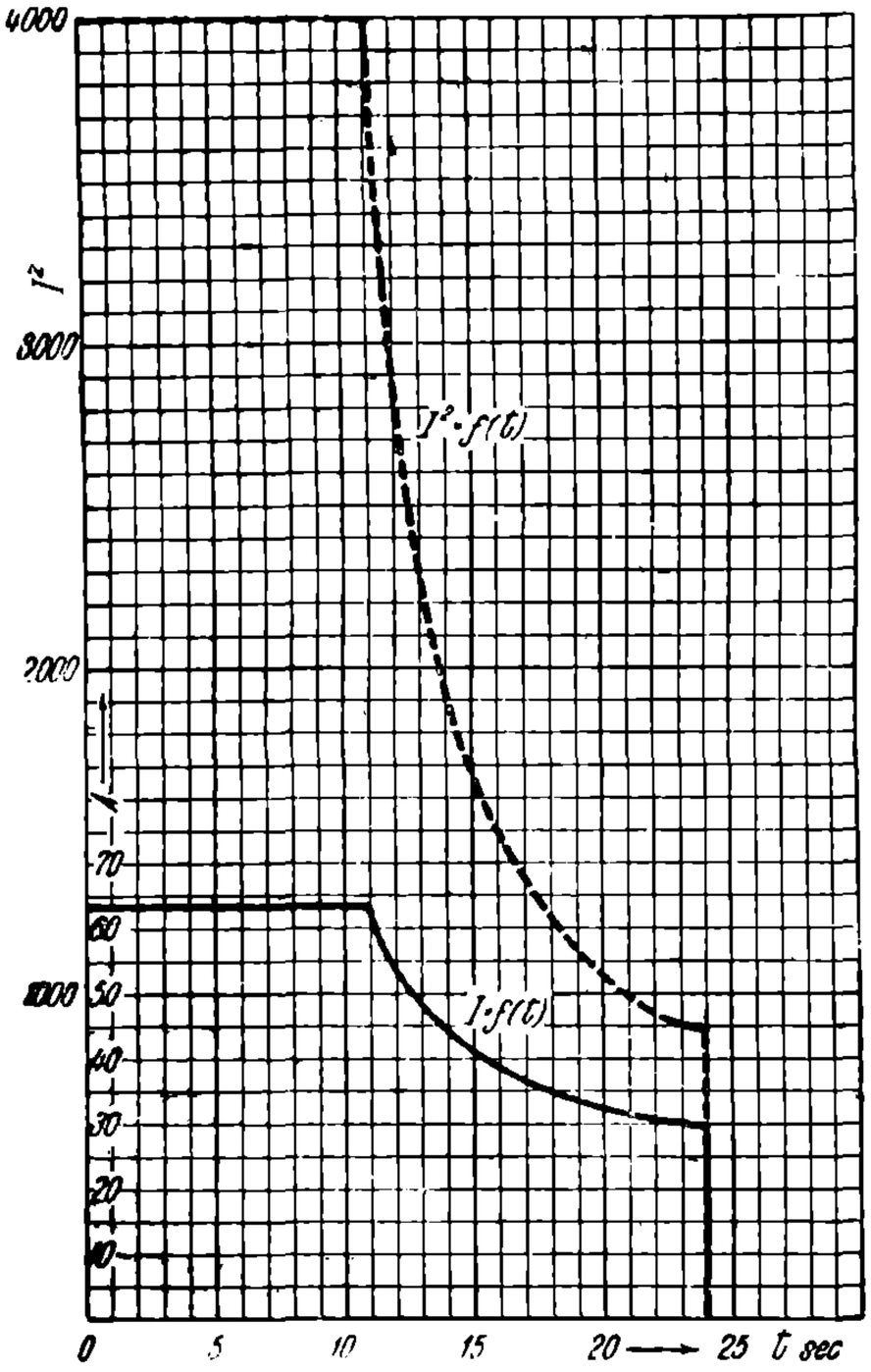


Рис. 372. Диаграмма для определения средне-квадратичного тока.

Метод непосредственного определения нагревания двигателей сложнее в отношении выкладок; но зато он более точен, а главное, он может дать полную картину изменения температур двигателей и позволяет устанавливать их значения для любого момента движения поезда.

На практике средне-квадратный ток определяется или графическим способом, или аналитическим.

В случае применения графического метода строят на основании кривой потребления тока поездом (рис. 353) кривую токов, проходящих по цепи каждого двигателя в отдельности (рис. 372). Затем полученную кривую перестраивают на кривую квадратичных значений токов в функции от времени. Измерив площади полученной кривой $I^2 = f(t)$ при масштабе квадратов токов m_{eff}, определяют значение средне-нагревательного тока из выражения:

$$I_в = \sqrt{\frac{[\text{площ. } I^2 = f(t)]}{m_{eff} m_t \ T_к}}. \tag{370}$$

В случае применения аналитического метода можно кривую квадратических значений токов не строить, а непосредственно исходить из кривой токов, потребляемых каждым двигателем. Для этой цели данную кривую делят в отношении времени на элементы с таким расчетом, чтобы в пределах каждого такого элемента потребляемый двигателем ток был постоянным или мог быть принятым за таковой с точностью, достаточной для практики, причем элементы, в пределах которых ток испытывает резкие колебания, должны браться по возможности малыми. При вычислениях каждому выбранному элементу времени приписывают ток, равный среднему его значению за данный период времени. Согласно сказанному выше, средне-нагревательный ток должен определяться на основании формулы (369).

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

При определении мощности двигателя на основании только одного эквивалентного перегона средне-нагревательный ток определяется для этого перегона. При точных расчетах для городского и пригородного движения средне-нагревательный ток определяется за период полного рейса. Для дальнего движения этот ток целесообразно устанавливать за период 5—6-часового движения поезда, приурочивая это движение поезда к наиболее тяжелому участку пути.

Пригодность двигателя с точки зрения мощности согласно разбираемому методу должна устанавливаться на основании выражения:

$$I_\infty = I_э. \tag{371}$$

При пользовании данной формулой получаются осложнения в отношении того, к какому напряжению следует относить I_∞. Как видно из табл. 19, токи продол жительной мощности тяговых двигателей вследствие изменения магнитных потерь а при двигателях с самовентиляцией и вследствие изменения интенсивности вентиляции, неодинаковы при различных режимах. Точно разрешить данный вопрос чрезвычайно трудно. Ввиду этого решать его приходится приближенно. Практически здесь можно рекоменловать следующие приемы. При данном напряжении у токоприемника поезда напряжение на зажимах двигателей зависит от пусковых регуляторов, причем в течение работы под пусковыми регуляторами это напряжение можно в среднем считать равным половине нормального. Для закрытых двигателей и двигателей с независимой вентиляцией, учитывая понижение напряжения на зажимах двигателя из-за пусковых регуляторов, можно относить I_∞ к напряжению, среднему за период работы двигателя под током и определяемому выражением:

$$U_{ep} = \frac{T_a - 0{,}5T_n}{T_a} U. \tag{372}$$

Для той же категории двигателей американская практика рекомендует относить I_∞ к тому напряжению, которому должны соответствовать магнитные потери при $I_э$, равные средним магнитным потерям при работе двигателя на линии.

Для двигателей с самовентиляцией чаще всего рекомендуется I_∞ приурочивать к тому напряжению, которое при $I_э$ соответствует v_x, и которое приближенно можно устанавливать согласно равенству:

$$U_x = \frac{v_x}{v_\infty} U. \tag{373}$$

Здесь v_∞—скорость движения поезда, соответствующая I_∞ при нормальном напряжении U.

Наконец, можно предложить еще один прием, наиболее простой и практически мало отличающийся по точности от предыдущих. Для двигателей с самовентиляцией, а в случае дальнего движения для двигателей всех систем I_∞ допустимо относить к полному напряжению рабочей сети. Допустимо это потому, что для двигателей с самовентиляцией, как показывает табл 19, токи I_∞ в широких пределах мало зависят от напряжения на зажимах двигателя. Что же касается дальнего движения, то здесь вообще среднее напряжение практически близко к напряжению нормальному.

3. Методы предварительного установления мощности тяговых электродвигателей.

Проверка двигателя на нагрев по рассмотренным способам возможна только тогда, когда произведен тяговой расчет, построены кривые движения и определены токи, потребляемые двигателями. Для такого рода проверки необходимо оперировать с уже выбранным двигателем.

Задача предварительно выбрать мощность двигателя, когда неизвестны ни кривые движения поезда, ни токи, потребляемые поездом, представляет большую трудность. В большинстве случаев она может быть решена только предположительно и очень ориентировочно. Из числа методов ее решения нужно остановиться на методе пусковой мощности, методе определения мощности по руководящему подъему и методе работы.

Метод пусковой мощности. Этот способ основан на соотношении между часовой мощностью двигателя и мощностью, развиваемой им в момент выключения

НБ УГУНТ (ДІТ)

пусковых регуляторов. Установлено, что для закрытых двигателей, особенно в условиях городского движения эти две мощности по большей части бывают близки друг к другу, на основании чего при предварительном выборе мощности двигателя пользуются соотношением:

$$KW_h = KW_n. \tag{374}$$

Для двигателей с искусственной вентиляцией мощность часовую, естественно, следует брать меньше пусковой. Тогда выражение (374) должно быть изображено в виде:

$$KW_h = k_{hn} KW_n. \tag{375}$$

В приведенном выражении для двигателей с самовентиляцией средней интенсивности можно принимать $k_{hn} = 0{,}7$. Тот же коэфициент для быстроходных двигателей с интенсивной самовентиляцией или для двигателей с вентиляцией независимой можно брать около 0,6.

Пусковая мощность в момент выключения пусковых регуляторов определяется выражением:

$$KW_n = \frac{F_n v_n}{367} \tag{376}$$

Пусковая сила тяги F_n устанавливается из условий веса поезда и начального ускорения, а скорость v_n берется ориентировочно в пределах 0,55—0,65 v_{max}. Приведенный метод определения мощности должен считаться ориентировочным. Применяется он наиболее часто при определении мощности в условиях городского движения и отчасти пригородного.

Метод определения мощности по руководящему подъему. Этот метод, как и предыдущий имеет весьма условное обоснование. Базируется он на анализе частных случаев движения, для которых очень часто мощность, потребляемая для тяги поезда на руководящем подъеме, оказывается близкой к часовой. На основании этого мощность двигателя можно определить согласно выражению:

$$KW_h = KW_{ip} = \frac{F_{ip} v_{ip}}{367}. \tag{377}$$

Здесь KW_{ip}, F_{ip} и v_{ip} — соответственно мощность, сила тяги и скорость поезда на руководящем подъеме. Величины силы тяги F_{ip} и скорости v_{ip} устанавливаются предварительно на основании общих соображений, связанных с организацией движения. Сила тяги F_{ip} определяется весом поезда и сопротивлениями движению. Следует еще раз обратить внимание на то, что рассмотренный метод является очень приближенным, почему он может дать значительную неточность. Применим он только для магистрального движения и только для самых предварительных ориентировочных подсчетов.

Метод работы. Этот метод основывается на работе, совершаемой двигателями при движении поезда. Работа, вводимая в расчет мощности двигателей, определяется применительно к эквивалентному перегону. Выражение для нее берется по формуле (347), причем коэфициент k_n надо здесь для всех видов движения брать равным единице. Этот коэфициент учитывает экономию в энергии при пуске, получаемую за счет последовательно-параллельного включения двигателей благодаря уменьшению среднего пускового тока, берущегося от сети. Но при этом, как было указано выше, пусковой ток каждого двигателя в среднем остается постоянным в течение всего времени пуска. Так как для нагревания двигателя имеет значение сила тока не сети, а проходящего через его цепь, то, очевидно, для получения среднего значения этого тока при n двигателях, нужно формулу (347) привести к такому случаю, при котором все двигатели были бы включены все время параллельно, для чего и нужно принять $k_n = 1$.

При таком условии средний ток двигателя за период времени работы его под током можно определить по формуле:

$$I_{cp} = \frac{[9{,}81\,(r_{cp} \pm i_э)\,(l - l_m + l_n) + 38{,}5k\,(v_m^2 + v_n^2)]G_n}{\eta_{cp} n U T_a \cos\varphi_{cp}}.$$

Здесь U — напряжение сети, — средний коэфициент полезного действия за период нахождения двигателя под током T_a и $\cos\varphi_{cp}$ при тех же условиях—средний

НБ УДУНТ (ДІІТ)

коэфициент мощности. При трехфазном токе следует учесть число фаз, введя в знаменатель $\sqrt{3}$.

Далее находят средне-нагревательный ток двигателя, относя его ко времени нахождения поезда на перегоне. Для этого сначала переходят от найденного среднего тока за период T_a к средне-нагревательному за тот же период. Для этого вводят коэфициент k_{eff}, величина которого колеблется в пределах 1,03—1,25 при среднем значении около 1,05 - 1,08. Затем, руководствуясь соотношением $k_{eff}^2 I_{cp}^2 T_a = I_э^2 T_k$, относят найденный средне-нагревательный ток к периоду T_k, для чего умножают его на $\sqrt{\frac{T_a}{T_к}}$:

$$I_э = \frac{k_{eff}\,[9{,}81\ (r_{cp} \pm i_э)\ (l - l_m + l_n) + 38{,}5k\,(v_m^2 + v_n^2)]\,G_n}{\eta_{cp}\ nU\sqrt{T_a T_к}\cos\varphi_{cp}} \qquad (378)$$

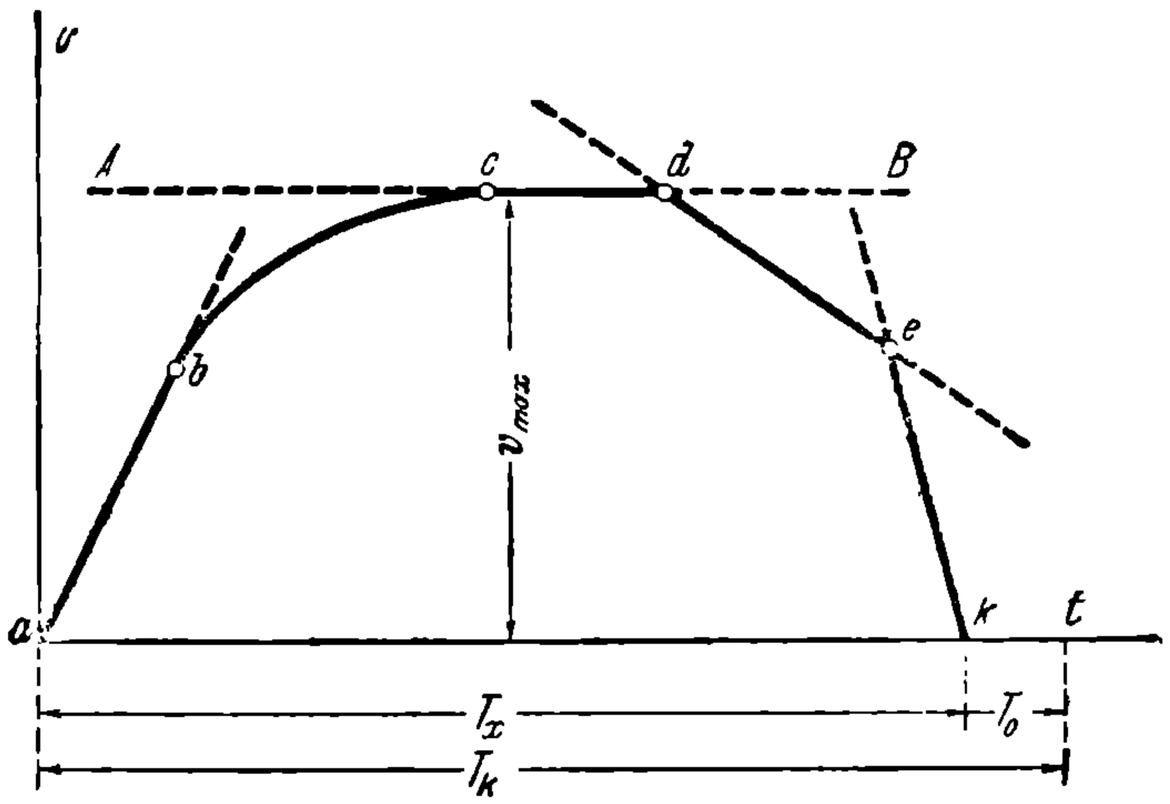


Рис. 373. Диаграмма для определения мощности тягового электродвигателя.

От установленного по этому способу тока $I_э$, путем введения на неточность расчета $k_{зап}$, переходят к току продолжительной мощности I_∞ (форм. 371). После этого определяют ток часовой мощности, для чего вводят в формулу коэфициент вентиляции $k_в$, характеризующий отношение $= I_\infty / I_h$. Последний для закрытых двигателей может быть в среднем принят равным около 0,4 для двигателей с самовентиляцией средней интенсивности—0,65—0,78, для того же типа двигателей, но ультрабыстроходных —0,9 и для двигателей с независимой вентиляцией —0,82—0,85.

Наконец, по току часового режима устанавливают часовую мощность двигателя, причем делается допущение, что η_{cp} и $\cos\varphi_{cp}$ таковы же, как при часовом режиме:

$$KW_h = \frac{k_{eff} k_{зап}\,[9{,}81\,(r_{cp} \pm i_э)\,(l - l_m + l_n) + 38{,}5k\,(v_m^2 + v_n^2)]\,G_n}{1000\,k_в n\sqrt{T_a T_к}}. \qquad (379)$$

Главная трудность при пользовании формулой (379) заключается в предварительном определении времени работы двигателя под током T_a. Для установления более или менее точного значения этой величины приходится находить хотя бы приближенно кривую $v = f(t)$, которая при нижеприводимых допущениях построена на рис. 373.

При предварительных подсчетах, задавшись величинами начального ускорения и замедления при торможении, можно считать, что эти величины будут оставаться постоянными, благодаря чему построение искомой кривой значительно упрощается, так как участки ее ab и ek будут прямолинейными. Точно так же за прямую линию позволительно принять и кривую выбега, для чего нужно предположить выбег поезда совершающимся при постоянном сопротивлении движению. Задавшись v_{max}, можно на рис. 373 провести прямую установившейся скорости AB. Кривую bc в первом приближении допустимо нанести от руки по аналогии с подобного рода кривыми. Если эта кривая будет нанесена неточно, то особенно большой ошибки

НТБ УНУНТ (ДІТ)

это в конечные результаты не внесет. Значения T_x и $T_к$ устанавливаются по заданной коммерческой скорости и продолжительности остановок на промежуточных станциях. Сопряжение отдельных частей искомой кривой производится на основании равенства ее площади перегону с учетом принятых масштабов. Построенная указанным способом кривая дает возможность установить требуемые значения.

Разобранный способ предварительного определения мощности двигателя сильно упрощается применительно к дорогам дальнего следования. Благодаря большой длине перегонов T_a тогда нормально достаточно близко к $T_к$, что дает возможность положить $T_a = T_x = T_к$. Кроме того, в разбираемом случае пусковые и тормозные потери оказывают на мощность значительно меньшее влияние, чем на дорогах с короткими перегонами. Отмеченные обстоятельства позволяют в некоторых случаях, в отношении дорог дальнего следования вместо формулы (379) пользоваться более простым выражением:

$$KW_h = \frac{k_{пт} k_{eff} k_{зап} (r_{ср} \pm i_э) v_x G_п}{367 k_н n}. \qquad (380)$$

В данном выражении коэфициент $k_{пт}$ дает меру поправки на пусковые и тормозные потери. Среднее его значение в нормальных условиях движения колеблется в пределах 1,05—1,2. Ввиду относительно широких пределов изменения $k_{пт}$ лучше во всех ответственных случаях расчета прибегать непосредственно к формуле (379).

Метод определения мощности по работе на эквивалентном перегоне при некоторых профилях может дать значительную ошибку. В этом отношении особенно опасны линии достаточно большой протяженности, имеющие один или вообще небольшое количество тяжелых затяжных подъемов. При таких условиях эквивалентный подъем может получиться небольшим, в связи с чем может получиться согласно формуле (379) и относительно небольшая мощность двигателей. В результате двигателям, имеющим в среднем допустимую температуру нагрева, на затяжных перегонах грозит совершенно недопустимый перегрев. Наиболее надежную поправку при данных условиях движения можно ввести путем применения метода непосредственного определения нагрева двигателя.

При обосновании этой поправки нужно иметь в виду, что при подходе к основному подъему двигатели уже бывают в большей или меньшей степени подогреты. Руководствуясь формулой (380), мощность, которую двигатели должны в среднем развивать на линии, можно определить выражением:

$$KW_0 = \frac{k_{пт} k_{eff} (r_{ср} \pm i_э) v_x G_п}{367}. \qquad (381)$$

Мощность же, развиваемая на опасном подъеме i_{max}, должна быть равна:

$$KW_i = \frac{(r_{icp} + i_{max} v_i) G_п}{367}. \qquad (382)$$

Зная мощности KW_0, KW_i и напряжение сети и принимая для к. п. д. среднее нормальное значение для предполагаемого типа двигателя, легко определить и соответствующие этим мощностям токи I_0 и I_i.

Зная эти токи, превышение температуры в конце опасного подъема можно определить с достаточной степенью приближения по формуле:

$$\tau_i = \frac{I_i^2}{B_i}\left(1 - e^{-\frac{t_i}{T_i}}\right) + \frac{I_0^2}{B_0}\left(1 - e^{-\sum_1^n \frac{t_0}{T_0}}\right) e^{-\frac{t_i}{T_i}} \qquad (383)$$

Следует обратить внимание на то, что в последних трех формулах все величины со значками i относятся к работе двигателей на подъеме, а со значками 0 к средним линейным условиям работы. Стоящая во вторых скобках в показателе сумма учитывает все время движения поезда от начального момента до подъема. Ввиду этого она в большинстве случаев достаточно велика, и поэтому значения второго выражения в скобках для средних условий можно принимать равными единице.

Наиболее надежно можно перейти от полученной температуры нагрева τ_i к расчетной мощности двигателей, полагая, что превышение τ_i должно соответствовать

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ОПЕЧАТКИ

Стр.	*Строка*	*Напечатано*	*Должно быть*
336	формула 382	$(r_{icp} + i_{\max} v_i)$	$(r_{icp} + l_{\max})\, v_i$

Заказ 2070

НБ
УДУНТ
(ДІІТ)

предельному превышению τ_∞ при токе длительной мощности искомого двигателя. При сделанных предположениях равенство (383) может быть переписано в виде:

$$\frac{I_\infty^2}{B_\infty} = \frac{I_i^2}{B_i}\left(1 - e^{-\frac{t_i}{T_i}}\right) + \frac{P_0}{B}\left(1 - e^{-\sum_1^n \frac{t_0}{T_0}}\right) e^{-\frac{t_i}{T_i}} \tag{384}$$

Далее, положив $B_\infty = B_i = B_0$, путем умножения всех членов уравнения (384) на $10^{-6}\eta_{cp}^2 U^2$, а в случае переменного тока еще и на выражение в $\cos\varphi^2_{cp}$, можно получить, приравнивая второй член во вторых скобках нулю, искомое значение мощности в виде:

$$KW_\infty = k_{зап} KW_0 \sqrt{\left(\frac{KW_i}{KW_0}\right)^2 \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T_i}}\right) + e^{-\frac{t_i}{T_i}}} \tag{385}$$

Данное выражение приближенно устанавливает длительную мощность всех двигателей поезда. С некоторыми затруднениями здесь может быть сопряжено определение постоянной времени T_i. Однако, вопрос об определении ее упрощается благодаря тому, что колебания ее для двигателей одного и того же типа не особенно велики. Если желательно проверить еще раз двигатель, выбранный указанным способом, то можно снова воспользоваться формулой (383). Если двигатель согласно формуле (385) выбран конкретно, и для него становятся известными тяговые и тепловые параметры, то все тяговые и тепловые его параметры, входящие в формулу (383), могут быть определены с достаточной точностью.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ОТДЕЛ СЕДЬМОЙ

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ.

I. ПРОЦЕСС ДВИЖЕНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПО РЕЛЬСОВОМУ ПУТИ.

1. Общие уравнения колебаний подвижного состава.

В основе движения подвижного состава лежит качение его колес по рельсовому пути. При поверхностном наблюдении данного процесса может показаться, что подвижной состав сам по себе не испытывает никаких изменений, кроме поступательного перемещения вперед. Однако, при более внимательном наблюдении картина оказывается гораздо более сложной. Нетрудно заметить, что, помимо движения вперед, подвижной состав совершает целый ряд побочных перемещений, проявляющихся по большей части в виде добавочных колебательных процессов. Эти колебания, являясь совершенно ненужными с точки зрения основного движения, требуют тем не менее добавочной затраты энергии, создавая к тому же очень часто угрозу для безопасности движения, расстраивая подвижной состав и путь, а также являясь источником тряски и толчков, передающихся пассажирам и грузу. Ввиду указанного эти колебательные процессы в теории тяги получили название паразитных.

Причины возникновения паразитных колебаний кроются, главным образом, в состоянии рельсового пути и самого подвижного состава. Ввиду этого, прежде чем приступить к изучению последнего, необходимо в основных чертах изучить физику процесса паразитных колебаний и связать их с основными элементами конструкции отдельных его частей. Все части современного подвижного состава нужно разбить на две категории. К первой относятся части, покоящиеся на рессорах. Ко второй принадлежат те, которые свою тяжесть на рельсы передают жестко. Подрессорные части в современном подвижном составе по весу составляют только небольшую часть, но тем не менее представляют большую опасность, являясь источником и передатчиком ударных эффектов в направлении от рельсового пути к надрессорному строению. В общем случае движения подвижного состава, как и вообще всякого тела, все колебательные процессы можно рассматривать совершающимися около трех взаимно перпендикулярных осей: по отношению к движению поперечной, продольной и вертикальной. Для подвижного состава наиболее характерным колебательным процессом являются его перемещения в вертикальной продольной плоскости. Этот процесс проявляется в виде перемещений, характеризующихся, во-первых, подпрыгиванием подвижного состава и, во-вторых, продольной его качкой около оси, перпендикулярной к направлению движения. Последний процесс, по сходству с ощущениями от езды на идущей в галоп лошади, носит название галопирования. Колебания, имеющие место около горизонтальной оси, параллельной направлению движения, обнаруживаются в виде боковой качки подвижного состава или перевалки его с одного бока на другой. Третий характерный тип колебания происходит около вертикальной оси. Проявляется он в виде поперечных перемещений подвижного состава, вызывающих как бы волнообразное его движение с перебеганием от одной нитки рельсов к другой.

Первые три из вышеуказанных видов колебаний — подпрыгивание, галопирование и боковая качка подвижного состава — в значительной степени определяются законами работы рессор. Под влиянием ударных воздействий, жестко воспринимаемых от пути полускатами и передаваемых ими через рессоры надрессорному строению, последнее приходит в колебательное движение. Благодаря упругости рессор, эти колебания подчиняются определенной закономерности. Если при коле-

ЛВ УДУНТ (ДІІТ)

баниях надрессорное строение предоставляется самому себе, то колебательный процесс должен рассматриваться, как процесс свободных колебаний системы. Если же колебания сопровождаются повторными ударами со стороны полускатов, то необходимо учитывать еще и действие вынуждающих сил. В этом случае особую опасность представляет явление резонанса, возникающее, как известно, тогда, когда число периодов собственных колебаний делается равным числу периодов импульсов вынуждающих сил. В таком случае амплитуды колебаний могут принять недопустимые значения.

При колебательных процессах надрессорного строения очень важное значение имеет одна из точек, называемая центром упругости или иначе центром качания.

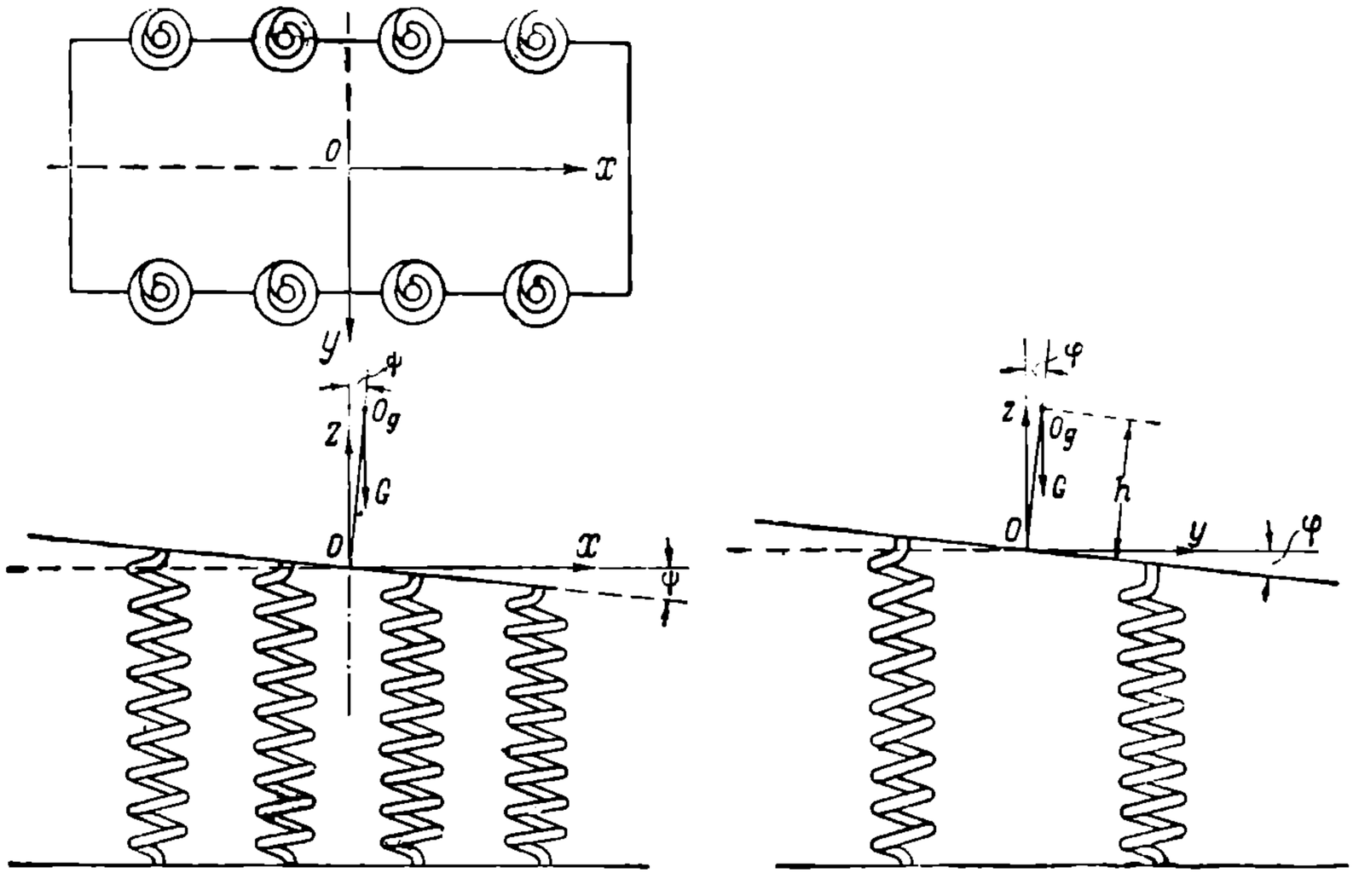


Рис. 374. Схема колебания надрессорного строения.

Эта точка обладает тем свойством, что при свободных колебаниях, происходящих в виде качания, например в виде галопирования или боковой качки, она под влиянием этих колебаний не меняет своего положения. Надрессорное строение качается около нее, как около центра. Отличительным свойством центра упругости является то, что при приложении к нему всякой вертикальной силы надрессорное строение может получить только вертикальное перемещение, т. е., другими словами, через центр упругости должна проходить равнодействующая вертикальных реакций сил упругости всех рессор данного надрессорного строения.

Центр упругости нужно искать на линии действия этой равнодействующей, положение которой можно определить по общим правилам механики, исходя из сил упругости отдельных рессор. Если при симметричном расположении рессор жесткость их одинакова или если даже она различна, но рессоры расположены симметрично по положению и по жестокости, направление этой равнодействующей должно определиться линией пересечения поперечной и продольной плоскостей симметрии надрессорного строения.

Положение центра упругости по высоте зависит от типа рессорного строения и от типа колебательных движений, которые рассматриваются. Во многих случаях положение это можно определить весьма просто, путем общего рассмотрения системы. В ряде же других случаев задача эта требует специального анализа (Л. 229).

При изучении колебательных процессов надрессорного строения рационально эти колебания рассматривать относительно трех координатных осей. Для наибольшей простоты и наглядности рассуждений очень важно эти оси удобно расположить. Удобнее всего начало координат поместить в точке центра упругости и рассматривать отдельные типы колебаний независимо. На рис. 374 приведена схема работы рессор. Точка *O* в данном случае принята за центр упругости (Л. 228). Центр тяжести подвижного состава в общем случае не совпадает с центром упругости рессор, но с большой степенью точности его можно считать в случае началь-

НТБ УИИТ (ДІІТ)

ного положения рессор находящимся на линии оси *OZ*. Такое допущение весьма облегчает анализ рассматриваемого явления. Согласно правилам механики все перемещения. связанные с интересующими нас свободными вертикальными деформациями рессор, могут быть выражены тремя уравнениями:

$$\left.\begin{aligned} \Sigma Z &= m\frac{d^2z}{dt^2} \\ \Sigma M_y &= I_y\frac{d\omega_y}{dt} \\ \Sigma M_x &= I_x\frac{d\omega_x}{dt} \end{aligned}\right\}. \qquad (386)$$

Здесь m — масса надрессорного строения, ΣZ — сумма проекций всех действующих сил на ось OZ, I_y, ω_y и ΣM_y — соответственно момент инерции, угловая скорость и сумма моментов всех сил относительно оси OY, и, наконец, I_x, ω_x и ΣM_x — те же величины относительно оси OX. Первое из написанных уравнений характеризует процесс подпрыгивания подвижного состава, второе — колебательное галопирование около оси OY и третье — боковое колебание или боковую качку по отношению к оси OX.

При рассмотрении работы рессор по отношению к оси OZ в первую очередь необходимо иметь в виду упругие силы самих рессор, определяемые выражением:

$$P = -pz, \qquad (387)$$

где p — коэфициент жесткости рессор, т. е. то усилие, которое необходимо для деформирования рессоры на единицу длины; а z — величина ее деформации в тех же единицах в направлении оси OZ, причем эту величину в процессе подпрыгивания нужно себе мыслить одной и той же для всех отдельных рессор. В соответствии с этим сумму всех упругих сил, действующих в процессе подпрыгивания, можно определить выражением $-z\Sigma p$. Знак минус перед упругими силами взят потому, что в принятой системе координат они растут, когда деформация рессор идет по линии отрицательных z.

Теперь перейдем к определению M_y — суммы моментов сил, принимающих участие в процессе галопирования, т. е., другими словами, в колебательном движении по отношению к оси OY. Прежде всего эта сумма моментов зависит от сил упругости. При колебании надрессорного строения около оси OY линия внешнего уровня рессор, как видно из рис. 374, должна непрерывно менять по отношению к оси OX свое положение, определяемое для каждого данного момента текущим значением угла поворота ψ. При таких условиях для любой рессоры, положение которой определяется соответствующей координатой x, величина ее деформации ввиду относительно малых здесь углов ψ может быть определена значением ψx. Сила же упругости, соответствующей этой деформации, будет ψpx, и момент этой силы относительно оси OY определится выражением ψpx^2. Отсюда сумма моментов всех сил должна получить значение:

$$M'_y = \psi\Sigma px^2.$$

Таким же самым образом для колебательного процесса около оси OX сумма всех моментов определится выражением:

$$M'_x = \varphi\Sigma py^2.$$

В случае отклонения центра тяжести от вертикали приходится учитывать также и влияние на колебания силы тяжести надрессорного строения (рис. 374). Моменты, создаваемые этим эффектом относительно осей OY и OX, приближенно при относительной малости углов ψ и φ могут быть выражены соотношениями:

$$M''_y = Gh\psi$$

и

$$M''_x = Gh\varphi.$$

Если принять за положительные моменты действующие по часовой стрелке, а все отрицательные — против нее, то выше рассмотренные силы и моменты можно свести к следующим выражениям:

$$\begin{aligned} \Sigma Z &= -z\Sigma p, \\ \Sigma M_y &= -\psi\Sigma px^2 + Gh\psi, \\ \Sigma M_x &= -\varphi\Sigma py^2 + Gh\varphi. \end{aligned}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Тогда при выражении ω_y и ω_x через ψ и φ (386) уравнения свободных колебаний:

$$m\frac{d^2z}{dt^2}+z\Sigma p=0,$$
$$I_y\frac{d^2\psi}{dt^2}+(\Sigma px^2-Gh)\psi=0,$$
$$I_x\frac{d^2\varphi}{dt^2}+(\Sigma py^2-Gh)\varphi=0.$$

Интегралы данных уравнений:

$$\left.\begin{aligned} z&=C_1\sin\omega'_z\,t+C_2\cos\omega'_z t\\ \psi&=C'_1\sin\omega'_y t+C'_2\cos\omega'_y t\\ \varphi&=C''_1\sin\omega'_x t+C''_2\cos\omega'_x t\end{aligned}\right\}. \qquad (388)$$

Отсюда видно, что собственные колебания надрессорного строения подчиняются синусоидальной зависимости. Угловые скорости этих колебаний определяются равенствами:

$$\omega'_z=\sqrt{\frac{\Sigma p}{m}},\qquad \omega'_y=\sqrt{\frac{\Sigma px^2-Gh}{I_y}}\quad\text{и}\quad \omega'_x=\sqrt{\frac{\Sigma py^2-Gh}{I_x}}.$$

Соответственно частоты собственных колебаний должны определиться выражениями:

$$\nu'_z=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\Sigma p}{m}},\qquad \nu'_y=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\Sigma px^2-Gh}{I_y}},$$

и

$$\nu'_x=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\Sigma py^2-Gh}{I_x}} \qquad (389)$$

Из данных выражений можно сделать очень важные заключения. Для достижения спокойного хода подвижного состава, очевидно, необходимо иметь возможно малыми угловые скорости ω'_z, ω'_y и ω'_x. Чем они меньше, тем менее ощутимы паразитные колебания. Как следует из равенства (389), увеличение жесткости рессор, т. е. увеличение p, действует отрицательно на степень плавности хода. Рессоры должны быть достаточно мягки. Жесткость современных рессор чаще всего колеблется в пределах 50—200 kg/mm. Частоты же собственных колебаний колеблются около 1—3 Hz.

Очень важное заключение можно сделать относительно положения центра тяжести надрессорного строения, определяемого в уравнениях (389) величиной h. Чем выше лежит центр тяжести, тем спокойнее ход подвижного состава.

Так протекает режим собственных колебаний надрессорного строения. Но данный случай является идеальным. В действительности, кроме разобранных сил, на колебания действует еще и ряд добавочных факторов. В частности неизбежным спутником всяких механических колебаний является трение. При перемещениях надрессорного строения трение имеет место в рессорах. Здесь трение, как и вообще при всяком движении, противодействует силам, производящим движение. Сила трения является элементом, успокаивающим колебания. Чем больше сила трения, тем скорее после получения ударных импульсов система приходит в состояние статического покоя. С указанной точки зрения при конструировании подвижного состава предпочтительны рессоры с большим коэфициентом трения. Этим в значительной степени объясняется, почему для подвижного состава во всех ответственных случаях предпочитают брать рессоры листовые, обладающие значительно бо́льшим трением, чем спиральные. В некоторых случаях применяются рессоры со специальными успокоителями колебаний.

2. Галопирование подвижного состава.

Для ясного представления о колебательных процессах очень важно знать те причины, которые служат источниками их возбуждения.

Наиболее сильным возбудителем их являются недочеты в рельсовом пути и, главным образом, расхлябанные стыки. Примерную картину движения колеса на ослабленном стыке дает рис. 375. Колеса, набегая на выступающие края рельсов *a*, получают удар, который через рессоры передается надрессорному строению, возбуждая рассмотренные выше колебательные процессы. Влияние стыков чаще всего вызывает процесс колебания в виде галопирования. Если импульсы повторяются

НБ УДУНТ (ДІІТ)

нерегулярно, или если частота их не соответствует частоте собственных колебаний надрессорного строения, то возбуждаемые ими колебания носят благодаря трению в рессорах затухающий характер. Если же импульсы, усиливающие колебания, повторяются с частотой равной частоте собственных колебаний рессор, то возникает явление резонанса. Амплитуды или размахи колебаний надрессорного строения могут принять недопустимую величину. Моменты, когда резонанс проявляется в наибольшей степени, зависят от скорости движения и расстояний между стыками. Каждому данному расстоянию между стыками соответствует своя критическая скорость, при которой резонанс достигает своего кульминационного значения. Если обозначить через l_p в метрах длину звена рельса и через T в секундах длительность периода собственных колебаний надрессорного строения, равную $\frac{1}{\nu_c}$, где ν_c их частота, то критическая скорость должна быть равна:

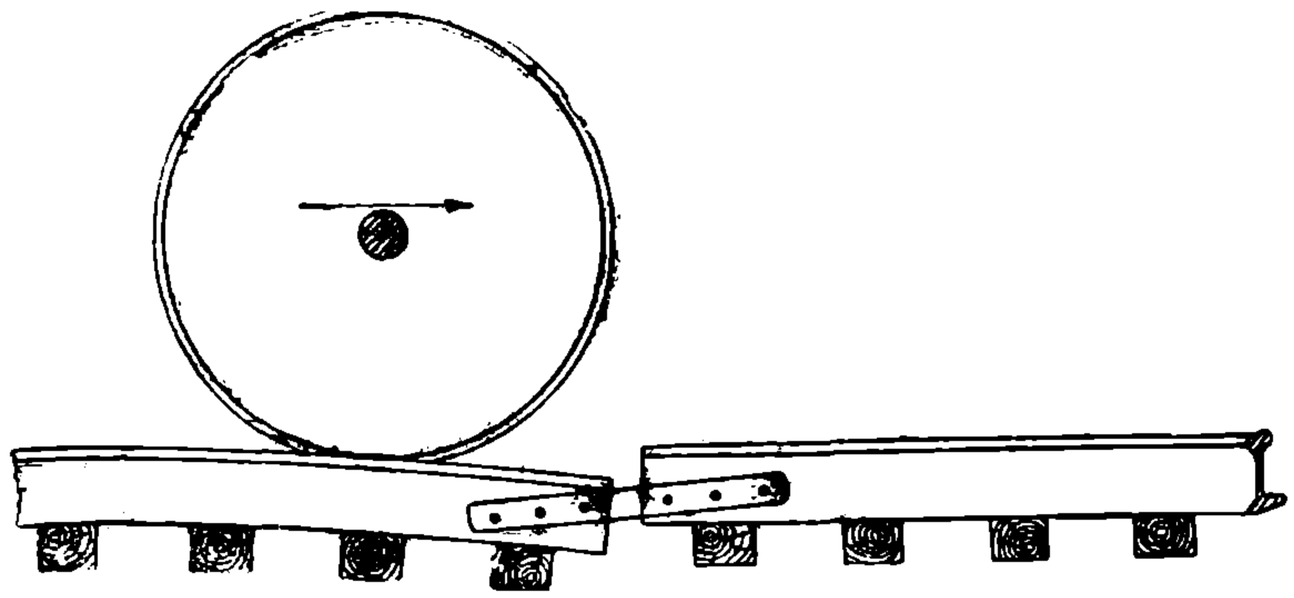


Рис. 375. Схема движения колеса на ослабленном стыке.

$$v_{кр} = 3{,}6 \frac{l_p}{T} \text{ km/h.} \tag{390}$$

Отсюда видно, что чем меньше l_p и ν_c, тем ниже та скорость, при которой возникает резонанс. Кроме стыков и вообще дефектов в рельсовом пути, причинами возникновения вертикальных колебательных перемещений может явиться и сам подвижной состав. Одной из таких причин бывает наличие неуравновешенных вращающихся масс инерции. На рис. 376-a показано, что в случае наличия таковых, например, на колесе, они будут при соприкосновении с рельсом, под действием центробежной силы, производить ударные эффекты, регулярно повторяющиеся. Эти удары естественно передаются надрессорному строению, возбуждая его колебания, которые могут при определенных условиях также перейти в явление резонанса. Нужно, однако, иметь в виду, что в подвижном составе электрических ж. д. неуравновешенные массы инерции встречаются в виде исключения. Это объясняется тем, что здесь неуравновешённых масс или совсем не бывает, или они могут появиться только на вращающихся частях, например, в электровозах с кривошипно-шатунной передачею. Уравновесить же массы, совершающие вращательное движение, не представляет никакого труда. Применение простейших противовесов вполне разрешает эту задачу. Полезно отметить, что у паровозов в этом отношении дело обстоит гораздо хуже. Здесь имеются такие массы, например, поршни, штоки, крейцкопфы которые совершают по отношению к главным массам надрессорного строения возвратно-поступательное движение, вызывающее его подергивание. Уравновесить массы с возвратно-поступательным движением очень трудно. В результате полной уравновешенности движущихся масс инерции у паровозов нормально не достигается. Степень неуравновешенности здесь достигает часто весьма большой величины. Показателем этого может служить тот факт, что у современных паровозов ударная нагрузка на ось, вызываемая неуравновешенными массами, достигает иногда 50—60% от нагрузки статической. Таким образом, при одном и том же весовом давлении на ось, у паровозов фактическое давление на ось в указанных случаях значительно выше, чем у электровозов. Этим обстоятельством объясняется то, что у электровозов при одном и том же рельсовом пути допустимы бóльшие весовые давления на ось, чем у паровозов. Согласно указаниям известного немецкого специалиста Wechmann'a, это повышение можно доводить по крайней мере до 15%.

Из числа других факторов, которые могут вызывать рассматриваемые перемещения подвижного состава, следует обратить внимание на неправильную форму сработки бандажей (рис. 376-b). По различным причинам, например, вследствие скольжения колес при торможении, на бандажах могут образоваться выбоины, может иметь место, как говорят, „прокат" бандажей. Понятно, что при таких условиях удары неиз-

НТБ УИИЖТ (ДІІТ)

бежны. Всякий раз, как такая выбоина касается рельсов, возникает резкий удар, сотрясающий часто весь кузов и вызывающий характерное дребезжание его оконных стекол.

Сама конструкция подвижного состава также оказывает влияние на интенсивность ударных эффектов. Согласно схеме, приведенной на рис. 377, для простейшего двухосного подвижного состава момент импульса силы удара может быть определен выражением:

$$M = \frac{Pl}{2},$$

где P есть сила удара, а l — величина базы подвижного состава, т. е. расстояние между его осями. Формула ударного момента показывает, что величина его растет с увеличением базы. Поэтому с указанной точки зрения казалось бы более выгодным иметь меньшую базу. Однако, это встречает препятствие в необходимости иметь длинные кузова подвижного состава. Для вагонов это необходимо с точки зрения их вместимости, в электровозах—для того, чтобы разместить оборудование и необходимое количество осей. Применение малых баз при длинных кузовах неизбежно приводит к тому, что получаются большие свешивающиеся консольные части. Конструктивное выполнение последних представляет большие трудности. Консоли вызывают крайне нежелательный перекос рессор и кузова. Это особенно резко сказывается при интенсивном торможении, при котором тормозное задерживающее усилие передается в первую очередь скатам. Надрессорная же часть в это время в силу инерции стремится вперед и благодаря деформации рессор принимает перекошенное положение. Получается, как говорят, ныряние носом подвижного состава, вызывающее сильное напряжение в рессорах и в самом кузове. По этой причине длинные консоли в подвижном составе не допускаются. Делать их больше трех метров вообще не рекомендуется. Ввиду этого при конструкции подвижного состава часто приходится применять относительно большие базы, хотя это очень нежелательно также и с точки зрения прохождения кривых. Некоторым выходом из данного положения служит применение подвижного состава на тележках (рис. 378). В таких случаях удар приходится в первую очередь на тележки, имеющие относительно небольшие базы. Кузов, не имея жесткой связи с тележками, получает значительно смягченные удары.

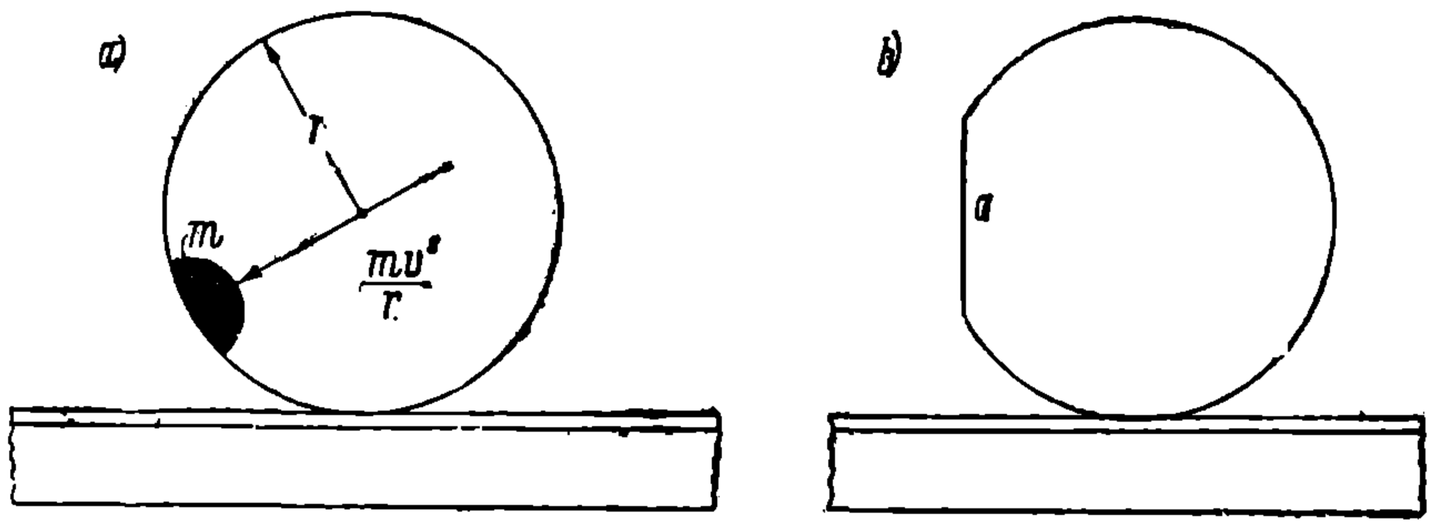


Рис. 376. Картина удара колес по рельсу.

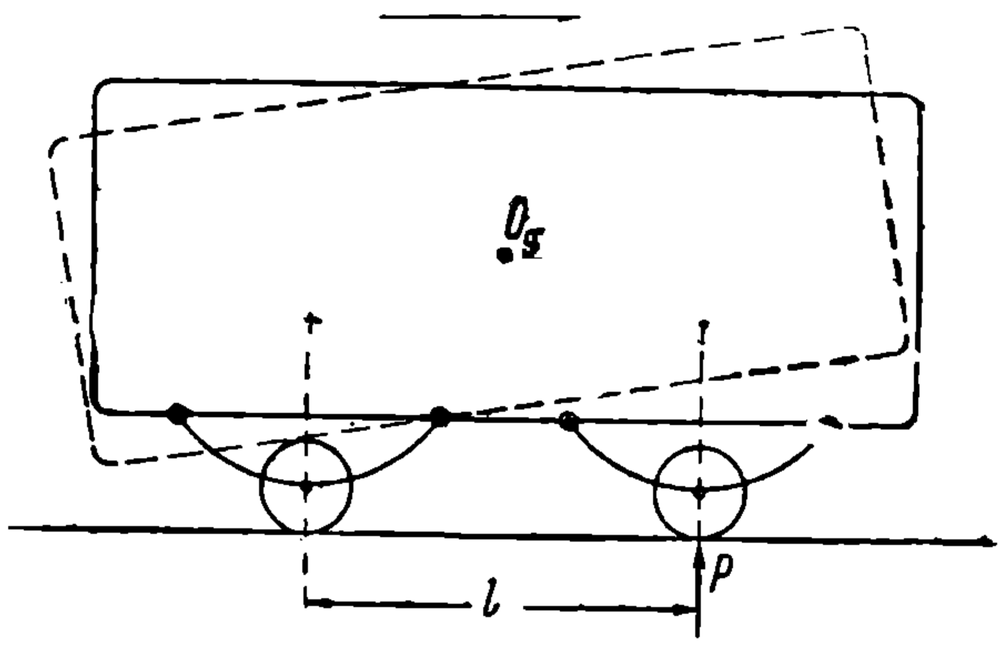


Рис. 377. Картина галопирования подвижного состава.

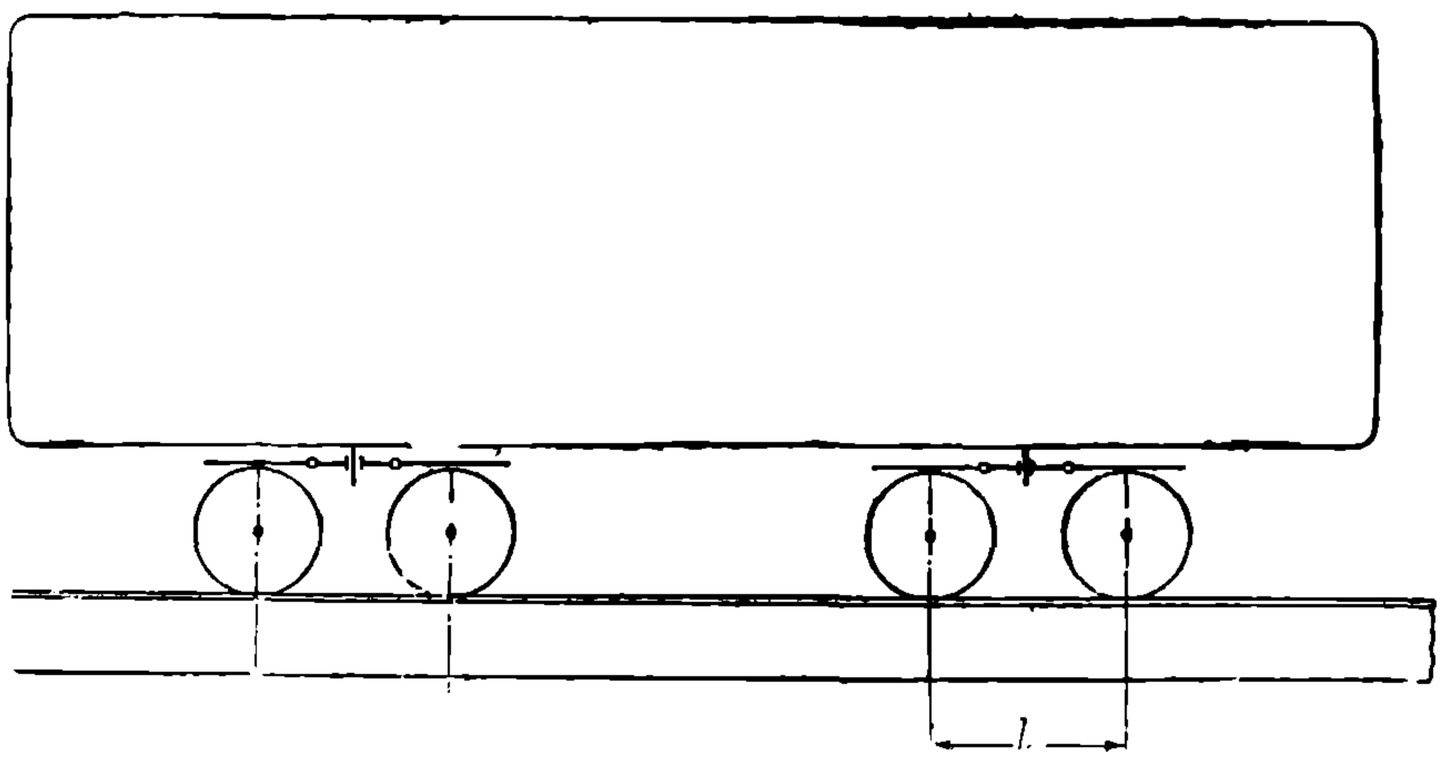


Рис. 378. Схема четырехосного вагона на тележках.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

3. Боковая качка подвижного состава.

Второй вид колебаний, боковая качка подвижного состава так же, как и галопирование, является в большинстве случае результатом неисправности рельсового пути, выражающейся в неодинаковом уровне отдельных ниток рельсов. Согласно выведенным выше уравнениям (388) в данном случае нас интересует уравнение колебания около оси *OX*. Здесь, как и при предыдущих колебаниях, важно иметь высокое положение центра тяжести подвижного состава. Колебания надрессорного строения тогда становятся более медленными. При таких условиях может даже оказаться, что короткие провалы одного из рельсов будут проходиться колесами прежде, чем надрессорное строение будет успевать всей тяжестью наваливаться на этот рельс.

Боковая качка, помимо неудобств для пассажиров, вызывает добавочные напряжения в частях подвижного состава и особенно чувствительна для рельсов

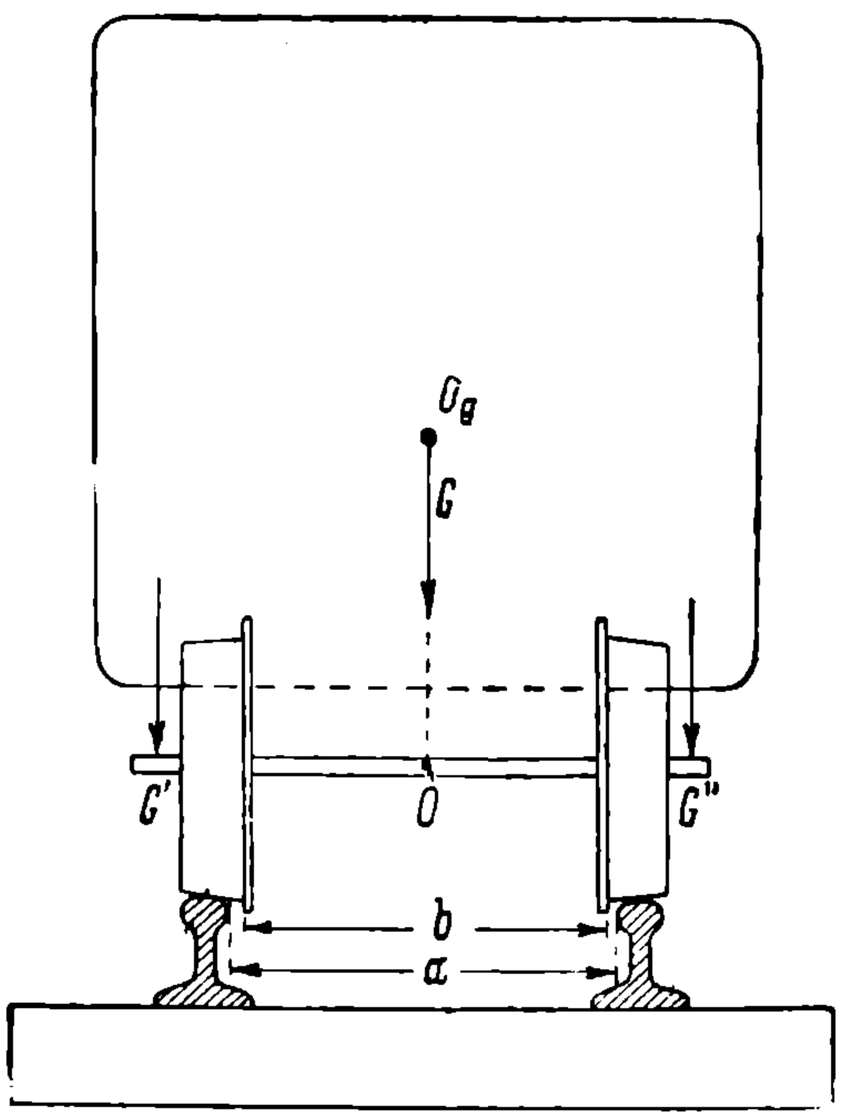


Рис. 379. Распределение весовых усилий в подвижном составе при одинаковом уровне положения обоих рельсов.

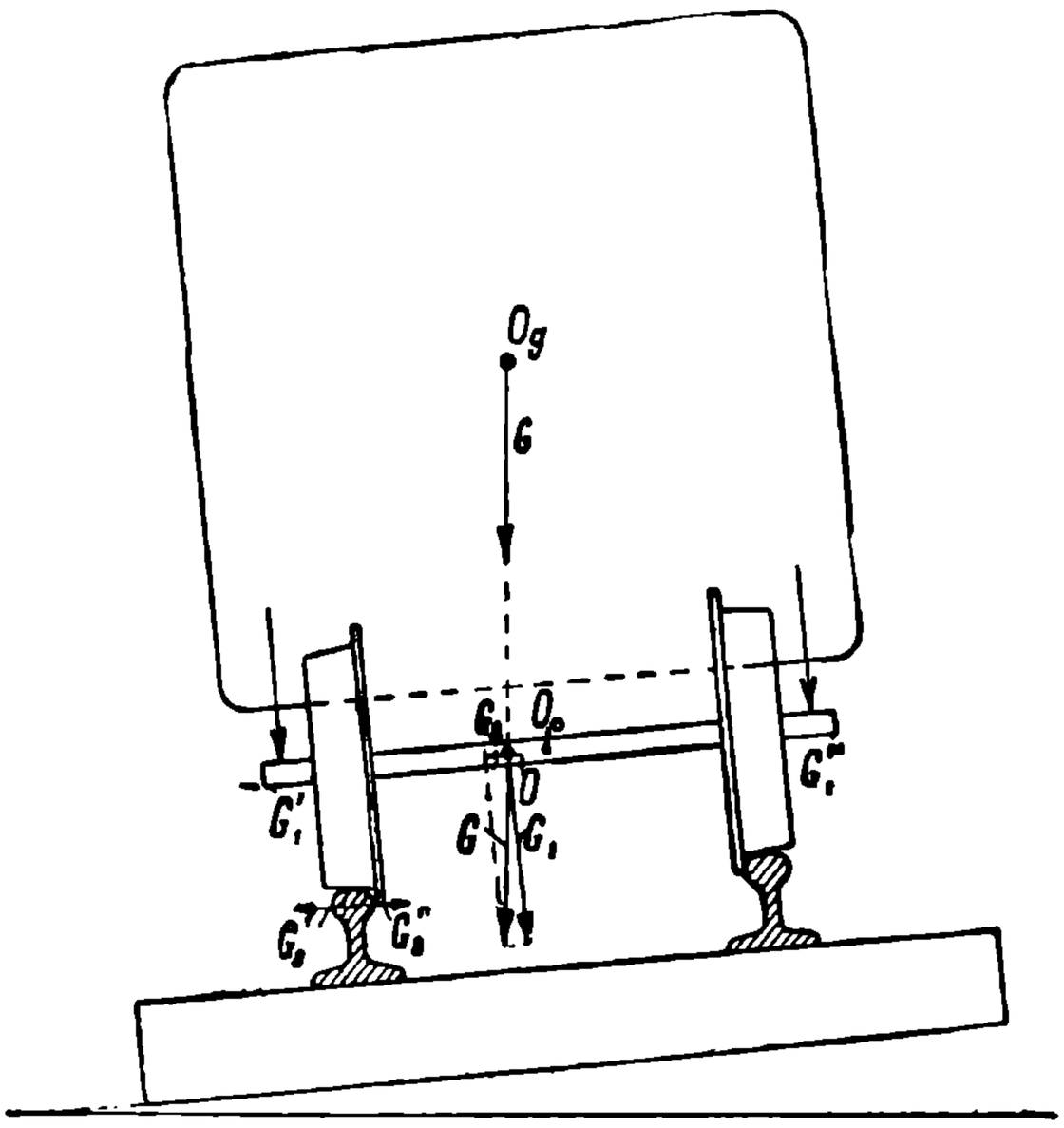


Рис. 380. Распределение весовых усилий в подвижном составе при различных уровнях положения рельсов.

в месте провала пути, стремясь их сорвать с костылей. На рис. 379 показано распределение сил, действующих под влиянием весовых воздействий подвижного состава на путь в том случае, если обе нитки рельсов находятся на одном уровне. В этом случае на рельсы действуют только вертикальные составляющие G' и G'', получающиеся путем разложения силы тяжести G. Никаких сил, стремящихся сорвать рельсы, здесь нет. Иная картина получается, если имеется провал одного из рельсов (рис. 380). Здесь получается сила G_2, действующая по оси полуската и стремящаяся прижать реборду бандажа к головке рельса. Если в их точке касания мысленно приложить две силы, равные G_2 и противоположные друг другу, то ясно видно, что эффект силы G_2 будет определяться силой G'_2, стремящейся сорвать рельс с костылей, и парой $G_2G''_2$, стремящейся опрокинуть подвижной состав около указанной точки касания. Сопротивляемости рельсов срыву с костылей в значительной степени содействует сила нажатия на рельс самого подвижного состава, в данном случае сила G'_1. Нетрудно видеть, что величина ее зависит от положения центра тяжести. Чем он выше, тем ближе точка O к опущенному колесу и тем больше составляющая G'_1. Отсюда следует, что повышение центра тяжести, помимо большей плавности, гарантирует и бóльшую безопасность движения.

Такое же значение имеет положение центра тяжести при движении поезда на кривых, где для борьбы с центробежными силами, как будет указано ниже, нормально применяется искусственное повышение наружного рельса.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

На рис. 381 показана картина распределения усилий при движении поезда на кривой. Через O_p здесь обозначена равнодействующая сил тяжести G и центробежной силы T. Если последняя относительно мала, то G_p проходит слева от центральной точки оси O_0. В этом случае будут справедливы все выводы, сделанные только что в отношении движения поезда на прямой с просадкой вниз одного рельса. Если же центробежная сила превысит определенную норму, то равнодействующая G_p будет проходить справа от точки O_0, что вызовет опрокидывающую пару G_2G_2'' и силу G_2', стремящуюся сорвать костыли внешнего рельса. Из схемы ясно видно, что при этом, по мере повышения центра тяжести, усилие G_1'', приходящееся на угрожаемый в отношении срыва рельс, будет расти, обеспечивая бо́льшую безопасность движения.

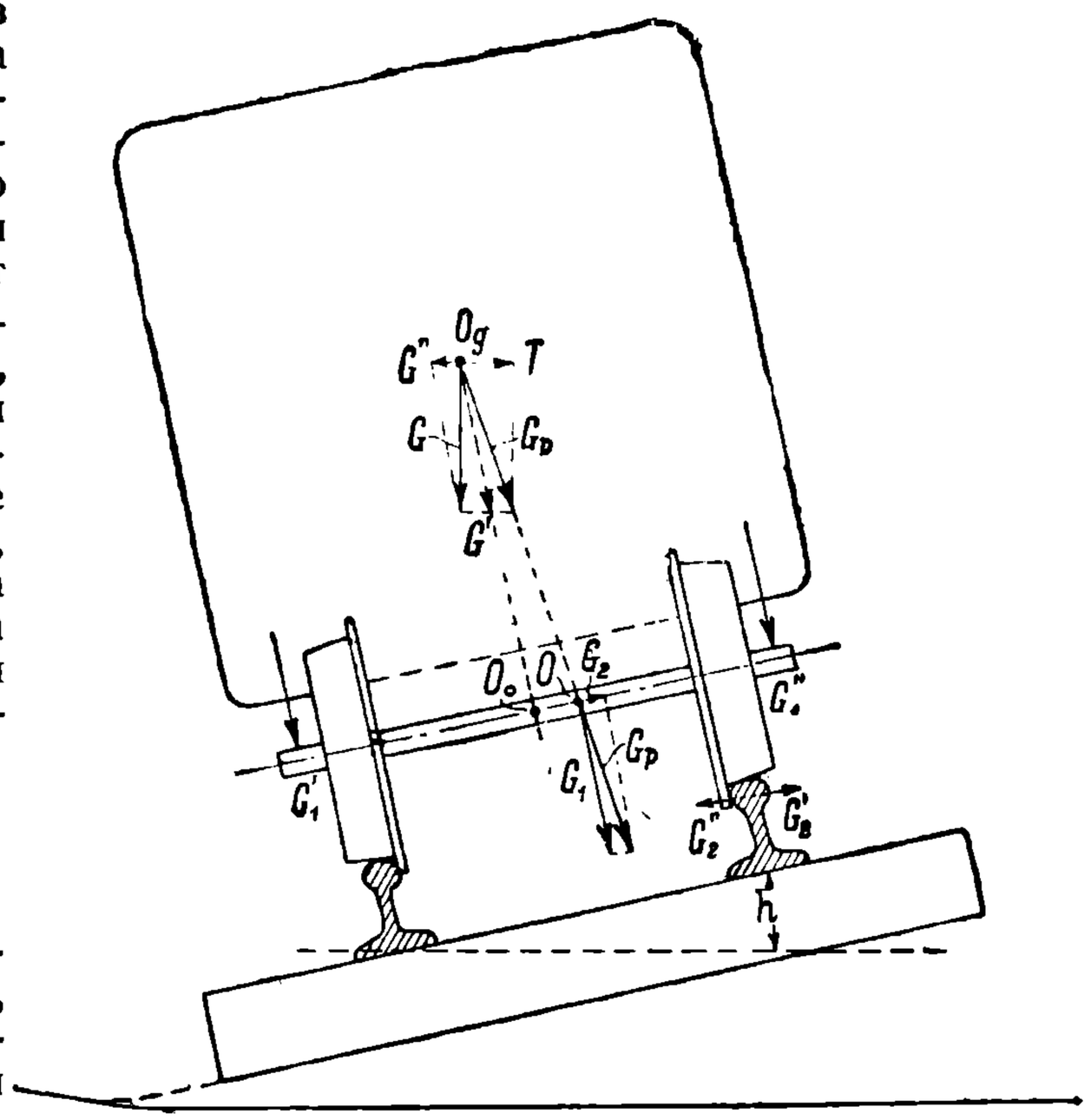


Рис. 381. Диаграмма усилий при движении подвижного состава на кривой.

4. Волнообразное движение поезда.

Кроме галопирования и боковой качки, как было отмечено, подвижной состав может совершать паразитные перемещения также и по отношению к вертикальной оси. Эти колебания выражаются в виде поперечных перемещений его по отношению к рельсовому пути. Возможность таких перемещений объясняется тем, что, из-за необходимости иметь допуски на неправильность насадки колес, ширину колеи a приходится делать несколько бо́льшею, чем расстояние между внутренними гранями реборд b (рис. 379). Вследствие этого возможны перемещения скатов, увлекающих за собою и главные массы подвижного состава от одной нитки рельсов к другой. По большей части такие перемещения обращаются в непрерывные, являясь причиной извилистости движения. При таких условиях направление движения теряет свою прямолинейность и начинает принимать волнообразный вид. Дать исчерпывающе точное изложение законов извилистого движения пока не представляется возможным ввиду большой сложности рассматриваемого процесса. Но несомненно прямая причина его лежит в том, что в каждый данный момент сила тяги, развиваемая двигателями F, и сила вредных сопротивлений движению ΣR не точно сдвинуты под углом в 180° (рис. 382). Результирующая этих сил и является причиной поперечных перемещений. Одною из главных причин появления силы S нужно считать неправильное положение бандажа по отношению к поверхности головки рельсов. Очень наглядную картину возникновения поперечных усилий могут дать конические бандажи (рис. 383). Из схемы видно, что при каждом наклонном положении полуската появляется сила G_2, стремящаяся переместить его поперек пути. Значение конических бандажей при движении на прямой, как известно, заключается в том, что в случае неправильного положения полуската по отношению к рельсам, коничность стремится поставить полускат в центральное положе-

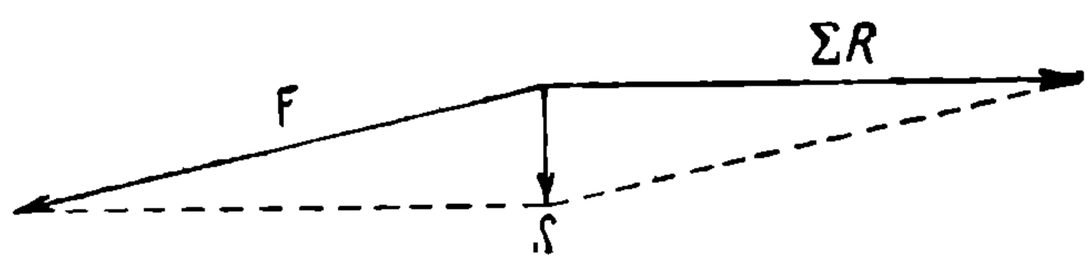


Рис. 382. Схема взаимодействия силы тяги и сопротивлений движению.

НТБ УГУНТ (ДИИТ)

ние, при котором $G_2 = 0$. При цилиндрических же бандажах сила G_2 отсутствует, и колеса долго могут занимать неправильное по жение, например, реборда может задевать за головку рельса. Как показывают опытные наблюдения, подтверждаемые теоретическими соображениями Raus'a и Carter a, извилистое движение может достигать большой интенсивности, получая в некоторых случаях нарастающий темп и приближаясь в этом случае к явлениям резонанса (Л. 10). В связи с этим возник даже специальный термин — прочность движения. Говорят, что движение прочно, если колебания имеют затухающий характер, и непрочно, если у них амплитуда нарастает.

Из числа причин, влияющих на характер извилистого движения, следует остановиться прежде всего на типе бандажей. Было уже указано, что в самой сущности конических бандажей кроется склонность к поперечным передвижениям. Стремление силы G_2 привести полускаты в центральное положение является в то же время источником появления извилистого движения. Если бы при поперечном передвижении под влиянием силы G_2 полускат в первой же стадии движения занял свое центральное положение, то этим колебание и было бы закончено. Однако, в силу инерции полускат сразу не останавливается в своем центральном положении. Он его проходит, и сейчас же после этого сила G_2 меняет свое направление, вовлекая полускат в обратное движение. Центральное положение снова проходится, и в результате возникает колебательный процесс. Анализ данного явления применительно к одному полускату, в предположении, что со стороны других полускатов не передаются через общую раму вынуждающие усилия, показывает, что при этом условии получается подобие синусоидального движения. Центр тяжести подвижного состава можно мыслить перемещающимся по синусоиде. Здесь полезно обратить внимание на некоторое расхождение во взглядах отдельных специалистов по поводу того, какой тип бандажей является более выгодным с точки зрения предотвращения или по крайней мере уменьшения эффекта волнообразного движения. В большинстве случаев господствует мнение, что более выгодны бандажи цилиндрические. Однако, последние работы по этому вопросу заставляют нас более осторожно относиться к такому заключению. Если учитывать взаимное влияние отдельных скатов друг на друга, то оказывается, что и при цилиндрических бандажах извилистое движение возможно. Больше того, с точки зрения прочности движения Carter находит более выгодными бандажи конические.

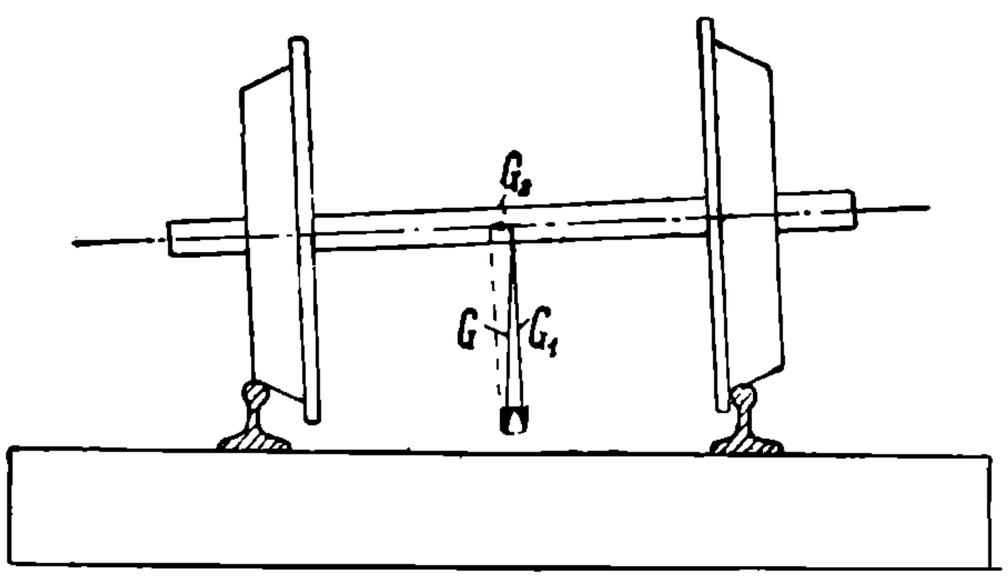


Рис. 383. Усилия, действующие на скаты при конических бандажах.

В реальных условиях извилистое движение может явиться источником сильных ударных эффектов колес по рельсовому пути, причем эти импульсы могут поддерживать поперечные колебания, ибо в моменты их изменяется направление силы G_2 (рис. 383). Интенсивность ударов растет с увеличением просвета между колесами и рельсами. Чем больше величина a по отношению к b (рис. 379), тем большие размахи совершает подвижной состав. На интенсивность ударов оказывает также влияние и сам подвижной состав. В случае плохой сборки, особенно в случае недопустимо большой игры осей полуската в подшипниках, удары могут особенно резко передаваться на отдельные части подвижного состава. Чем выше скорость движения, тем опаснее извилистое движение.

Ориентировочное представление о порядке горизонтальных усилий, испытываемых рельсами от извилистого движения, может дать приближенная формула Chaudi, приводимая в книге инженера Годыцкого-Цвирко. Инженер Chaudi допускает, что движение происходит по синусоиде с полуволной, равной приблизительно базе l данного подвижного состава (рис. 384); это во многих случаях довольно близко к действительности. Искомое усилие Chaudi определяет, как центробежную силу T, образующуюся от половины веса подвижного состава в месте соприкосновения колеса с рельсом, предполагая, что вторая половина веса вызывает такой же эффект по отношению к другому рельсу. При весе электровоза G_s и скорости v km/h сила T определится из выражения:

$$T = \frac{1}{2} \frac{G_s v^2}{9{,}81 \times 3{,}6^2 \rho} \qquad (391)$$

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Радиус кривизны синусоиды Chaudi приближенно определяется выражением:

$$\rho = \frac{l^2}{4(a-b)}.$$

При таком условии:

$$T = \frac{2G_э v^2 (a-b)}{9{,}81 \times 3{,}6^2 l^2}. \qquad (392)$$

Так, например, для электровоза при $G_э = 120$ t, $l = 8$ m, $a - b = 0{,}015$ m и $v = 65$ km/h:

$$T = \frac{2 \times 120 \times 65^2 \times 0{,}015}{9{,}81 \times 3{,}6^2 \times 8^2} \cong 1{,}86 \text{ t}.$$

При быстроходных локомотивах эти значения могут сильно возрасти, доходя до пяти и выше тонн. Важно обратить внимание на то, что согласно формуле (392) увеличение базы понижает T, а также величина просвета между ребордами и рельсами, как уже и отмечалось, ее увеличивает.

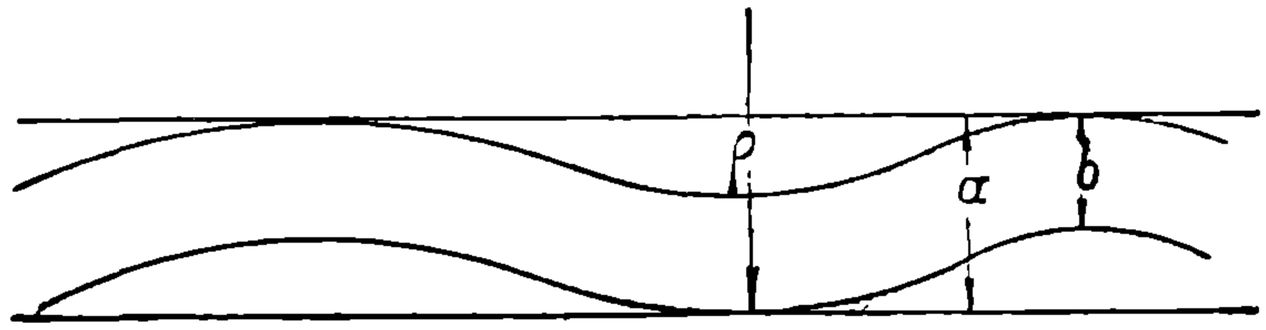


Рис. 384. Схема волнообразного движения поезда.

Разобранные типы паразитных колебаний дают возможность высказать ряд принципиальных положений в отношении желательной конструкции подвижного состава. Прежде всего, очевидна польза применения относительно мягких рессор. При них паразитные колебания и отдельные ударные эффекты в значительной мере теряют свою остроту. В отношении базы вопрос, как было выяснено, значительно сложнее. Имеются данные за и против ее удлинения. Довольно хорошим решением вопроса является применение надежных поворотных тележек. Тогда общая база между крайними шкворнями вагона или локомотива может быть значительна, и в то же время для так называемой жесткой базы, т. е. для расстояния между осями отдельных тележек, допустимы весьма небольшие размеры. Такая система дает большие преимущества при прохождении кривых. Однако, нужно иметь в виду, что при отдельных тележках с относительно небольшой их базой можно ждать усиление виляния подвижного состава; этим в значительной степени объясняется, почему в европейской практике быстроходные электровозы предпочитают выполнять без поворотных тележек. Большим достоинством для подвижного состава в настоящее время считают высокое положение его центра тяжести. В первое время организации железнодорожного движения из-за боязни понизить устойчивость подвижного состава держались противоположной точки зрения. Но теперь для смягчения воздействий на путь доказана выгодность его повышения, конечно, в тех пределах, которые допустимы с точки зрения устойчивого равновесия. Последнее будет соблюдено, если на рис. 381 G_p, равнодействующая всех сил, действующих на подвижной состав, будет пересекать оси полускатов между колесами, а не вне этой границы. Для электровозов высокое положение центра тяжести особенно важно, так как здесь приходится иметь дело с большими массами и, по большей части, с высокими скоростями. Кроме указанного, для плавности хода подвижного состава необходимо стремиться к полной уравновешенности масс инерции, к равномерному по возможности распределению веса между отдельными ведущими осями и, наконец, к точной центровке и правильной сборке отдельных его частей.

5. Особенности движения подвижного состава на кривых.

Основное и принципиальное осложнение при движении поезда на кривой происходит от того, что колеса одной и той же оси должны проходить различные пути. Колесо, идущее по внешнему рельсу, должно за один и тот же период времени пройти путь больший, чем колесо, идущее по внутреннему рельсу. При одинаковом диаметре бандажей нормальное движение колесной пары становится невозможным. Для того, чтобы внешнее колесо сделало путь больший, ему нужно сделать больше оборотов, а это конечно невозможно из-за жесткой связи обоих колес. Ввиду

НБ УДУНТ (ДІІТ)

этого движение колесной пары получает ненормальный характер. Колесная пара начинает одновременно с вращением проскальзывать по рельсам. При этом колесо внешнее скользит по направлению движения, а внутреннее — против него. В результате такого сложного движения колесу внешнему удается пройти больший путь, чем проходит внутреннее. Проскальзывание колес по рельсам, естественно, сопровождается сильным износом их бандажей и увеличением вредных сопротивлений движению. Для уменьшения этого эффекта в железнодорожной практике, как известно, широко применяются конические бандажи. При конической поверхности внешнее колесо на кривой стремится катиться по окружности большего радиуса, чем колесо внутреннее. Это дает возможность значительно понизить эффект проскальзывания колес. В трамвайной практике иногда применяют другой метод. Основывается он на применении принципа качения внешнего колеса на реборде по специальному рельсу с очень малой глубиной жолоба (рис. 385). Недостаток этого метода — в быстром износе реборды.

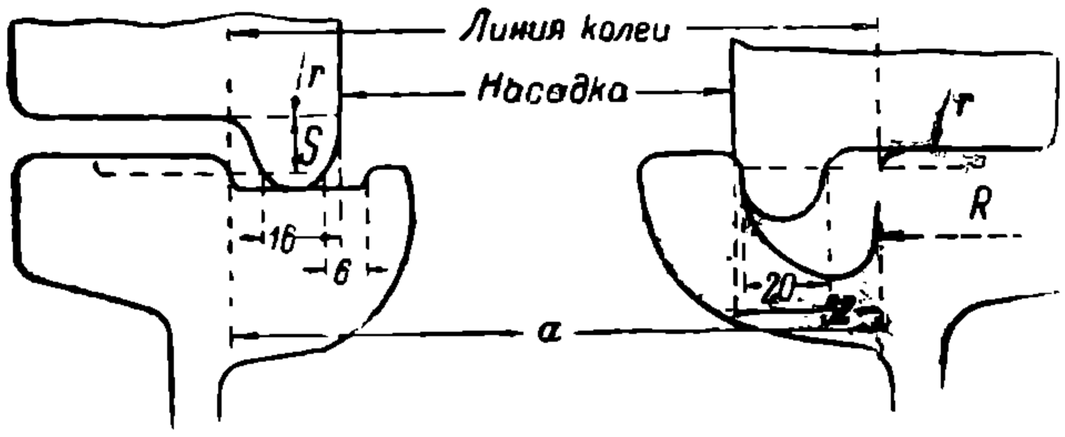


Рис. 385. Картина движения колеса на реборде.

Второе большое осложнение движения на кривой — получаемые поездом неизбежные удары. При движении на кривой подвижной состав совершает сложное движение. Одновременно с поступательным движением вперед он должен в каждый данный момент поворачиваться около некоторой мгновенной оси. Из теории устройства пути следует, что в случае применения окружности для кривой плавный проход по ней подвижного состава возможен только при условии равноускоренного движения. Осуществить его, конечно, практически не представляется возможным. Обычный метод решения вопроса о плавности движения на кривой состоит в том, что очертание кривой по окружности заменяется другими типами кривых. Теоретический анализ показывает, что если исходить из постоянства скорости на кривой, то плавное и безударное движение по ней возможно только в случае очертания ее по спирали или же, что несколько менее точно, по лемнискате или кубической параболе. В трамвайной практике часто встречается метод разбивки по спирали, в железнодорожном же деле, при кривых с относительно большими радиусами кривизны, часто предпочитают кубическую параболу, как несколько легче выполнимую. В большинстве случаев центральную часть кривой разбивают по окружности, а примыкающие к ней части выполняют в виде переходных кривых по одному из указанных типов.

При движении на кривой, как было отмечено, развиваются центробежные силы, стремящиеся выбросить подвижной состав на внешнюю часть кривой. Для понижения эффекта центробежной силы нормально практикуется повышение внешнего рельса по сравнению с внутренним. Из рис. 381 легко уяснить себе эту идею. Благодаря повышению уровня внешнего рельса над внутренним может быть получена сила G'', которая действует навстречу центробежной силе T. Величина повышения зависит от скорости движения. Для каждой скорости должно существовать соответствующее повышение. Последнее в зависимости от скорости v в km/h, от радиуса кривой R в m и от ширины колеи a в mm определяется формулой:

$$h = \frac{av^2}{127R} \text{ mm}. \qquad (393)$$

Формула эта легко выводится из условия равенства центробежной силы T и силы G'' (рис. 381) при определении их в функции от a, v, R и h. Применение этой формулы на практике затруднено тем, что скорости прохождения по кривой различных категорий поездов по большей части значительно отличаются друг от друга. Ввиду этого у одних поездов возможна недокомпенсация центробежной силы ($T > G''$), а у других — перекомпенсация ($T < G''$). В первом случае поезд будет оказывать давление на внешний рельс, а во втором на внутренний. Подъем внешнего рельса нормально не превышет 125 mm, за исключением подъездных путей, где он может доходить до 200 mm. На трамвайных путях очень часто повышение внешнего рельса не применяется.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

При движении поезда на кривой возникает еще одно очень интересное явление, основанное на жироскопическом эффекте. Явление жироскопа или, как говорят часто, волчка, основывается на необычном до известной степени соотношении сил действия и противодействия. Чаще всего примером, уясняющим жироскопический эффект, служит вращающееся колесо велосипеда. Если взять ось такого вращающегося колеса за подшипники в руки и начать поворачивать ее в горизонтальной плоскости, то руки будут ощущать стремление колеса вырваться из них в направлении вертикальной плоскости. Одна из рук будет ощущать силу, стремящуюся ее опустить, а вторая, наоборот, будет подвергаться силе, действующей вверх. Подобный же эффект получается при движении вращающихся масс подвижного состава на кривой. Если взять колесную пару, то при повороте ее оси на кривой одно из колес, внешнее, будет оказывать на рельс добавочное жироскопическое давление, а второе колесо будет на такое же усилие разгружать рельс. По вычислениям Marié (Л. 229) жироскопический эффект рассмотренного типа невелик. Даже для тяжелых локомотивных полускатов условия, нагружающие и разгружающие рельсы, не могут превышать 200—300 kg. При наличии тяговых двигателей особенно с тяжелыми роторами эти усилия могут значительно возрасти.

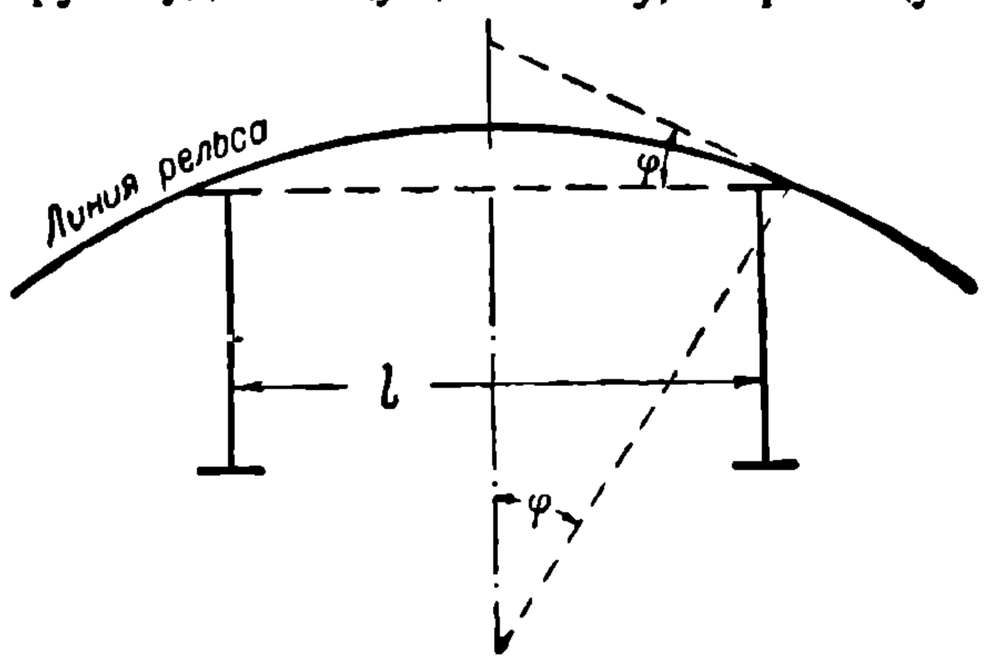


Рис. 386. Угол набегания колеса на рельс.

Но жироскопический эффект может проявляться и в другом виде. При движении на кривой с постепенным увеличением подъема внешнего рельса по отношению к внутреннему, ось получает некоторое перемещение в вертикальной плоскости. Жироскопическое явление здесь сказывается в горизонтальной плоскости. Проявляется оно в виде боковых усилий, действующих на рельс. Получается пара из сил, действующих на передние и задние колесные пары. В результате внешний рельс испытывает добавочное давление от одного из передних колес, а внутренний рельс — от заднего, находящегося на противоположной стороне. По данным Marié, эти усилия могут быть несколько больше разобранных выше. Однако, и они больших опасений не вызывают.

При изучении движения подвижного состава на кривых приходится уделять много внимания тем дополнительным усилиям, которые при этом появляются. Особенно среди них неприятны ударные эффекты. При переходе с прямого участка на кривую поворот поезда неизбежно сопровождается ударом по полускатам с дальнейшей его передачей на надрессорное строение. При переходных кривых ударные эффекты смягчаются, но и здесь они в большей или меньшей степени имеют место.

Очень большое значение при прохождении кривых имеет так называемый угол набегания колеса на рельс. На рис. 386 представлена схема положения двухосного вагона на кривой. Угол φ в данном случае и является углом набегания или, как часто его называют, ударным углом. Величина его на основании рис. 386 определяется выражением:

$$\sin\varphi = \frac{l}{2R}, \tag{394}$$

где l — длина базы вагона, а R — радиус кривой. Чем больше этот угол, тем большие ударные эффекты испытывает подвижной состав, идущий на кривой.

При анализе движения поезда на кривой приходится считаться с возможностью схода подвижного состава с рельсового пути по причинам, не зависящим от каких-либо катастрофических явлений, а являющихся следствием чрезмерного увеличения скорости на кривой. На рис. 387 приведена схема взаимодействия сил, имеющих место в точке соприкосновения реборды с рельсом. Нужно заметить, что считается выгодным строить поверхности головки рельсов и реборды по возможности соприкасающимися по узкой, а не по широкой поверхности. Благодаря этому уменьшается трение между рельсом и ребордой.

В рассматриваемой схеме имеются две основные силы: сила веса $G_к$, стремящаяся

НБ УДУНТ (ДІІТ)

мящаяся поднять колесо, передвигая его по поверхности головки. Таким образом, сила $G_к$ стремится предотвратить сход с рельсов, а сила N стремится его произвести. На рис. 387 линия ab — касательная в точке m, а me — нормаль.

На основании рис. 387 сила, действующая против движения реборды вверх, определяется равенством:

$$bm = G_к \sin\beta.$$

Составляющая N, производящая скатывания колеса с рельса:

$$km = N\cos\beta.$$

Кроме этой силы, передвижению вниз препятствуют силы трения, вызываемые усилиями, действующими по нормали, в данном случае силами ms и mt. При коэфициенте трения μ силы трения дадут составляющие: $G_к\mu\cos\beta$ и $N\mu\sin\beta$. При опускании колеса под действием силы $G_к\sin\beta$ нужно также учесть действие другого колеса данного полуската. Оно при этом будет скользить поверхностью бандажа по верхней поверхности головки рельса. При таком скольжении возникнет сила трения, равная $G'_к\mu$, где $G'_к$ — вертикальная нагрузка на это колесо, а μ' — коэфициент трения скольжения. Данная сила действия по теории Marié совместно с N, противодействует силе $G_к\sin\beta$, стремящейся предотвратить сход поезда с рельсов. Для обобщения вопроса для колес одной и той же оси взяты различные вертикальные нагрузки и коэфициенты трения.

Условие, при котором не следует бояться схода с рельсов, должно определяться выражением:

$$G_к\sin\beta > (N + G'_к\mu')\cos\beta + (N + G'_к\mu')\mu\sin\beta + G_к\mu\cos\beta.$$

После преобразования получается соотношение:

$$\frac{N}{G_к} \leqslant \frac{\operatorname{tg}\beta - \mu}{1 + \mu\operatorname{tg}\beta} - \frac{G'_к}{G_к}\mu'. \qquad (395)$$

Особенно приходится опасаться схода с рельсов при больших углах набегания φ. Это влечет за собою уменьшение угла β и повышение μ, что можно вывести из анализа соприкасающихся поверхностей рельсов и реборд.

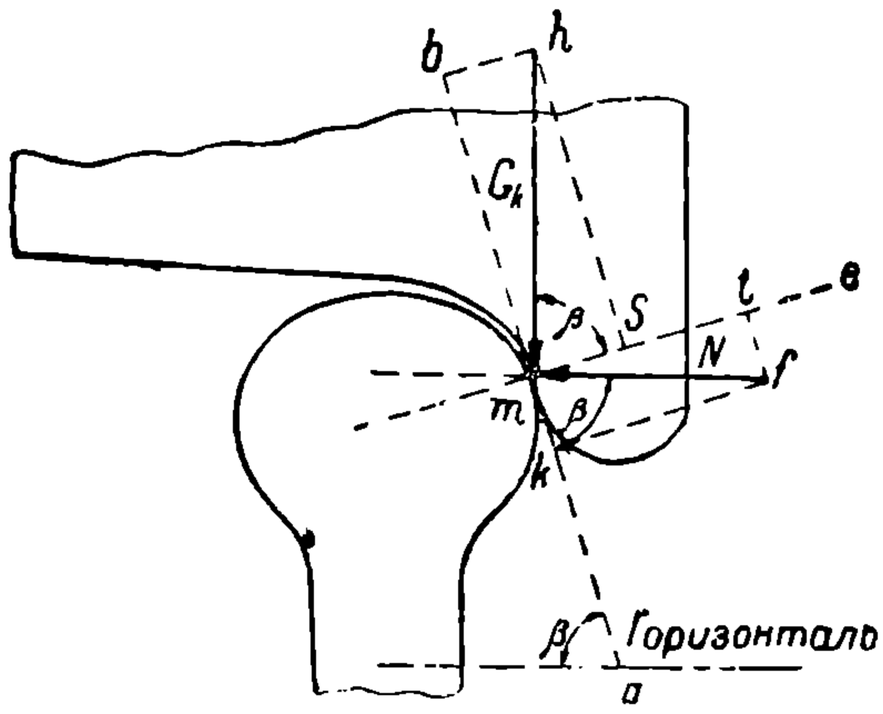


Рис. 387. Диаграмма усилий при прохождении колеса по кривой.

Нужно указать, что причиной схода может быть не только то колесо, которое набегает на рельс. Иногда сход с рельсов вызывается колесом, которое сбегает с него. Правда, такие случаи схода с рельсов бывают значительно реже. Объясняется это тем, что силы трения здесь противодействуют сходу. Формула для данного случая может быть получена из предыдущей просто путем замены знаков перед членами, содержащими μ и μ'. Заметим, что при расчете бокового усилия N необходимо учитывать, помимо центробежной силы, если внешний рельс повышен, горизонтальную составляющую силы от веса электровоза, а также и усилия, порождаемые жироскопическим эффектом. Величины коэфициентов трения, входящих в вышеприведенные формулы, чаще всего принимают равными 0,2 (Л. 229).

При изучении движения подвижного состава на кривой необходимо иметь в виду, что не всегда это движение можно осуществить. Прохождение по кривой достигается благодаря некоторой игре между ребордами колес и прилегающими к ним поверхностями рельсов. Если бы реборды вплотную касались головки рельсов, движение на кривых не было бы возможно. Нужно указать, что даже на прямых для предотвращения последствий неправильной насадки колес приходится делать небольшое уширение колеи против нормальной. На кривых же это уширение должно быть больше, возрастая по мере уменьшения радиуса кривой. На трамвайных путях при желобчатых рельсах, помимо уширения колеи, применяется специальное уширение желоба рельсов, в котором движется реборда.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Возможность прохода подвижного состава на кривых проверяется с помощью специальных методов геометрического вписывания подвижного состава в кривую. Из таких методов наибольшим распространением пользуется, как известно, метод инженера Roy. Этот метод одинаково приложим ко всякому подвижному составу, в частности, к паровозам и электровозам. Изложение его можно найти в ряде имеющихся руководств (Л. 228). На основании процесса вписывания выясняется вопрос о возможности применения той или другой базы подвижного состава. Очень часто из-за условий вписывания приходится при многоосных локомотивах сострогивать или даже иногда совсем снимать реборды у колес отдельных осей за исключением, конечно, передних и задних. Иногда некоторые промежуточные оси делают с поперечной игрой, облегчающей их прохождение по кривой.

II. ПЕРЕДАЧА ДВИЖЕНИЯ ОТ ВАЛА ДВИГАТЕЛЯ К ВЕДУЩЕЙ ОСИ.

1. Зубчатые передачи.

Системы зубчатых колес, применяемые в тяге. В современных конструкциях подвижного состава передача движения от вала двигателя к ведущей оси почти всегда осуществляется с помощью применения промежуточных передаточных механизмов. Непосредственная насадка двигателей на оси по причине конструктивной, а также, как будет объяснено в дальнейшем, по экономическим соображениям в настоящее время применяется только в единичных случаях. Существующие передаточные механизмы можно разбить на три основные категории: зубчатые, рычажные и зубчато-рычажные. Первый тип представляет собою индивидуальную передачу, при которой на каждую отдельную ось работает свой собственный двигатель или, в некоторых случаях, два двигателя. Две вторые передачи принадлежат к числу групповых приводов, у которых один двигатель или группа двигателей одним общим механизмом приводят в движение по несколько осей.

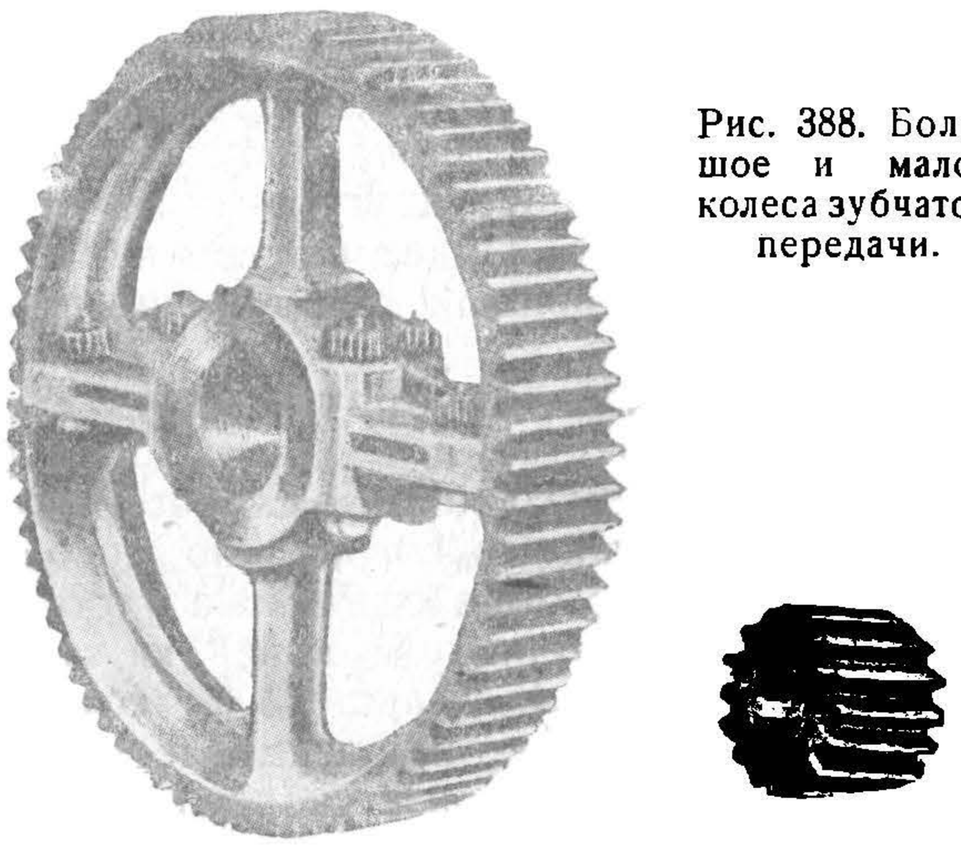


Рис. 388. Большое и малое колеса зубчатой передачи.

Особенно большим распространением в настоящее время пользуются зубчатые передачи (рис. 388). В эксплоатационных условиях железнодорожного дела движения поездов зубчатым колесам приходится работать в очень тяжелых условиях. Помимо того, что они передают большие усилия и воспринимают всякого рода жесткие ударные эффекты, тяговые зубчатые передачи очень часто не могут быть достаточно точно центрированы в отношении расстояния между центрами большого и малого колеса. Из отдельных типов зубчатых колес наиболее пригодными для тяги следует считать колеса с эвольвентным зацеплением. Последние, как известно, обеспечивают правильную работу при достаточно значительном вариировании указанного расстояния, и, кроме того, при прочих равных условиях они имеют более мощный корень, что очень важно в случае передачи больших усилий. При выполнении зубцов по эвольвенте угол зацепления по большей части берется около 75°, в Европе 75°, в Америке 75°30.

При конструировании зубчатых передач, особенно с большим передаточным числом, задача значительно осложнена в отношении малого колеса, называемого в практике шестерней. В связи с малым диаметром начальной окружности корни зубцов у шестерни часто получаются недостаточно мощными. Весьма также осложняют работу зубчатых колес процессы, вызываемые трением зубцов. Как известно, потери в зубчатых передачах составляются из потерь на трение качения и на трение скольжения. Вся техника современного производства зубчатых колес направлена к тому, чтобы по возможности уменьшить последние. Они являются главной причиной снижения коэфициента полезного действия передач и быстрой сра-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ботки их зубчатых профилей. Тою же самой причиной в значительной степени объясняется шум, производимый зубчатыми зацеплениями.

Значительно улучшен процесс работы зубчатых колес, выполняемых по методам немецкого инженера Lasche. Сущность этого зацепления, известного под именем зацепления AEG, заключается в том, что профиль зубцов делается несимметричным, причем у шестерни подрезается корень, а у большого колеса срезается головка. Это дает возможность, во-первых, усилить опасное сечение корня шестерни, а во-вторых, сильно понижает потери на трение скольжения, которое, главным образом, имеет место на путях соприкосновения подрезаемых частей. Пример соотношений главнейших размеров зацепления AEG в зависимости от модуля M приведен в табл. 61.

ТАБЛИЦА 61.

Параметры зубчатой передачи в зависимости от модуля

Части зубцов	Большое колесо	Шестерня
Полная высота зубцов	2,2M	2,2M
Высота головок	0,5M	1,5M
Высота корней	1,7M	0,7M

Наблюдение над работой зубчатых передач обнаруживает, что долговечность их и бесшумность их работы очень сильно зависят от степени точности обработки профилей. В этом отношении современная техника достигла очень больших результатов, доводя до высокой точности обработку. Срок службы, а также и шум при работе в большой зависимости находятся от степени и вида сработки профилей. Опыт показывает, что пока профили зубцов большого и малого колес срабатываются равномерно, работа получается удовлетворительной. Но достаточно, чтобы один профиль раньше другого потерял свое правильное очертание, как сработка обоих в дальнейшем идет быстро нарастающим темпом. Чем сильней и неправильней сработаны профили, тем больше шума дает передача и тем скорее приходит она в негодность.

Одною из основных причин неравномерной сработки зубцов является более тяжелая работа шестерни, зубцы которой работают в передаточное число раз чаще, чем зубцы большого колеса. Естественно, что при одинаковой прочности материала малое колесо неизбежно должно срабатываться гораздо скорее. Для того, чтобы степень сработки была одинакова у обоих колес, в нормальных передачах для шестерни берут материалом кованую сталь Сименс-Мартена с разрывным усилием 60—80 kg/mm², а для большого колеса литую сталь с 50—60 kg/mm². Однако, такие колеса работают все-таки неудовлетворительно. Шестерни выходят из строя в два раза, а иногда в три раза скорее больших колес. Широко ставила опыты для достижения по возможности равномерной сработки колес фирма GEC, и особенно многого достигла в этом деле швейцарская фирма Maag. Помимо очень тщательного выполнения профилей, Maag очень много работала над подбором материалов и их обработкой. Опыты показали, что весьма целесообразно применять закалку и шлифовку зубцев. Общее представление о влиянии обработки материалов может дать приводимая этой фирмой табл. 62.

ТАБЛИЦА 62.

Пробег зубчатых колес в зависимости от их материала и обработки.

Обработка материалов колес	Пробег колес в km
Шестерня не закалена	75 000
Большое колесо не закалено	150 000
Шестерня закалена	120 000
Большое колесо закалено	120 000
Шестерня закалена и шлифована	400 000
Колесо закалено без шлифовки	400 000

Хотя к приведенным в таблице данным нужно относиться с некоторой осмотрительностью, так как они, повидимому, получены при особо благоприятных условиях испытаний и часто на практике далеко не выдерживаются, тем не менее они весьма показательны, свидетельствуя о чрезвычайно большом значении шлифовки. Следует указать, что в последнее время начинает получать большое применение для шестерен хромо-никелевая сталь, преимущества которой — в очень большой прочности и стойкости в работе.

При обработке материала зубчатых колес следует стремиться к прочности поверхностей зубцов. Это неизбежно предполагает увеличение твердости материала. Однако, чрезмерное увеличение ее нежелательно. Ввиду сильных ударных эффектов, получаемых колесами от полускатов, материал должен хорошо сопротивляться ударам, а для этого он должен быть достаточно вязким. Очень хорошим решением

НБ УДУНТ (ДІІТ)

вопроса является такая обработка, при которой внешняя поверхность зубцов обладает большой твердостью, а внутренняя — большой вязкостью. Примером могут служить данные, приводимые Sachs'ом. Для хромо-никелевых шестерен на поверхности, толщина которой берется около 0,8—1,5 mm, можно иметь материал прочностью около 200 kg/mm², в то время как главное тело их имеет прочность всего 90—120 kg/mm², при удлинении в 7—9%. Для больших колес при особо высокосортной кремнисто-марганцовой стали прочность часто доводят, даже без указанной поверхностной обработки, до 70—80 kg/mm² при очень больших удлинениях, доходящих до 16—18%. Соответственно для шестерен достигается прочность в 80—90 kg/mm² при удлинении в 15%. Представление о том, какое усилие достижимо передавать через зубчатые колеса, можно заключить из того, что усилие на каждый миллиметр длины зубца в настоящее время доводится до 70 kg. В отношении ширины зубцов рекомендуется не превосходить размеров, определяемых в 300—350 mm. В случае превышения этих норм осложняется обработка зубцов и становится неравномерной их сработки. Окружная скорость, очень важная величина при расчете колес, доводится теперь до 22—27 m/sec. При расчете зубчатых колес важнейшей расчетной величиной является модуль зацепления. Табл. 63 дает представление о величинах, которые для них берутся на практике.

ТАБЛИЦА 63.

Значение модулей зубчатых колес.

Тип двигателя	Мощность в kW_h	Скорость об/мин	Моменты при часовом режиме	Модуль
П. Т. 35. Завод Электросила	35	680	52	6
Д. М. 1 а. Завод им. Кирова	50	650	75	8
П. Т. 100. Завод Электросила	113	570	193	10
D. K. 80. Южно-французских ж. д.	277	545	495	12
Дорога Ch. M. St. P. R. Завод GEC	354	446	770	16
Германские ж. д. Завод AEG	2 × 220	875	2 × 220	14
Германские ж. д. Заводы WASSEG	435	900	473	12

В конструктивном отношении современные зубчатые колеса выполняются в виде разъемных или цельных (рис. 388 и 389). Для маломощных двигателей преимущественно применяются первые, для мощных же — вторые. Некоторые затруднения при насадке последних компенсируются прочностью и лучшей центровкой.

Значительным распространением в последнее время начинают пользоваться колеса с шевронными зубцами, типа винтового зацепления. Фирма Вестингауз, особенно широко применяющая этот тип зацепления, берет для него угол зацепления около 82,5°. Относительно степени скоса зубцов можно привести данные фирмы AEG, определяющей его в 7—12°. Преимущество винтообразных зацеплений — в непрерывности зацепления и в более плавном переходе от работы каждого предыдущего зубца к работе каждого последующего. Наблюдения показывают, что при шевронных зубцах ударные эффекты менее интенсивны и, что особенно важно, при них получается значительно меньше шума. Неудобство их — в уменьшении продольной игры якоря, вследствие чего сработка коллектора может быть неравномерной

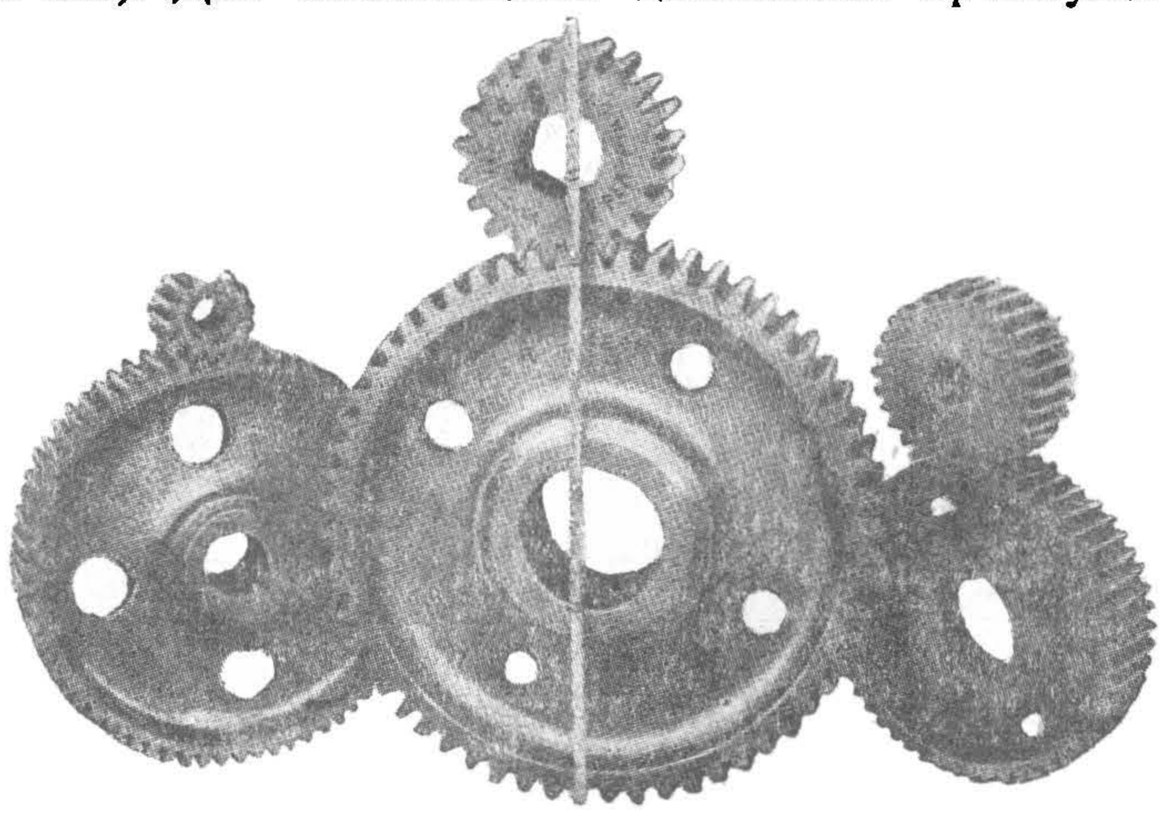


Рис. 389. Типы зубчатых колес неразъемного типа.

НТБ УГЛУНТ (ДІІТ)

с резко выраженными канавками для щеток. Следует отметить, что на электровозах делались попытки применить передачи с угловым зацеплением. Однако, большого успеха такое начинание не имело, так как эти колеса относительно дороги, и, повидимому, коллектор срабатывается при них особенно неравномерно.



Рис. 390. Зубчатое колесо со спиральными пружинами.

При реальных условиях работы зубчатым колесам приходится воспринимать в большинстве случаев очень сильные ударные эффекты. В случае жестких систем эти удары с полной силой передаются на якоря и роторы двигателей. Для улучше-

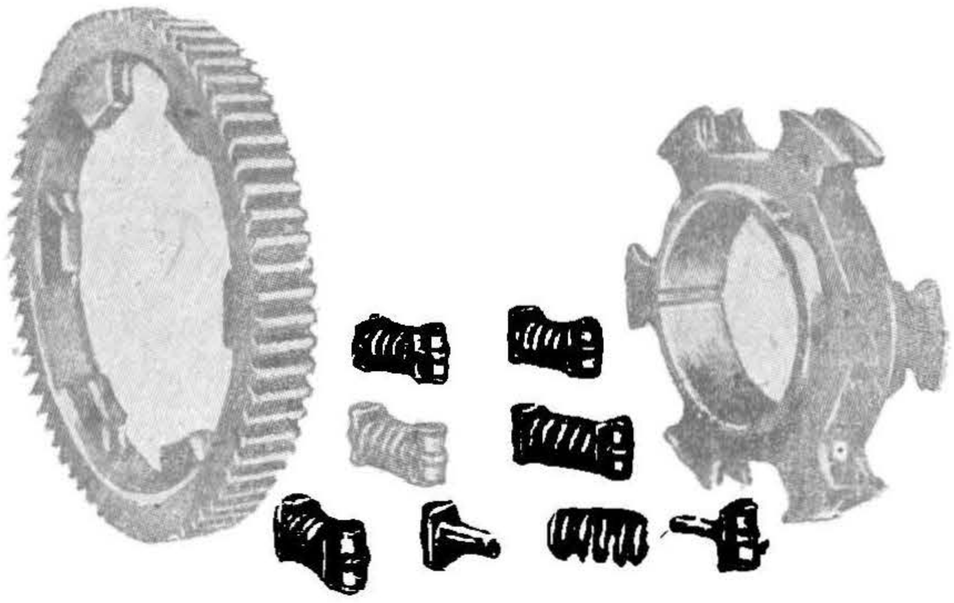


Рис. 391. Детали пружинного зубчатого колеса.

ния действия зубчатых передач в настоящее время широко практикуется применение пружинных колес (рис. 390, 391 и 392). Сущность их устройства заключается в том, что втулка со спицами соединяется с зубчатым венцом посредством промежуточных пружин. Следует указать, что в радиальном направлении подобные колеса особого смягчения ударов не дают. Демпфирующее действие пружины производят преимущественно в направлении касательном. Ввиду этого главное значение их — в смягчении жесткости взаимодействия между ротором и ведущими осями при передаче тангенциальных усилий. Опыт показывает, что при пружинных колесах сработка зубцов идет менее интенсивно. Особенно большое значение пружинные колеса имеют при однофазных коллекторных двигателях; тогда они в очень сильной степени содействуют сглаживанию пульсирующего момента, присущего этому типу машин. Пружинные колеса имеют также существенное значение при трогании поезда с места, так как оно при них происходит более плавно и незаметно для пассажиров.

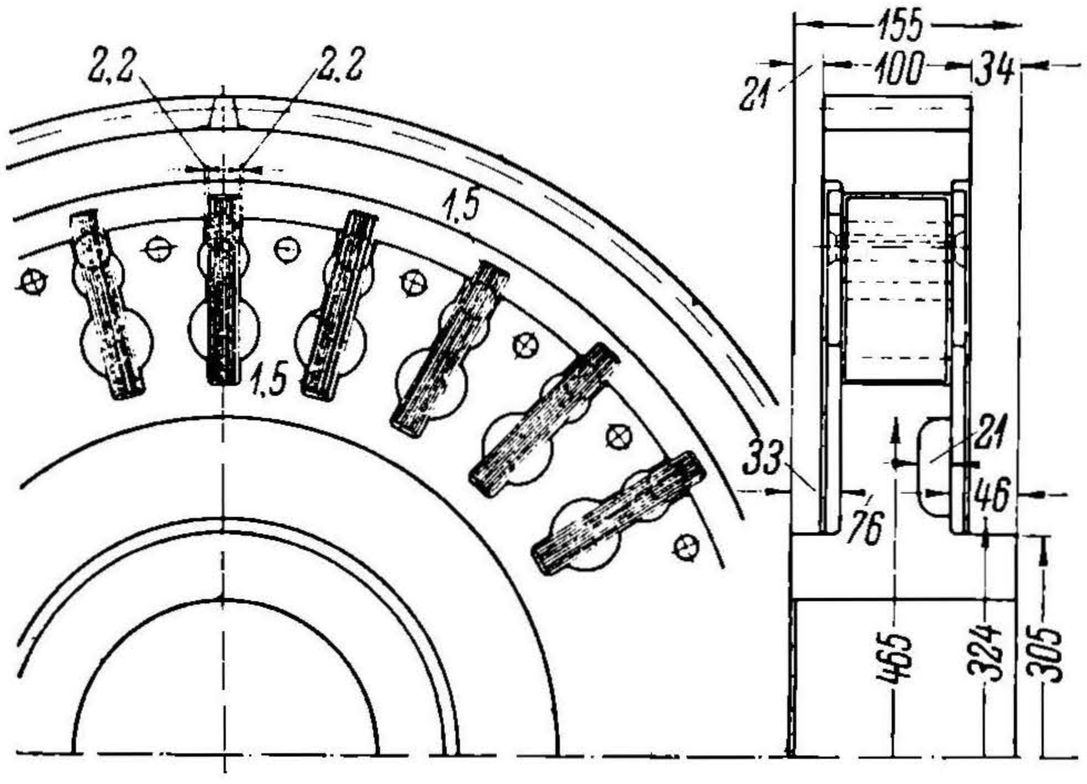


Рис. 392. Пружинное зубчатое колесо с плоскими пружинами.

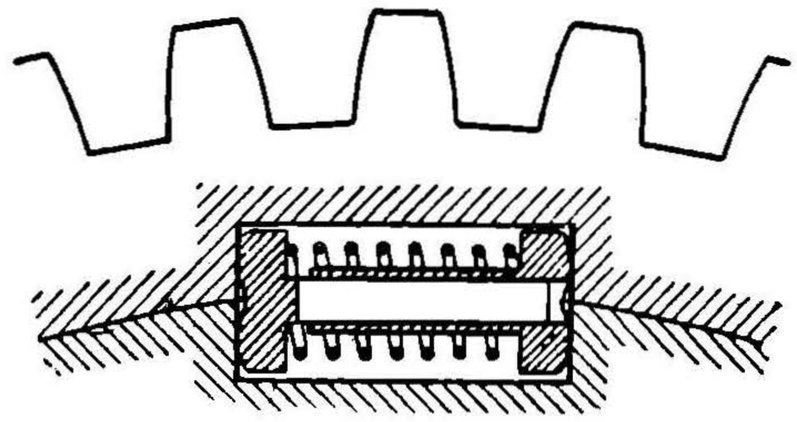


Рис. 393. Пружинная шестерня.

Вместо пружинных колес очень часто применяют пружинные шестерни (рис. 393). Особенно они желательны при сдвоенных двигателях, так как в этом случае, помимо пружинного звена между осью и роторами, появляется такое же звено между обоими роторами. При работе зубчатых передач со спиральными пружинами, имеющими, как уже отмечалось, малый коэфициент успокоительного трения, часто замечается паразитная вибрация зубцов. Для успокоения этих колебаний нередко практикуется применение особых демпферов (рис. 394). Идея их заключается в том, что наряду

НВ УВУНТ (ДІІТ)

с основными спиральными пружинами (рис. 393) в определенных местах периферии соприкосновения обода и втулки шестерни располагаются два ряда пластин e и e_1, причем пластины e плотно связаны с ободом, а пластины e_1 — со втулкой. При взаимном перемещении обода и втулки пластины, передвигаясь вместе с ними, развивают сильное промежуточное трение, что и является причиной успокоения. Регулировка успокоения может производиться натяжением винта i. При нормальных условиях работы достаточно в шестернях ставить спиральные пружины только в двух местах периферии, а демпфер — в одном.

Зубчатые передачи в большинстве случаев выполняются в виде односторонних систем, причем шестерня нормально насаживается на стороне, противоположной коллектору. Однако, при больших мощностях односторонние передачи очень часто оказываются недостаточно удовлетворительными и заменяются двухсторонними. Двухсторонняя зубчатая передача имеет существенные преимущества перед односторонней. При ней получаются на каждом зубчатом колесе меньшие крутящие моменты, следовательно, и меньшие размеры валов двигателей, более короткие якорные подшипники, параллельное положение сопрягаемых осей, меньшая длина отдельных зубцов и, как следствие этого, более равномерная их сработка по длине.

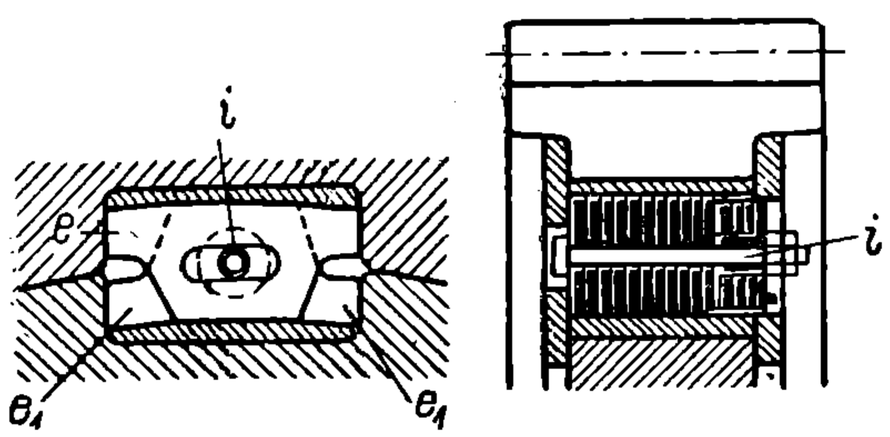


Рис. 394. Схема демпфера в пружинной шестерне.

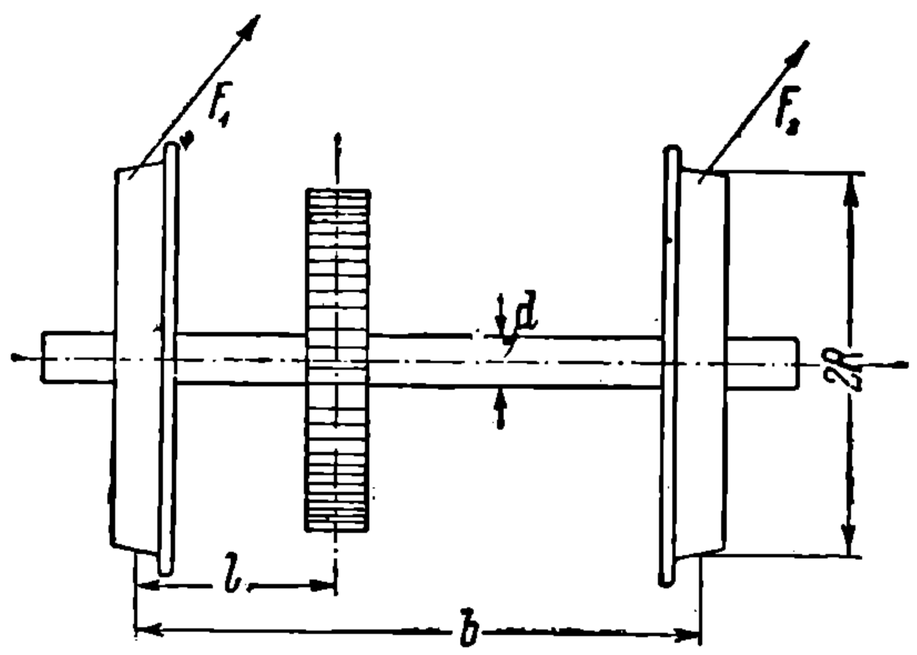


Рис. 395. Схема усилий на ободе колес при несимметричном положении зубчатого колеса.

Кроме того, при односторонней передаче, когда колеса сидят не посредине оси, сила тяги неправильно распределяется между обоими колесами ведущей оси (рис. 395).

Вращающий момент, развиваемый двигателем, передается на колеса путем деформации скручивания оси. Получаемые при этом сдвиги материала, отнесенные к ободам ведущих колес, при модуле касательной упругости G, могут быть выражены формулами:

$$\left.\begin{aligned} \Delta S_1 &= \frac{32F_1R^2l}{\pi Gd^4} \\ \Delta S_2 &= \frac{32F_2R^2(b-l)}{\pi Gd^4} \end{aligned}\right\}. \qquad (396)$$

Так как по условиям движения для обоих колес сдвиги должны быть равны ($\Delta S_1 = \Delta S_2$), то, очевидно, при различных плечах l и $(b-l)$ это должно вызывать различные силы тяги F_1 и F_2. На меньшей длине кручения получается большая F и наоборот. Вследствие этого сила тяги, соответствующая колесу с меньшим расстоянием от передачи, может превзойти силу сцепления, а тогда это колесо начнет скользить, что должно отразиться и на другом колесе. В результате получится колебательный процесс скольжения и качения, захватывающий оба колеса. Точно этот процесс пока не изучен, но, несомненно, он вызывает некоторое понижение общей силы сцепления и является источником добавочных потерь.

В силу указанных конструктивных и тяговых преимуществ, при мощностях выше 250—300 kW на практике применяются, как общее правило, двухсторонние зубчатые передачи, за исключением только специальных случаев, где этому препятствует недостаток места.

Зубчатая передача с осевой подвеской двигателя. Зубчатые передачи с осевой подвеской впервые начали применяться на трамвайных вагонах, и потому до настоящего времени этот тип подвески очень часто называется трамвайным, хотя теперь он имеет применение не только во всех моторных вагонах как трамвайных, так и железнодорожных, но и в большом числе электровозов. На рис. 7

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

приведена схема передачи по указанной системе. Как видно, двигатель здесь с одной стороны, жестко, с помощью специальных осевых подшипников, опирается на ось подвижного состава, а с другой стороны, посредством промежуточных пружин крепится к раме. Последнее крепление осуществляется с помощью двухсторонней траверзы, как показано на рис. 7. Иначе двигатель может подвешиваться за специальный кронштейн или, как говорят, за носик, представляющий одно целое с кожухом (рис. 6).

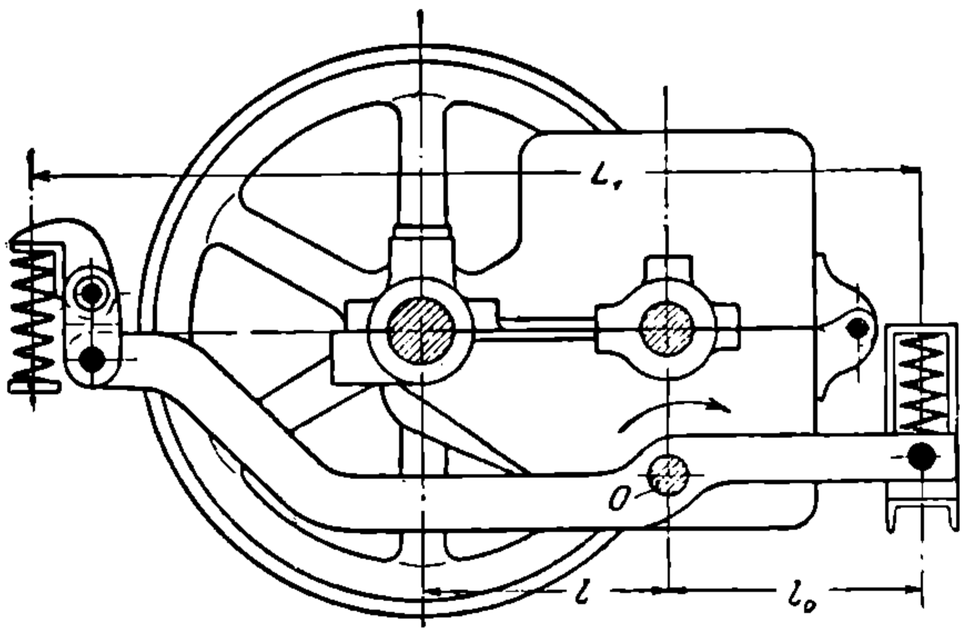


Рис. 396. Подвеска двигателя по линии центра тяжести.

Большими преимуществами осевой подвески являются ее простота и компактность. Двигатели располагаются под кузовом, освобождая в нем место для пассажиров в случае вагонов и для размещения оборудования в случае электровозов. Недостатком этого типа передачи является относительно низкое положение центра тяжести локомотива. Еще бóльшим недостатком является увеличение неподрессоренного веса подвижного состава, так как часть веса двигателя жестко передается на оси.

В целях ослабления неподрессоренного веса одно время стали довольно широко применять подвеску по линии центра тяжести двигателя (рис. 396). На первый взгляд эта подвеска может показаться выгодней нормальной двухсторонней. При ней, несомненно, получается значительная статическая разгрузка оси подвижного состава. Однако, с динамической точки зрения, с точки зрения ударных эффектов, производимых колесами на путь и передаваемых на двигатель, эта система оказалась мало рациональной. Уже в 1909 году Brecht аналитически это доказал (Л. 339). То же самое можно заключить и из работ Carter'a (Л. 10).

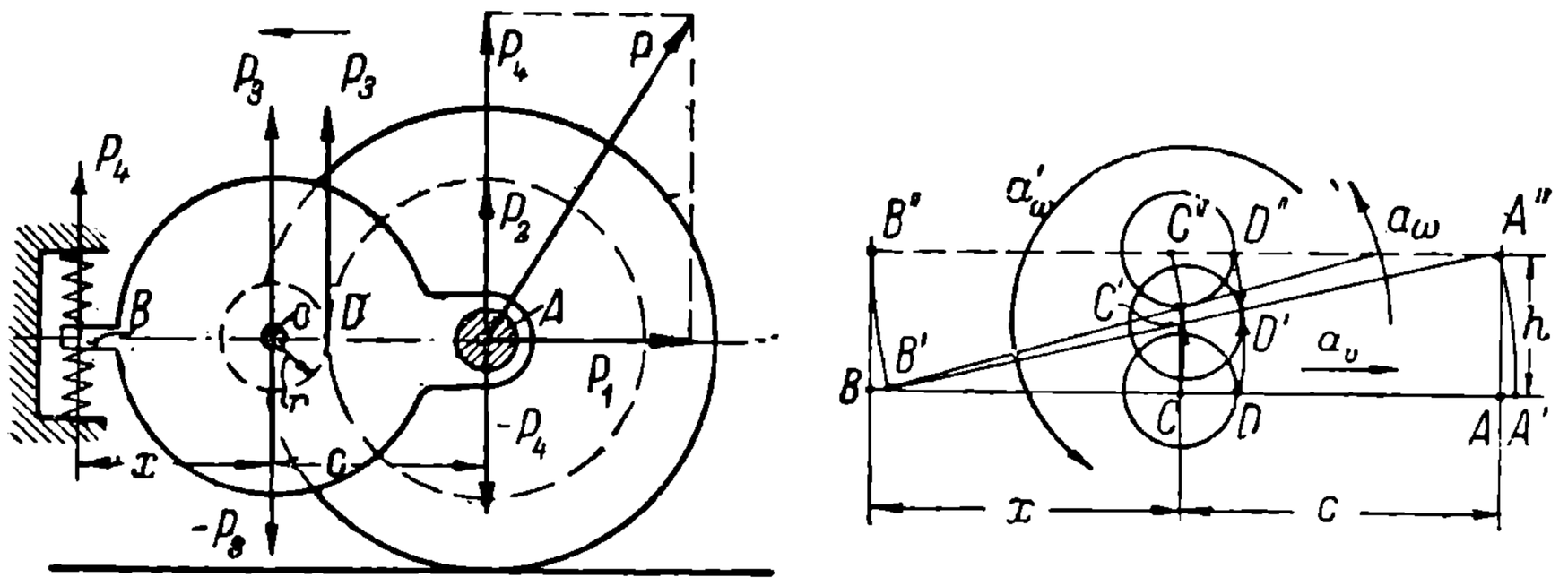


Рис. 397. Диаграмма сил, действующих при ударе полуската по рельсу.

Очень интересную работу по исследованию осевой подвески с точки зрения ударных эффектов исполнил Latersner (Л. 240). Он задался целью изучить, какое влияние на ударные эффекты при осевой подвеске оказывает положение точки подвеса *B*, и в частности как ведет себя подвеска по линии центра тяжести (рис. 397). Удар предполагался им происходящим от выступающей кромки звена рельса в месте стыка, о чем уже было упомянуто при рассмотрении паразитных колебаний. При анализе работы Latersner'a нужно будеть иметь в виду следующие обозначения:

M — масса всего двигателя,
I — момент инерции всего двигателя по отношению к точке B,
$M_я$ — масса одного только якоря двигателя,
$I_я$ — момент инерции якоря относительно оси его вала,
h — высота выступа рельса, на который наскакивает колесо.

Действие удара, получаемого полускатом от рельсового пути, Latersner разбивает на три основных эффекта (рис. 397). Прежде всего, благодаря удару оси подвижного состава о тело вкладышей осевых подшипников, вся масса двигателя может

НБ УИУНТ (ДІІТ)

получить поступательное перемещение с некоторым ускорением a_v, в силу которого точка B соответственно переместится в положение B'. Одновременно с этим вся масса двигателя получит поворот с некоторым ускорением a_ω около точек $B-B$. В результате точка A примет положение A''. Третий эффект удара вызывается наличием зубчатого зацепления. При подпрыгивании кверху вместе с осью, зубец большого зубчатого колеса ударяет по зубцу шестерни и увлекает ее за собою. Так как точки A, принадлежащая оси, и B, принадлежащая кожуху двигателя, в общем случае совершают различное движение, то место соприкосновения зубцов, определяемое на рисунке точкой D, должно по отношению к их профилям менять свое положение. Но раз профиля зубцов начинают перемещаться по отношению друг к другу, то это, естественно, должно сопровождаться соответствующим поворотом ротора относительно его оси. При завершении ударного движения точка D, благодаря жесткой связи зубчатого колеса с осью и подъему всех его частей на ту же высоту, что и A, должна занять положение D''. Под действием зубцов большого колеса центр вала ротора в результате должен занять положение C'', причем точка B' под влиянием того же большого колеса, преодолевая действие пружин, переместится в точку B''.

При выяснении влияния ротора на ударный эффект необходимо уяснить себе величину того ускорения a'_ω, которое он получает под действием большого колеса в точках зацепления. Из разобранного процесса вытекает, что путь DD'', проделанный точкой соприкосновения шестерни и большого зубчатого колеса, частично произведен ударным эффектом, связанным с движением точки A и частично вызван действием большого колеса на шестерню. Нетрудно видеть, что первая составляющая пути может быть определена отрезком DD', а вторая — $D'D''$, причем путь DD' был бы пройден независимо от того, имеется зубчатое зацепление или его нет. Обозначив время ударного движения через Δt, можно написать следующие соотношения:

$$DD'' = 0{,}5\, a_\omega \Delta t^2,$$

$$D'D'' = 0{,}5\, a'_\omega \Delta t^2$$

или

$$a'_\omega = a_\omega \frac{DD'' - DD'}{DD''},$$

откуда, переходя от дуг к их радиусам:

$$a'_\omega = a_\omega \frac{x + c - x - r}{x + c} = a_\omega \frac{c - r}{c + x}. \qquad (397)$$

По установлении ударных ускорений, получаемых отдельными частями двигателя, можно определить ту представляющую наибольший интерес силу, которая вызывается ударом в точке A. Данная сила характеризует собою, с одной стороны, ударный эффект, который передается на кожух двигателя, а с другой стороны, и тот эффект, который воспринимается рельсовым путем. Первая составляющая, производимая ударом, как было уже отмечено, вызывает сдвиг всего двигателя в направлении подвеса AB. Величина ее может быть определена выражением:

$$P_1 = Ma_v. \qquad (398)$$

Вторая составляющая P_2, производящая поворот двигателя около точки подвеса и направленная перпендикулярно к первой, может быть установлена, при отнесении массы двигателя в точку A и при выражении радиуса инерции через $x + c$, по значению производимого ею тангенциального ускорения a_ω:

$$P_2 = \frac{Ia_\omega}{(x + c)^2}. \qquad (399)$$

Сложнее обстоит дело с третьей составляющей, вызываемой ударом зубцов. Для установления ее нужно исходить из силы, получаемой на зубцах при ударе и определяемой выражением:

$$P_3 = \frac{I_я a'_\omega}{r^2}.$$

Путем приложения к валу двигателя двух равных и противоположных сил P_3 и $-P_3$ можно свести эффект полученной силы к паре $-P_3 P_3$, поворачивающей ротор, и силе P_3, производящей удар на кожух двигателя. Момент, создаваемый силой P_3 относительно точки A и стремящийся повернуть около нее весь двигатель, должен

РНБ УГУНТ (ДІІТ)

уравновеситься моментом на плече всего подвеса AB с получением в точке подвеса B силы P_4, вызывающей соответствующую деформацию в пружине подвеса:

$$P_4 = \frac{P_3 c}{c + x}. \tag{400}$$

Действие силы P_4 можно выяснить путем приложения в точке A двух равных и противоположных сил P_4 и $-P_4$. Силы P_4 и $-P_4$ образуют пару, поворачивающую двигатель около оси вала, а P_4 дает искомую составляющую удара в точке A, получаемого вследствие наличия зубчатой передачи.

Таким образом, полная сила удара, получаемого двигателем в точке A, может быть установлена по формуле:

$$P = \sqrt{M^2 a_v^2 + \left[\frac{I a_\omega}{(c + x)^2} + \frac{I_я a'_\omega c}{r^2 (c + x)}\right]^2}. \tag{401}$$

Для более легкой интерпретации разбираемого процесса в дальнейшем необходимо сделать ряд замен и преобразований. В предположении, что двигатель представляет собою цилиндр с радиусом c, а якорь — цилиндр с радиусом $r_я$, можно заменить моменты инерции через массы:

$$I = \frac{Mc^2}{2} + Mx^2,$$

$$I_я = \frac{M_я r^2_я}{2}.$$

Массы всего двигателя и якоря пусть будут связаны соотношением:

$$M_я = mM.$$

При дальнейших выкладках следует также иметь в виду выражение для передаточного числа зубчатых колес:

$$k_з = \frac{c - r}{r}.$$

На основании этих выражений формула (401) может быть приведена к виду:

$$P = \sqrt{(Ma_v)^2 + (Ma_\omega)^2 \left[\frac{(c^2 + 2x^2) + m k_з (k_з + 1) r^2_я}{2(c + x)^2}\right]^2}$$

или

$$P = M \sqrt{a_v^2 + a_\omega^2 y^2}, \tag{402}$$

где

$$y = \frac{c^2 + 2x^2}{2(c + x)^2} + \frac{m k_з (k_з + 1)\, r_я^2}{2 (c + x)^2} = y' + y''. \tag{403}$$

Величина, обозначенная через y, представляет собою меру интенсификации ударного эффекта в зависимости от соотношения параметров двигателя и его подвески. Анализируя выражение для y видим, что на эту величину очень сильно влияют, помимо массы якоря и его радиуса, передаточный коэфициент $k_з$ и величина x. При прочих неизменных параметрах двигателя можно путем выбора соответствующей величины x добиться в большей или меньшей степени снижения коэфициента усиления удара y. Наименьшее его значение можно найти по правилу нахождения минимума согласно уравнению:

$$\frac{dy}{dx} = 0.$$

Решение этого уравнения относительно x дает значение:

$$x_{\min} = \frac{c}{2} + \frac{m k_з (k_з + 1) r_я^2}{2c}. \tag{404}$$

Нетрудно убедиться, что данное выражение действительно дает наименьшее значение для y, так как вторая производная его больше нуля. Если в формулу (403) вместо x подставить выражение для $x_{\min}$, то для каждого соотношения параметров и в частности для каждого передаточного числа двигателя можно найти наименьшее возможное значение y. Для частного случая, при

$$m = 0{,}25$$

и

$$r_я = 0{,}5c$$

значения $x_{\min}$ в функции от c при различных $k_з$ можно видеть в табл. 64.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ТАБЛИЦА 64.

Наименьшие значения y для различных $k_з$.

$k_з$	2	3	4	5	6	7
x_{min}	0,69c	0,88c	1,12c	1,44c	1,81c	2,25c
y_{min}	0,41	0,47	0,54	0,60	0,64	0,693
y'_{min}	0,34	0,36	0,40	0,44	0,475	0,527
y''_{min}	0,07	0,11	0,14	0,16	0,165	0,166

Выражение (403) подтверждает высказанное выше положение, что подвеска по линии центра тяжести двигателя является невыгодной. При $x=0$ значения y резко повышаются по сравнению с приведенными в таблице. Так при $x=0$ и $k_з=4$, y получает значение $^9/_8$, что по сравнению с y_{min} дает увеличение в два раза.

В том случае, когда применяются пружинные колеса, рассмотренный ударный эффект двигателя должен, естественно, снизиться. При такой передаче удар, вызываемый зубчатыми колесами, практически теряет свое значение, так как он поглощается пружинами. Если обратиться к выражению (403), то в нем при пружинных колесах y'' будет равен нулю. Выражение для y тогда получает вид:

$$y=\frac{c^2+2x^2}{2(c+x)^2}. \qquad (405)$$

Как это следует из выражений (404 и 405), при данных условиях величина x_{min}, независимо от параметров якоря и передаточного числа, всегда равна $\frac{c}{2}$, а y_{min} неизменно равен $^1/_3$. Последняя цифра показывае , что по сравнению с обычными колесами пружинные дают значительное ослабление ударных эффектов, особенно при больших передаточных числах.

Произведенный анализ работы зубчатой передачи показывает, что путем соответствующего выбора точек подвеса можно в значительной степени ослабить ударные эффекты, вызывающие вращательные движения двигателя. Более трудно бороться с ударным эффектом, направленным по линии подвеса двигателя. Здесь в ударе принимает участие вся масса двигателя, и уменьшения его действия можно достигнуть только путем снижения ускорения a_v. Величина последнего при данной продолжительности ударного перемещения зависит от пути, проходимого при прямолинейном движении массой двигателя M. Этот путь зависит от степени наклона линии подвеса к горизонтали. Если бы двигатель был поставлен вертикально, все перемещение массы двигателя фактически обратилось бы в прямолинейное, и путь этого перемещения был бы равен h. Этот случай подвеса ясно показывает, что для максимально возможного понижения ударного эффекта по линии подвеса следует стремиться к расположению точки B, вала двигателя и оси подвижного состава в одной горизонтальной плоскости. Однако, по условиям габарита очень часто выполнить это не удается. Для того, чтобы иметь нужное расстояние кожуха от поверхности пути, приходится поднимать точку подвеса над уровнем оси подвижного состава. Но во всяком случае современная практика рекомендует тангенс угла наклона оси подвеса к горизонтали не делать больше 0,14—0,15.

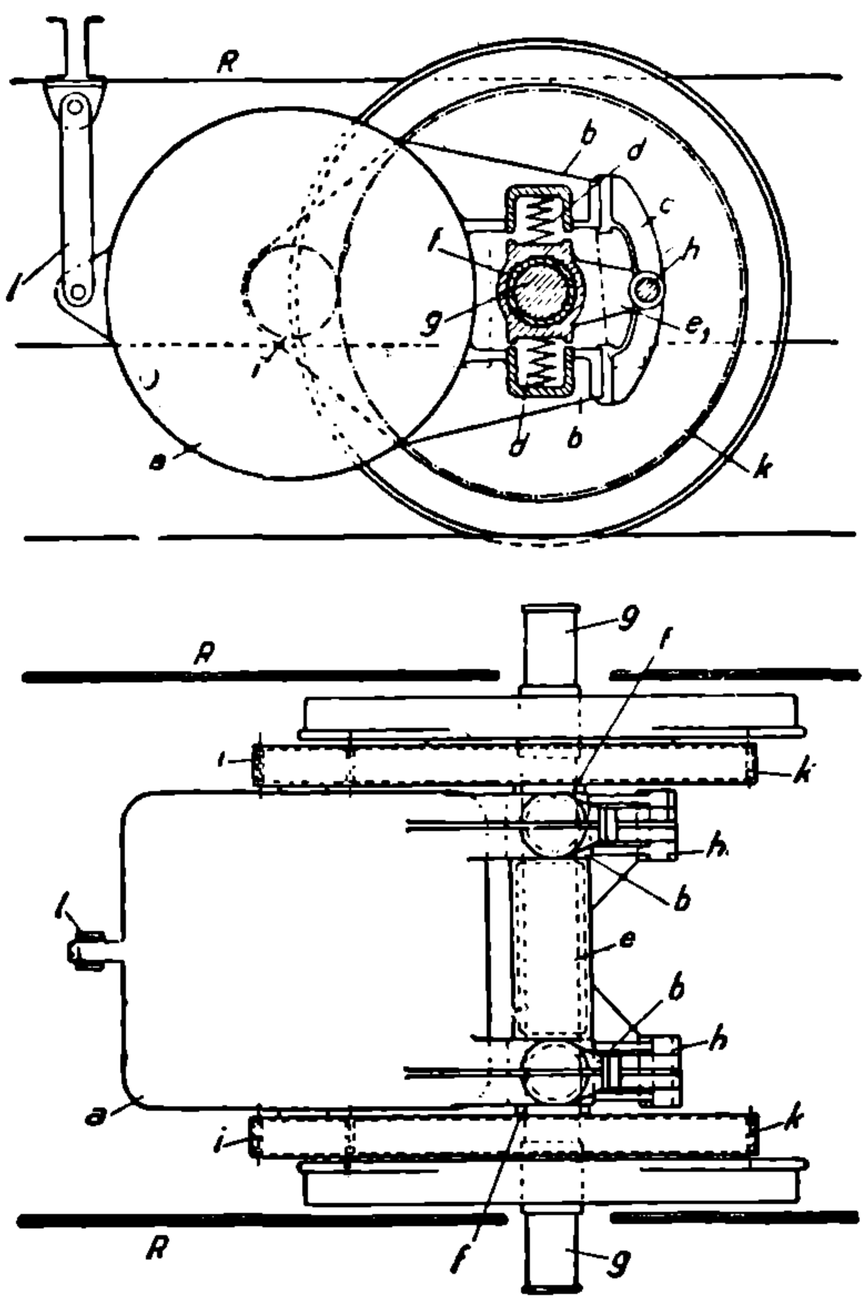


Рис. 398. Эластичная подвеска тягового двигателя MFO.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Большие ударные эффекты, получаемые при осевой подвеске, неоднократно заставляли конструкторов искать средств к уменьшению неподрессоренной части двигателя. Однако, из-за своей сложности предложенные для этой системы конструкции не привились на практике. Как пример их на рис. 398 приведена эластичная подвеска завода Oerlikon. Здесь двигатель опирается на осевые вкладыши с помощью рессор *d*, со стороны же носика он подвешивается с помощью шарнирной системы *l*.

Системы зубчатых передач с полым валом. Широко применяемая теперь в электровозном деле данная система впервые была осуществлена Вестингаузом. По идее она имеет назначение защитить двигатели от жестких ударов, а заодно уменьшить и неподрессоренный вес, приходящийся на путь. На рис. 399, 400 и 401 приведены различные комбинации выполнения идеи Вестингауза. В основе их лежит полый вал, охватывающий свободно ось локомотива. В вертикальном направлении вал поддерживается подшипниками двигателей, которые при этой системе нормально выполняются по типу сдвоенных. На рис. 26 видны эти подшипники. Сам двигатель, как уже отмечалось, крепится на раме локомотива. Движение от двигателя через шестерню передается на большое зубчатое колесо, сидящее на полом валу. Благодаря тому, что полый вал находится в подшипниках кожуха двигателя, расстояние между центрами шестерни и боль-

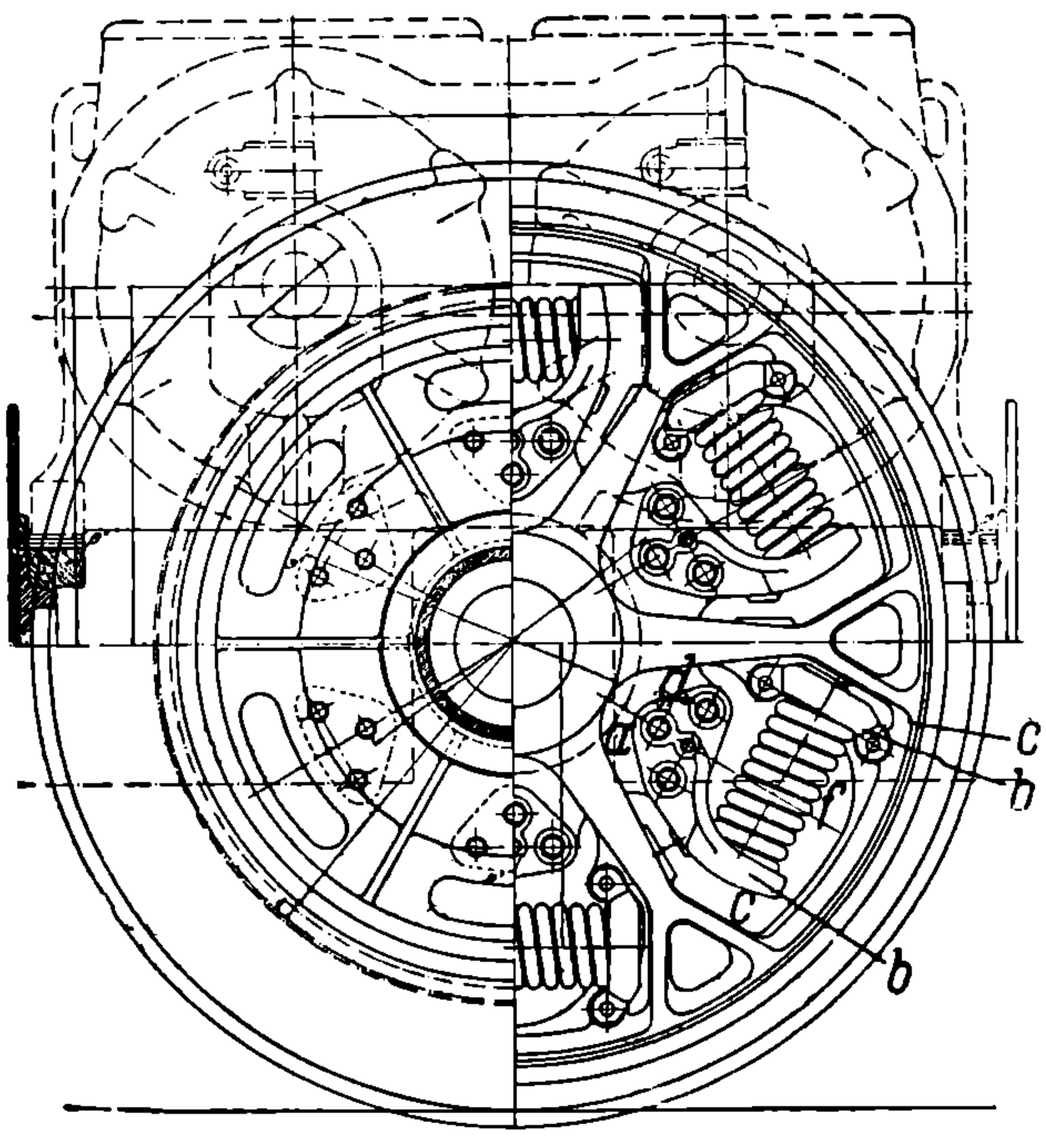


Рис. 399. Система подвески с полым валом Вестингауза.

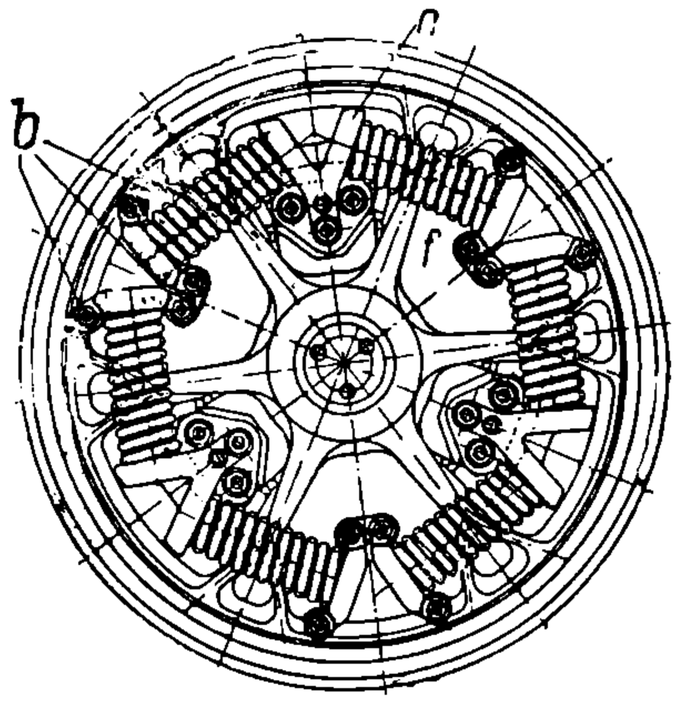


Рис. 400. Система подвески с полым валом завода Sécheron.

шого колеса остается неизменным при всех перемещениях кузова и рамы локомотива на их рессорах. Тяговый момент, получаемый на полом валу, передается последним на ведущие колеса с помощью промежуточных пружин, в форме и креплениях которых собственно и заключается различие между приведенными тремя конструкциями.

На рис. 399 представлен основной тип рассматриваемой передачи, выполняемый Вестингаузом. Ведущие пружины *f*, в числе шести на каждом колесе, закрепляются в стаканах *b*, навинчиваясь на винтообразные штыри, выступающие из тарелок стаканов. Один стакан *b* с помощью показанных трех винтов крепится к диску или звезде *a* полого вала (рис. 399), а второй стакан *b* привинчивается к ступице колеса *c*. Пружины *f* в системе Вестингауза работают в тяжелых условиях. Помимо больших напряжений, вызываемых передачей тяговых усилий, они испытывают еще напряжения, вызываемые центробежными силами и игрой полого вала по отношению к ведущей оси. Последние напряжения объясняются тем, что полый вал принадлежит к надрессорному строению и поэтому вместе с ним совершает непрерывные колебания по отношению к осям. О величине этой игры можно судить по просвету между полым валом и осью, доводимым на каждую сторону до 35—45 mm. При указанных обстоятельствах пружины в системе Вестингауза вынуждены работать на сжатие, растяжение и изгиб.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Несколько видоизмененную конструкцию Вестингауза применяет фирма Sécheron (рис. 400). Здесь пружины *f* имеют крепление в пунктах *b* и *c*. Пункты *b* здесь относятся к креплениям у ведущих колес, а *c* — у полого вала. В каждый данный момент половина пружин работает на сжатие, половина—на растяжение. В отличие от Вестингауза фирма Sécheron дает пружинам предварительный натяг. Преимущество разбираемой системы — в выигрыше места, занимаемого пружинами, благодаря чему можно значительно уменьшить диаметры ведущих колес. Предварительная подтяжка пружин дает возможность значительно снизить и выравнить по их длине напряжение от центробежной силы. По данным Sécheron, снижение напряжения в наиболее опасных сечениях, а именно в местах закрепления, достигает около 25%. Пружины в рассмотренной системе, благодаря большему для них месту, могут быть взяты более солидными и в то же время более эластичными, а поэтому можно в случае нужды допускать бо́льшие амплитуды колебаний полого вала по отношению к ведущим осям, что может обеспечить более надежную защиту двигателей от ударов.

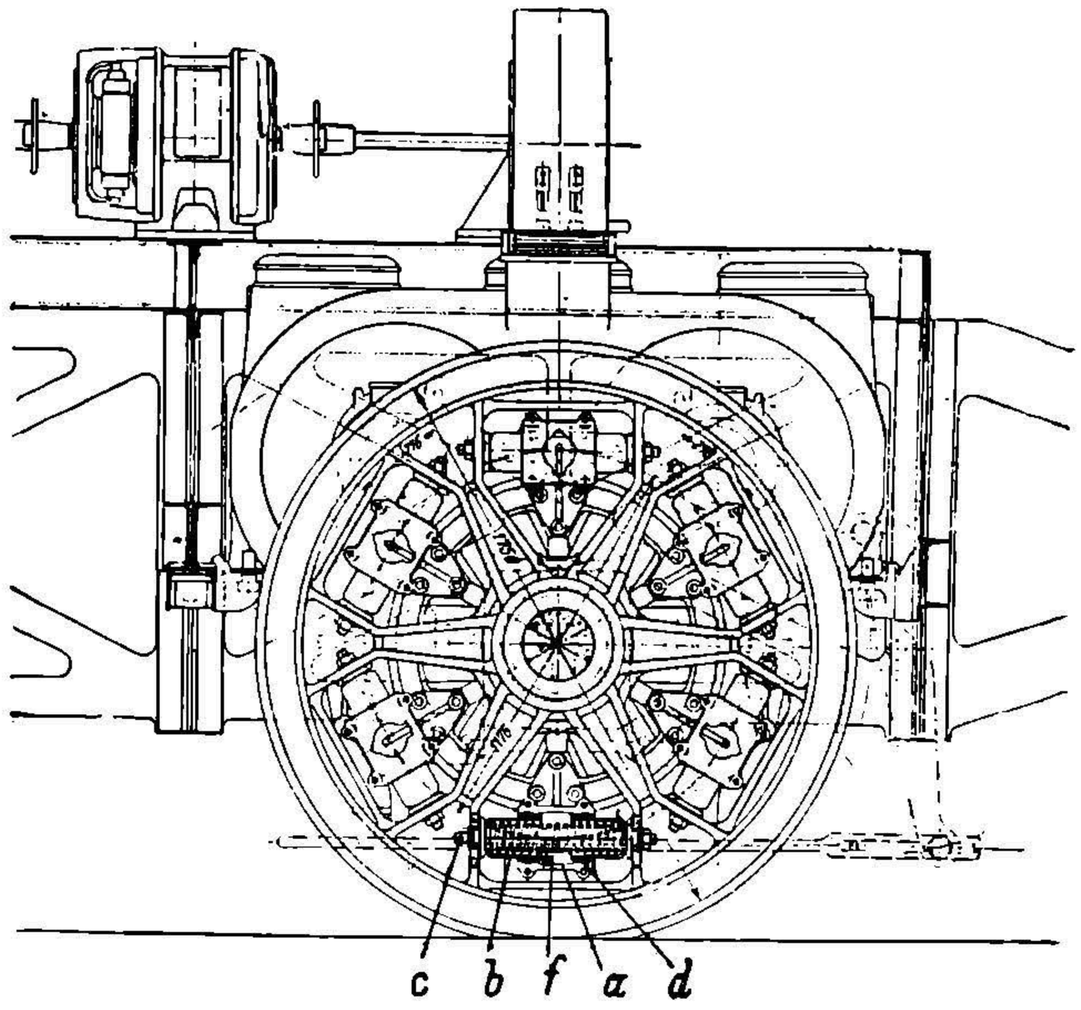


Рис. 401. Передача с полым валом AEG.

Несколько иную систему пружин применяет фирма AEG (рис. 401 и 402), нашедшая также применение в скорых электровозах СССР типа ПБ. В данном случае пружины работают все время на сжатие. Каждая пружина помещается в обойме *a*, привинченной к диску полого вала. В направляющих кольцах *d* обоймы свободно ходят стаканы *b*, которые распираются пружиной *f*. Стаканы имеют закраины, упирающиеся в направляющие кольца *d* обойм. При передаче усилия от полого вала обойма через кольцо *d* и соответствующий стакан *b* действует на пружину, которая прижимает противоположный стакан к особому подпятнику *c*, привинченному к ступице колеса. Пружины в системе AEG работают в благоприятных условиях. Несколько более слабым местом этой передачи являются поверхности соприкоснове-

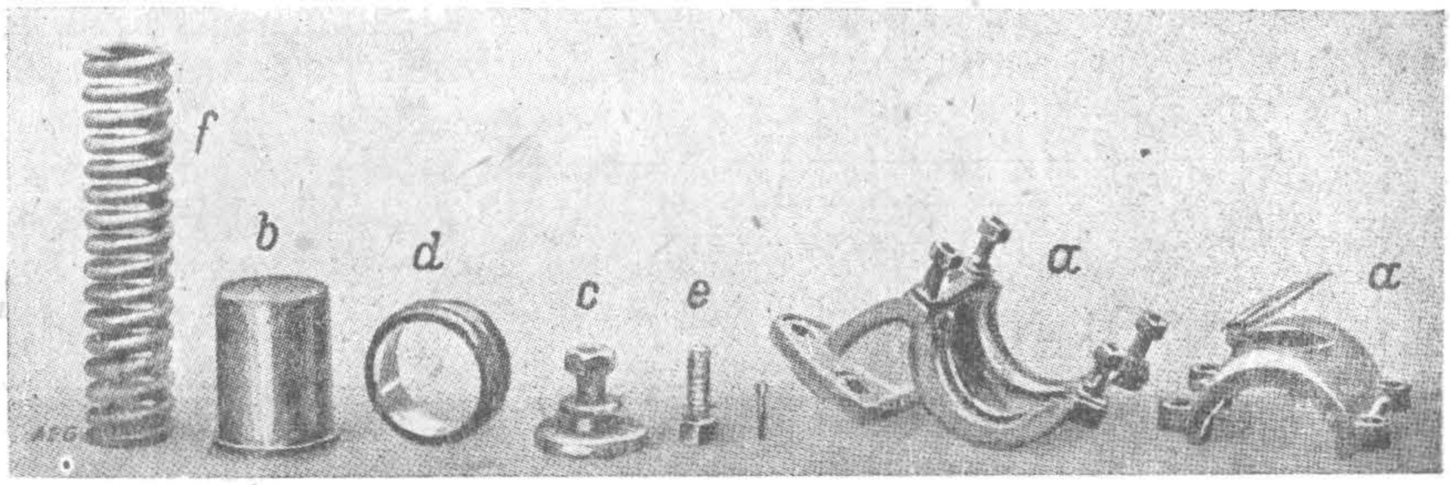


Рис. 402. Детали передаточного механизма с полым валом системы AEG.

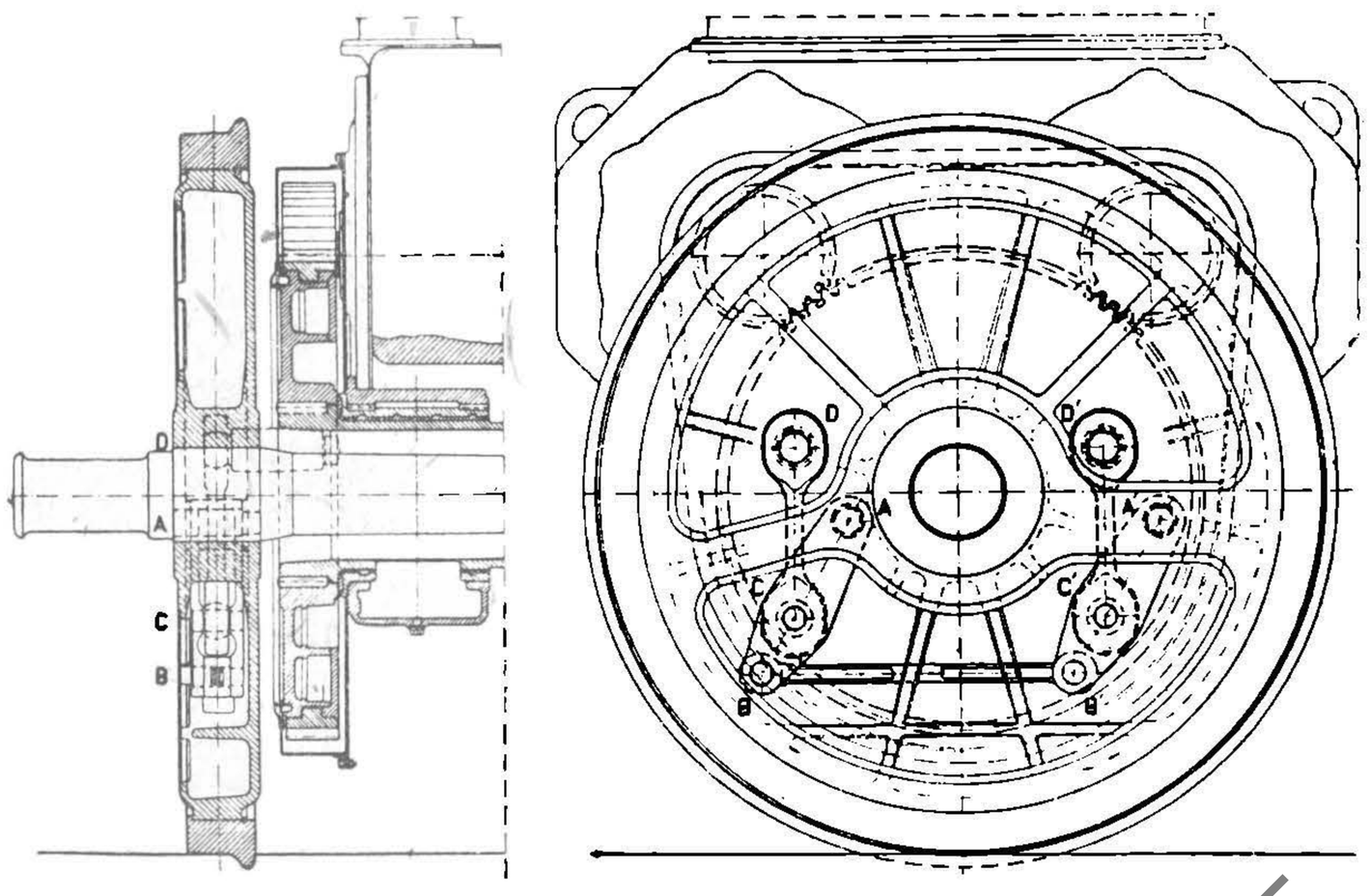


Рис. 403. Передаточный механизм с полым валом системы завода Skoda.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

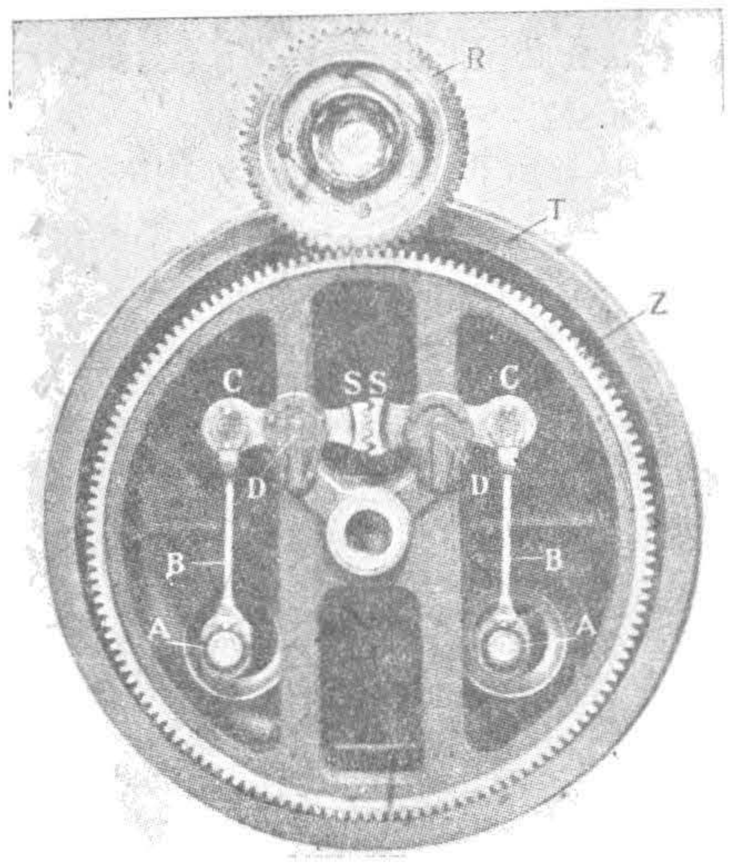


Рис. 404. Передаточный механизм системы Buchli.

ния стаканов и подпятников. Из-за игры рессор здесь получается непрерывное взаимное их перемещение, и потому они могут быстро изнашиваться.

Помимо пружинных соединений полого вала с ведущими колесами, в настоящее время имеется целый ряд конструкций, основанных на применении соединений шарнирного типа. Такие системы предложены фирмами MFO, Jeumont, Skoda и другими. В качестве образца на рис. 403 показана передача Skoda, примененная на электровозах в Чехословакии. Как это видно из рисунка, шарнирно-рычажный механизм этой фирмы, как и вообще механизмы подобного рода, с одной стороны, обеспечивает передачу тягового усилия, а с другой, — путем перемещения своих звеньев около шарниров, делает относительно безболезненными ударные эффекты полуската, поглощая их без передачи на массу двигателя только за счет собственных перемещений. Ввиду того, что рычагам и шарнирам здесь приходится работать в тяжелых условиях, механизмы шарнирно-рычажного типа до настоящего времени большого распространения не получили.

Зубчатая передача системы Buchli. Данную передачу следует отнести к индивидуальным зубчатым передачам с эластичным соединением между большим зубчатым колесом и ведущей осью. Схема ее действия видна из рис. 404 и 405. Как видно из схемы, вал двигателя выходит за габарит кузова. Большое зубчатое колесо висит со своим валом и кожухом на валу электродвигателя. Эластичная связь состоит

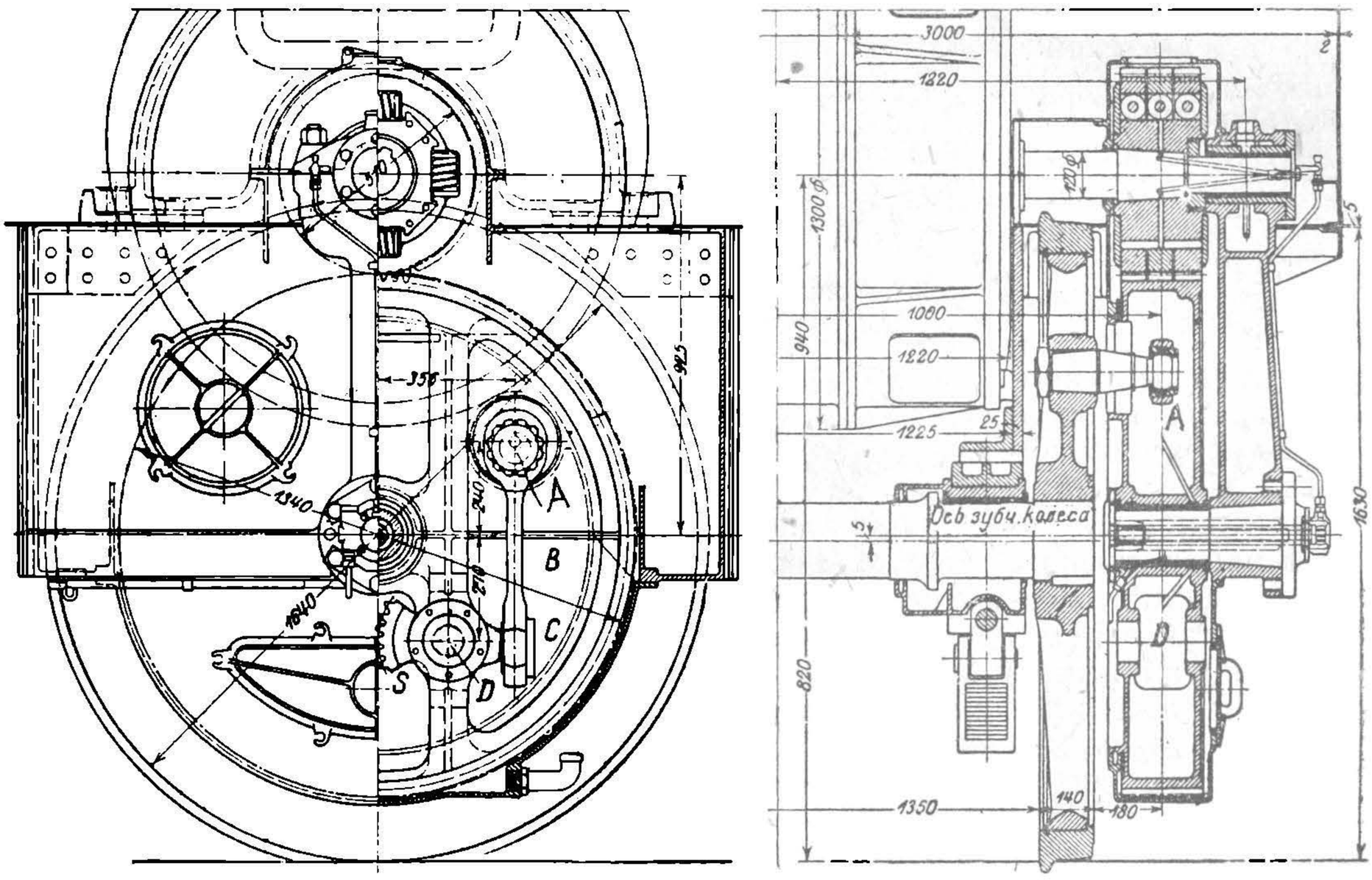


Рис. 405. Общий вид и разрезы передаточного механизма системы Buchli.

из зубчатых секторов *SS*, шарниров *DD* и *CC*, рычагов *BB* и шарниров *AA*. Шарниры *D* имеют закрепление в зубчатом колесе, а шарниры *A* — в колесе ведущем. Шарниры *A* и *C* сделаны в виде шаровых, и потому зубчатое колесо и ведущее могут независимо свободно перемещаться как в направлении вертикальном, так и вдоль оси электровоза. Таким образом, все перемещения кузова по отношению к полускатам, вызываемые как игрою рессор, так и поперечными перемещениями полускатов,

НТБ УЭУНТ (ДІІТ)

жестко не передаются на зубчатую передачу, и она работает, не получая значительных ударных эффектов, при неизменном положении центров осей большого и малого зубчатых колес по отношению друг к другу.

Устойчивость передачи достигается тем, что в точках соприкосновения зубцов обоих секторов получаются при передаче тягового усилия равные и противоположные усилия, и потому эти точки соприкосновения являются теми опорными пунктами, благодаря которым осуществляется передача тягового усилия от вала двигателя к ведущей оси.

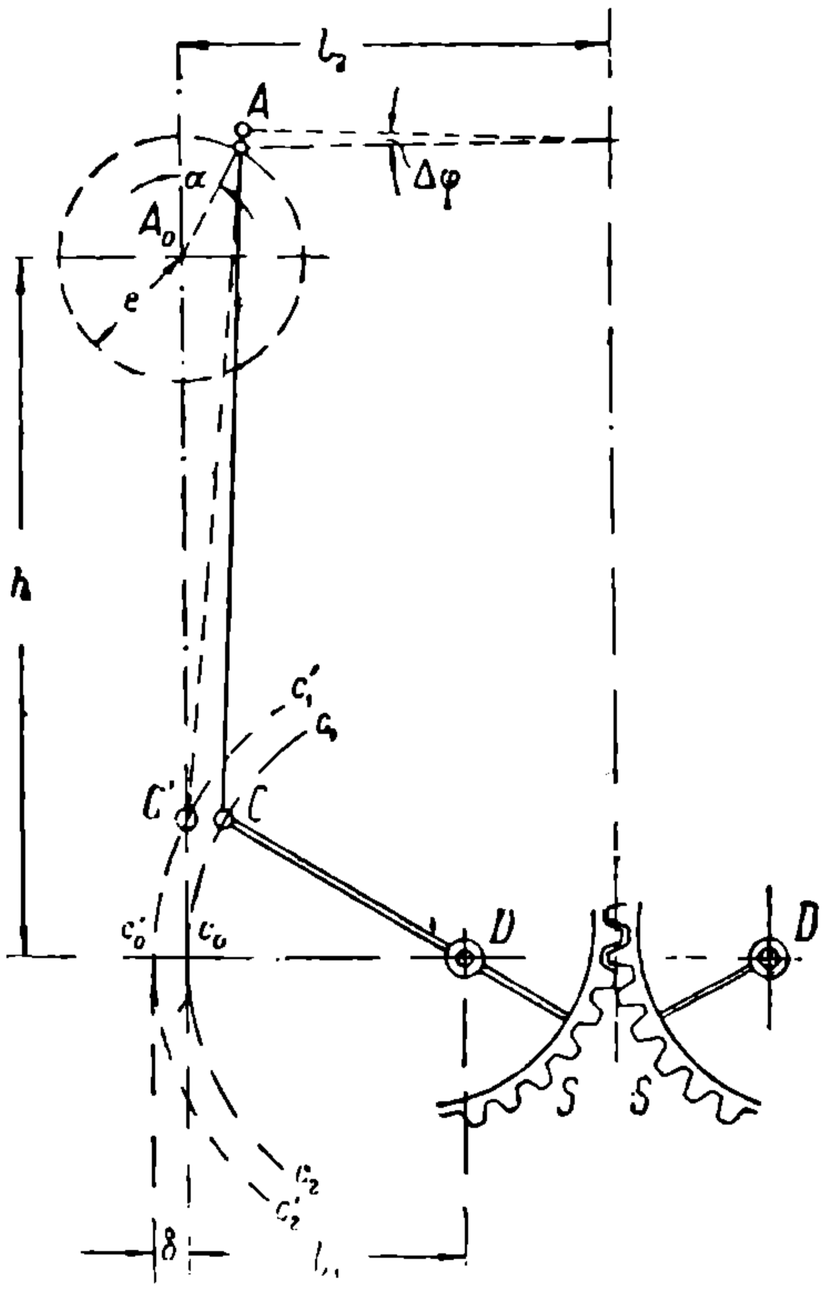


Рис. 406. Кинематическая диаграмма механизма Buchli.

Достоинство этой системы заключается в том, что она дает свободу выбора размеров двигателя. Двигатель может быть взят с большой длиной железа ротора. Кроме того, она обеспечивает свободу выбора передаточного числа. Для получения по возможности большого диаметра большого зубчатого колеса и, следовательно, больших мощностей двигателей завод BBC, применяющий эту передачу в своих электровозах, обычно прибегает к эксцентриситету, т. е. располагает центр вала большого ведущего колеса над центром ведущей оси. Эксцентриситет берется нормально порядка 25 mm, и уже эта величина его, как показывает расчет, дает большие преимущества в отношении получения выгодных размеров машины за счет, главным образом, получения высоких окружных скоростей роторов.

Давая преимущества в отношении выгодных соотношений размеров двигателей, эксцентриситет, однако, вызывает некоторые осложнения в процессе передачи движения. При отсутствии эксцентриситета, если не происходит паразитных перемещений кузова по отношению к скату, передача самого тягового усилия совершается без движения секторов и рычагов. Передача тогда колеблется только из-за паразитных факторов, игры рессор и пр.

При наличии же эксцентриситета для того, чтобы система могла свободно вращаться, секторная передача должна непрерывно перемещаться. Эквивалентная схема перемещения отдельных элементов передачи представлена на рис. 406. За полный оборот колеса шарнир C должен описать полную дугу c_1c_2 с проходом ее вниз и вверх. В это время шарнир A также должен непрерывно изменять свое положение относительно шарнира C. Нетрудно сообразить, что, если шарнир C описывает указанные дуги, то шарнир A в своем относительном движении стремится описать за это время окружность с радиусом равным эксцентриситету e, около центра A_0, определяемого точкой, в которой находился бы шарнир A при отсутствии эксцентриситета. Если бы данные движения могли кинематически свободно выполняться точками A и C, то никаких особых напряжений в частях передаточного механизма, помимо естественного напряжения при передаче сил, не было бы. Однако, в действительности картина получается иная. Точка A кинематически, естественно, может описать окружность только при условии, если бы точка C двигалась не по дуге, а по прямой A_0c_0, как в обычном кривошипно-ползунном механизме. При таких условиях перемещению точек C по прямой соответствовало бы перемещение точек A по окружности. Если же, как это в действительности имеет место, точка C движется по дуге, то точка A должна описать некоторую извилистую кривую около указанной окружности. В результате части механизма будут испытывать добавочные переменные деформации, величина которых может характеризоваться величиной $\Delta\varphi$, угла отклонения пути точки A от окружности. Сделав некоторые допущения, инженер Darrieus дал следующее выражение для этого угла:

$$\Delta\varphi = \frac{e^3}{2l_1l_2h}(\sin\alpha + \sin 3\alpha). \qquad (406)$$

Обозначения в этом выражении соответствуют рис. 406, причем $\angle\alpha$ — угол поворота механизма. Из этого выражения видно, что деформации изменяются в зависи-

НБ УЛУНТ (ДІТ)

мости от частоты вращения по простому закону синуса и затем по закону третьей гармоники.

Чтобы ослабить эффект указанных деформаций, ВВС обычно смещает дугу c_1c_2 в положение $c_1'c_2'$ на некоторую величину δ.

При таких условиях выражение (406) получает вид:

$$\Delta\varphi = \left(\frac{e^3}{2l_1l_2h} - \frac{4e\delta}{l_2h}\right)\sin\alpha + \frac{e^3}{2l_1l_2h}\sin 3\alpha;$$

при

$$\delta = \frac{e^2}{8l_1};$$

$$\Delta\varphi = \frac{e^3}{2l_1l_2h}\sin 3\alpha,$$

т. е. в данном случае остается только третья гармоника. При данном соотношении результирующая амплитуда сильно снижается и, как показывают подсчеты ВВС, деформации получаются ничтожно малыми, не превосходящими тех, которые вызываются неточностями в обработке зубцов колес. При отнесении величины деформаций к дуге зацепления большого колеса она получается порядка 0,04 mm. Таким образом, систему передачи Buchli можно считать практически свободной от добавочных вредных перенапряжений.

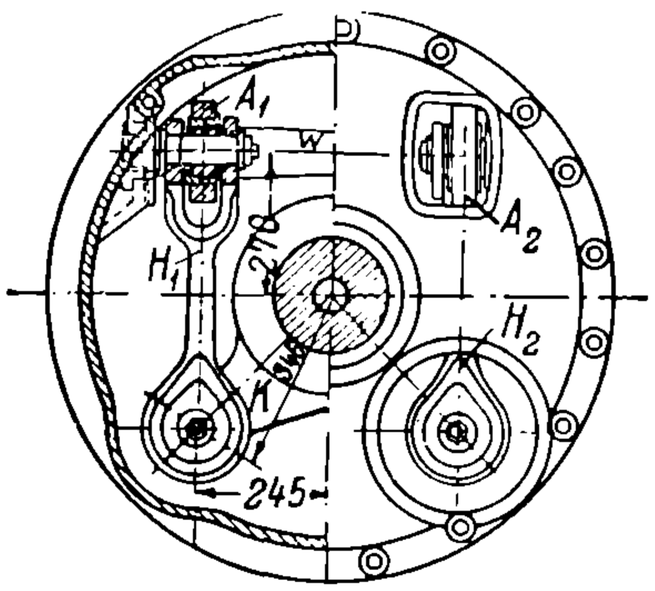


Рис. 407. Шарнирно-рычажная муфта к передаточному механизму рис. 73.

Осложняющим элементом в работе передачи Buchli могут явиться сектора. Выполняя тяжелую работу, они, несмотря на тщательную смазку, могут быстро изнашиваться.

Зубчатые передачи при вертикальных двигателях. Общий вид и разрезы передачи с вертикальными двигателями были уже приведены в отделе II (рис. 29 и 73). В этих системах применяются зубчатые конические колеса с насадкой большого колеса на полый вал, эластично соединяющийся с ведущими осями или ведущими колесами. Эта эластичная связь может выполняться или с помощью шарнирно-рычажных муфт, или с помощью пружин.

В системе локомотива австрийских железных дорог (рис. 73 и 407) применена шарнирно-рычажная муфта. Принцип действия ее виден из рис. 407. На оси локомотива насажены два кривошипа *KK*. Муфта, на которой сидит большое зубчатое колесо, снабжена поперечным валиком *W*, имеющим подшипники в толще муфты. На валике *W* также закреплены два кривошипа A_1 и A_2. Обе пары кривошипов соединены тягами H_1 и H_2. При передаче тягового усилия одна из тяг работает на растяжение, другая — на сжатие. Нетрудно сообразить, что сама передача тягового усилия не требует относительного перемещения отдельных звеньев соединительного механизма. Оно будет иметь место только в том случае, если полускат совершит ударное перемещение вверх, или вообще, если вследствие колебаний рессор будет изменяться расстояние между осью локомотива и валиком *W*. При таких условиях валик *W* со своими кривошипами будет поворачиваться, предотвращая этим поворотом жесткий удар полуската о муфту и дальше о передачу. Так как шарниры, соединяющие кривошипы с тягами, сделаны по типу шаровых, то эластичность перемещения муфты по отношению к оси локомотива достигается как в вертикальном, так и в поперечно горизонтальном направлениях.

Выполнение связи полого вала с ведущими колесами помощью пружин допускает большое количество вариантов. В частности можно применить соединение по типу Вестингауза. Во французском электровозе (рис. 29) для придания большей эластичности системе взята двухступенчатая схема. Сначала движение от полого вала передается пружинами на промежуточный диск, а уже от него вторым рядом пружин непосредственно на ведущие колеса, причем пружины работают на сжатие.

Передачи с вертикальными двигателями дают возможность сильно поднять центр тяжести локомотива и одновременно с этим уменьшить длину последнего.

Двухступенчатые зубчатые передачи. При выполнении зубчатых передач очень часто сопряжено с затруднениями получение требуемого передаточного числа. При быстроходных двигателях приходится из-за габаритных ограничений

НБ УДУНТ (ДІІТ)

прибегать к очень малым диаметрам шестерен с небольшим числом зубцов Между тем, по условиям производства шестерен, насаживаемых на вал, диаметры их не могут быть меньше определенной величины. Нормально число зубцов шестерни не должно быть меньше двенадцати — тринадцати. Попытки вытачивать шестерни из тела самого вала к положительному результату не привели, так как быстрая сработка шестерен требует одновременной замены и вала якоря. Ввиду отмеченных затруднений, при одноступенчатой передаче передаточные числа выше 7—7,3 в настоящее время не применяются. Практически же и эти цифры достигаются с очень большим трудом. Поэтому в большинстве случаев выше 6—6,5 стараются не итти. С другой стороны, особенно в трамвайном деле, теперь имеется сильное течение в пользу применения как можно более быстроходных двигателей.

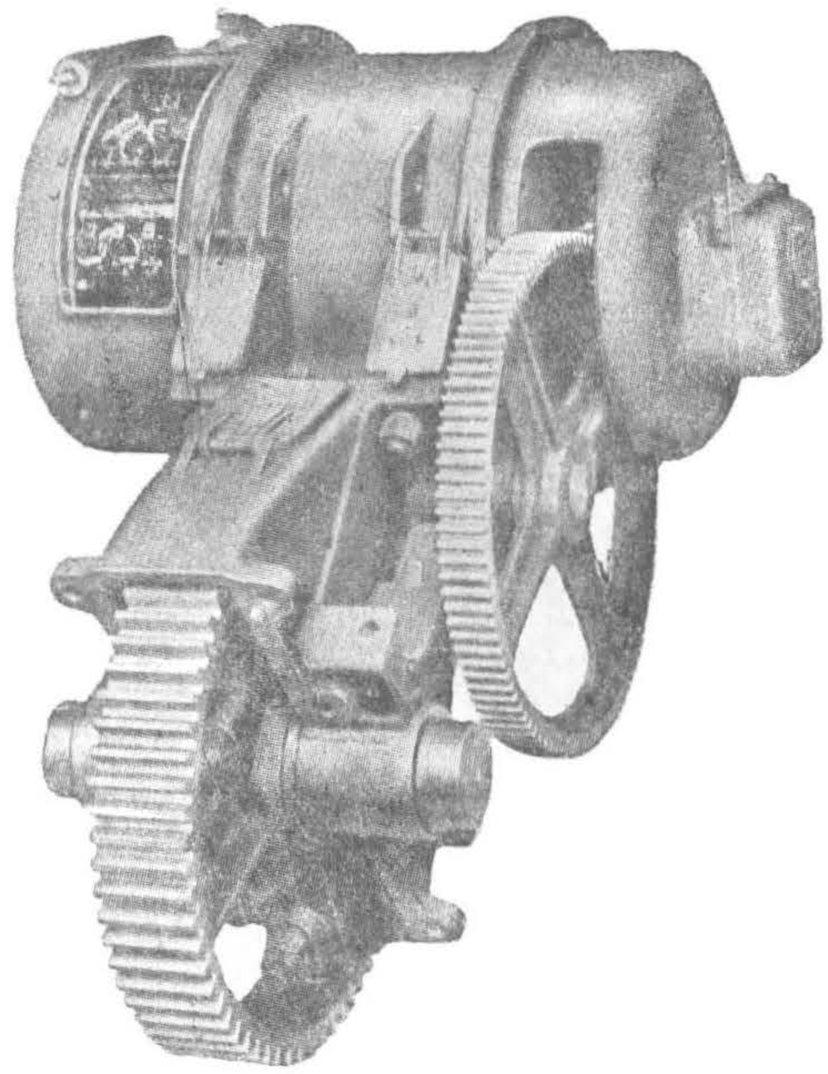


Рис. 408. Зубчатая двухступенчатая передача ВВС для индустриальных электровозов.

Выходом из данного затруднения может служить применение двухступенчатых передач. Такую попытку сделала американская фирма Вестингауз для трамвайных вагонов. По такой же идее иногда применяют передачу для индустриальных локомотивов (рис. 408). Как видно из рисунка, движение от вала двигателя передается сначала на промежуточный вал, а от него уже новой парой колес на ось локомотива.

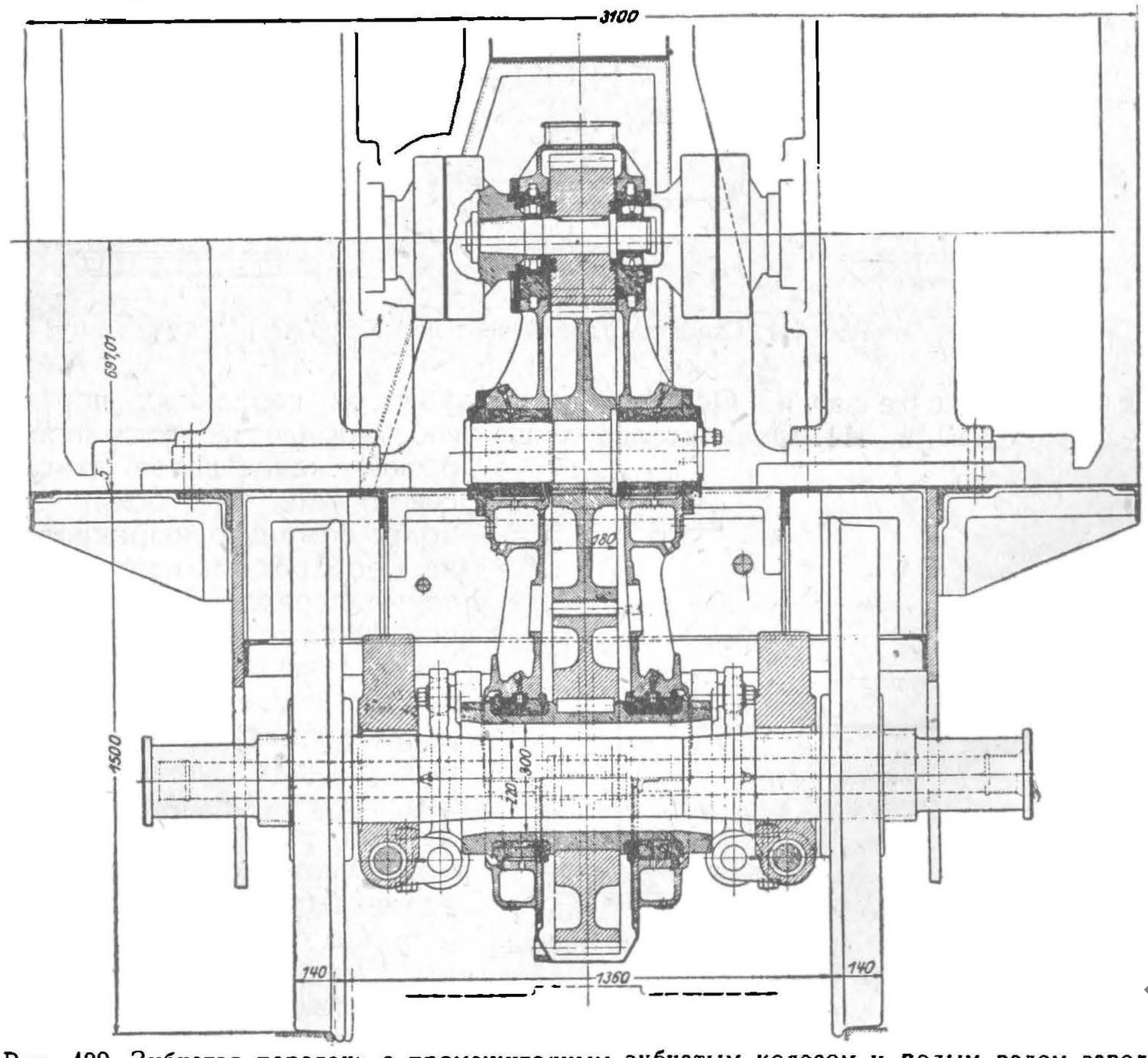


Рис. 409. Зубчатая передача с промежуточным зубчатым колесом и полым валом завода Linke — Hofmann'a.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Типы двухступенчатых передач встречаются и в электровозах. Здесь применение их объясняется не столько необходимостью, вызываемою передаточным числом, сколько желанием повысить центр тяжести электровоза и сделать более легким доступ к двигателям. Примером такой передачи может служить система завода Linke Hofmann'a, примененная на одном из электровозов германских железных дорог (рис. 409). В этой системе на каждую ось берется по два двигателя. Двигатели с помощью короткого вала, соединенного муфтами с их валами, приводят в движение шестерню, которая передает движение на промежуточное зубчатое колесо. Последнее сцепляется с третьим колесом, сидящим на полом валу. От полого вала на ведущую ось движение передается эластичной шарнирно-рычажной муфтой.

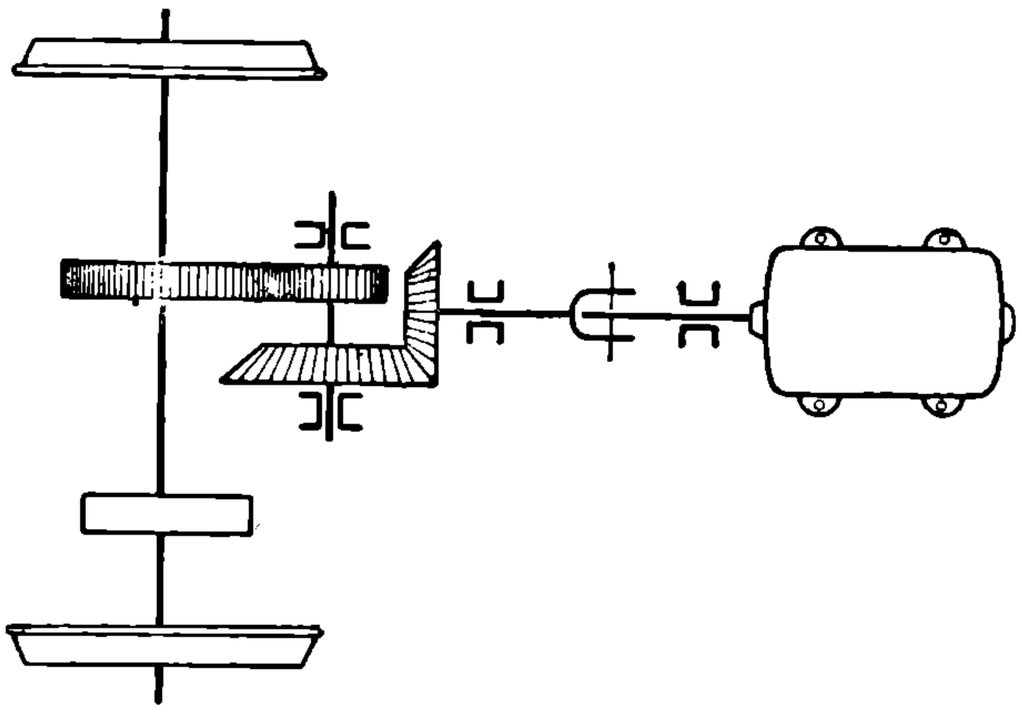


Рис. 410. Схема карданной передачи типа берлинского трамвая.

Довольно похожую по конструкции передачу дал Buchli для электровозов индийских железных дорог (Л. 220).

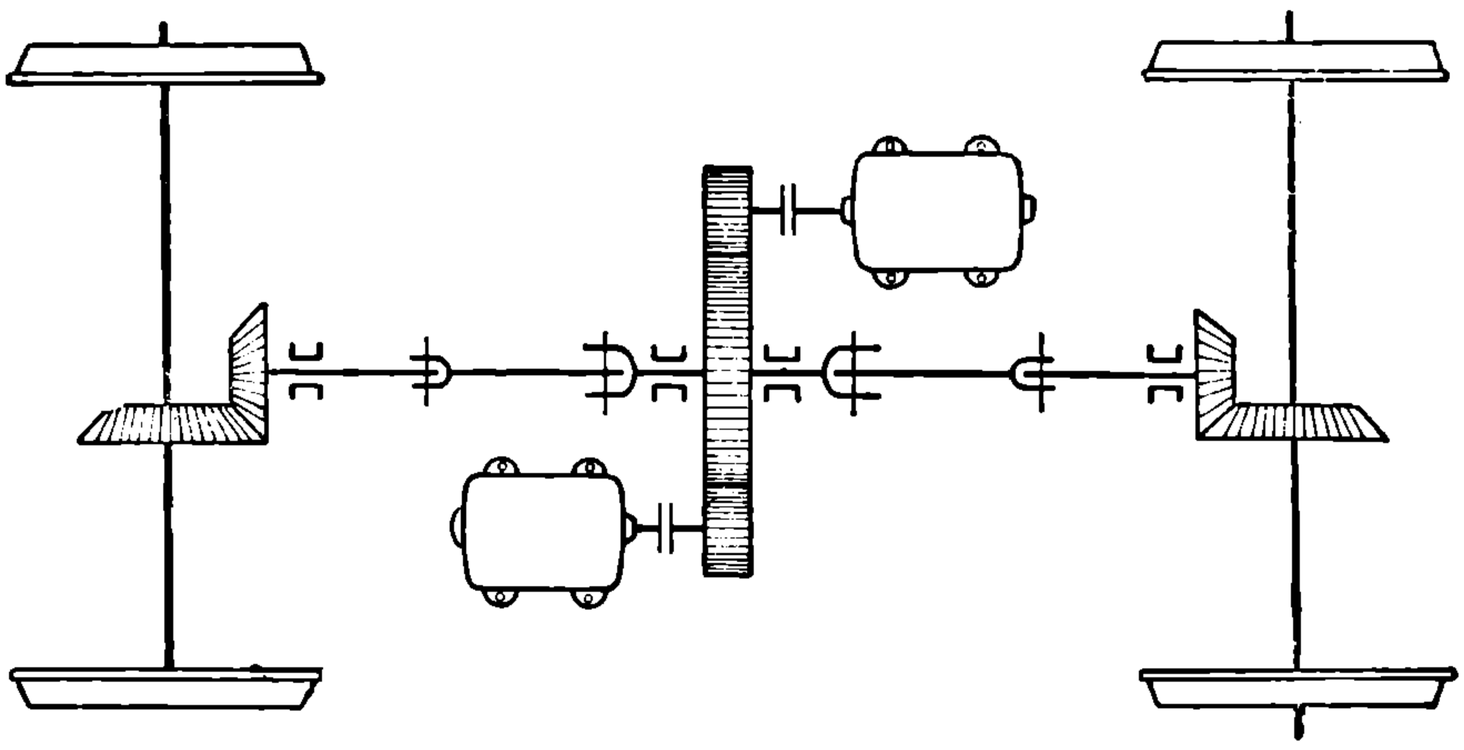


Рис. 411. Схема карданной передачи Krupp'a.

Карданные передачи. Основные типы зубчатых карданных передач приведены на рис. 410 и 411. Отличительною их особенностью является продольное расположение валов двигателей и соединение их с осями зубчатых колес помощью шарниров Кардана. Необходимою принадлежностью таких передач является коническая пара колес, причем в большинстве случаев к ней добавляется вторая ступень передачи в виде колес цилиндрических. В некоторых случаях карданный шарнир заменяется дисковой эластичной муфтой типа автомобильной, как это сделано в вагонах парижского трамвая (рис 412).

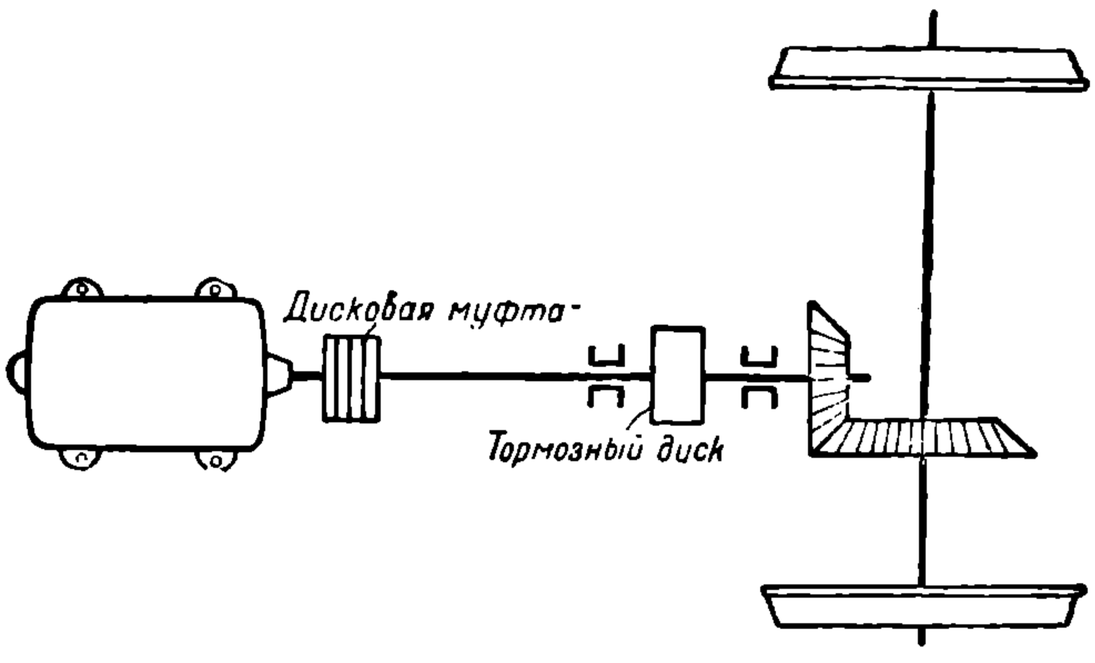


Рис 412. Схема конической зубчатой передачи парижского трамвая.

Большим достоинством карданных передач является продольное расположение валов двигателей. При двухступенчатой передаче двигатели могут быть взяты очень быстроходные, с доведением числа оборотов до 4000. При таких условиях они по-

НБ УРУНТ (ДІІТ)

лучаются очень легкими, и их можно расположить в таком месте под вагоном, где это наиболее удобно. Наличие гибкой связи между валом двигателя и осью вагона защищает машины от ударов. Ударное воздействие полускатов на путь также понижается, так как, помимо разгрузки осей, можно понизить вес полускатов, уменьшив диаметры колес.

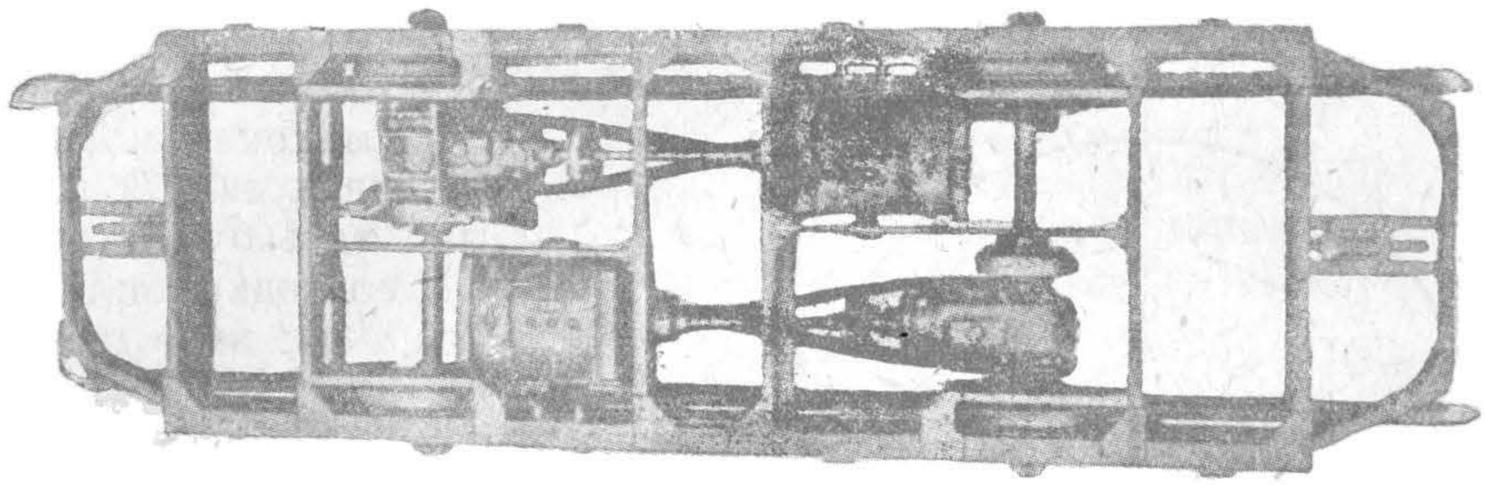


Рис. 413. Общий вид тележки с карданной передачей берлинского трамвая.

В настоящее время вагоны с карданными или эластично-дисковыми соединениями начинают получать широкое распространение. Несколько сот таких вагонов работает в Париже. Имеются такие вагоны в Варшаве, Берлине и Цюрихе. Расположение двигателей на раме тележки можно видеть на рис. 413, представляющем снимок тележки вагона берлинского трамвая с оборудованием.

Второй способ получения продольного положения оси двигателей и большого передаточного числа состоит в применении червячных передач. Несмотря на значительные трудности производства надежных червячных передач, последние в Америке начинают получать в трамвайных вагонах широкое применение. Червяк нормально комбинируется с карданным звеном. Очень рационально применять червячрую передачу, обеспечивающую большое передаточное число, для маневровых электровозов. В качестве образца червячной передачи может служить тип, приведенный на рис. 414.

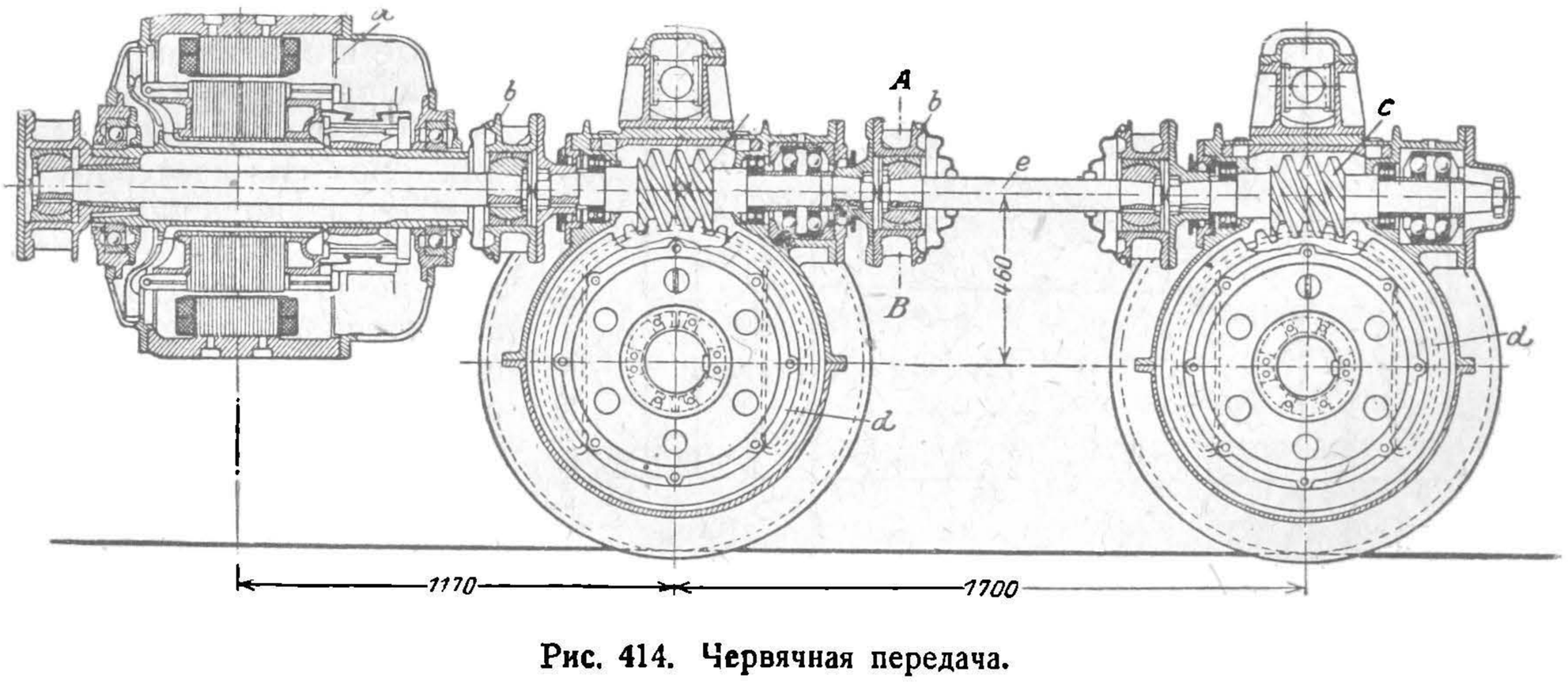


Рис. 414. Червячная передача.

2. Распределение сил в подвижном составе при зубчатых передачах.

Для выяснения картины распределения сил в отдельных частях подвижного состава при зубчатой передаче прежде всего будет рассмотрен наиболее распространенный тип подвижного состава — двухосный моторный вагон или такой же электровоз, у которых кузов с полускатами соединен непосредственно без всяких промежуточных шкворней (рис. 415). Исследование будет вестись в отношении подвесноосевых двигателей, так как при них картина распределения сил получается наиболее сложной. Сначала будет рассмотрена работа заднего полуската.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Вращающий момент M_3, развиваемый двигателем, который сцеплен с данным полускатом, создает тангенциальную силу T_2, действующую на зубец большого колеса:

$$T_2 = \frac{M_3}{r_3}. \qquad (407)$$

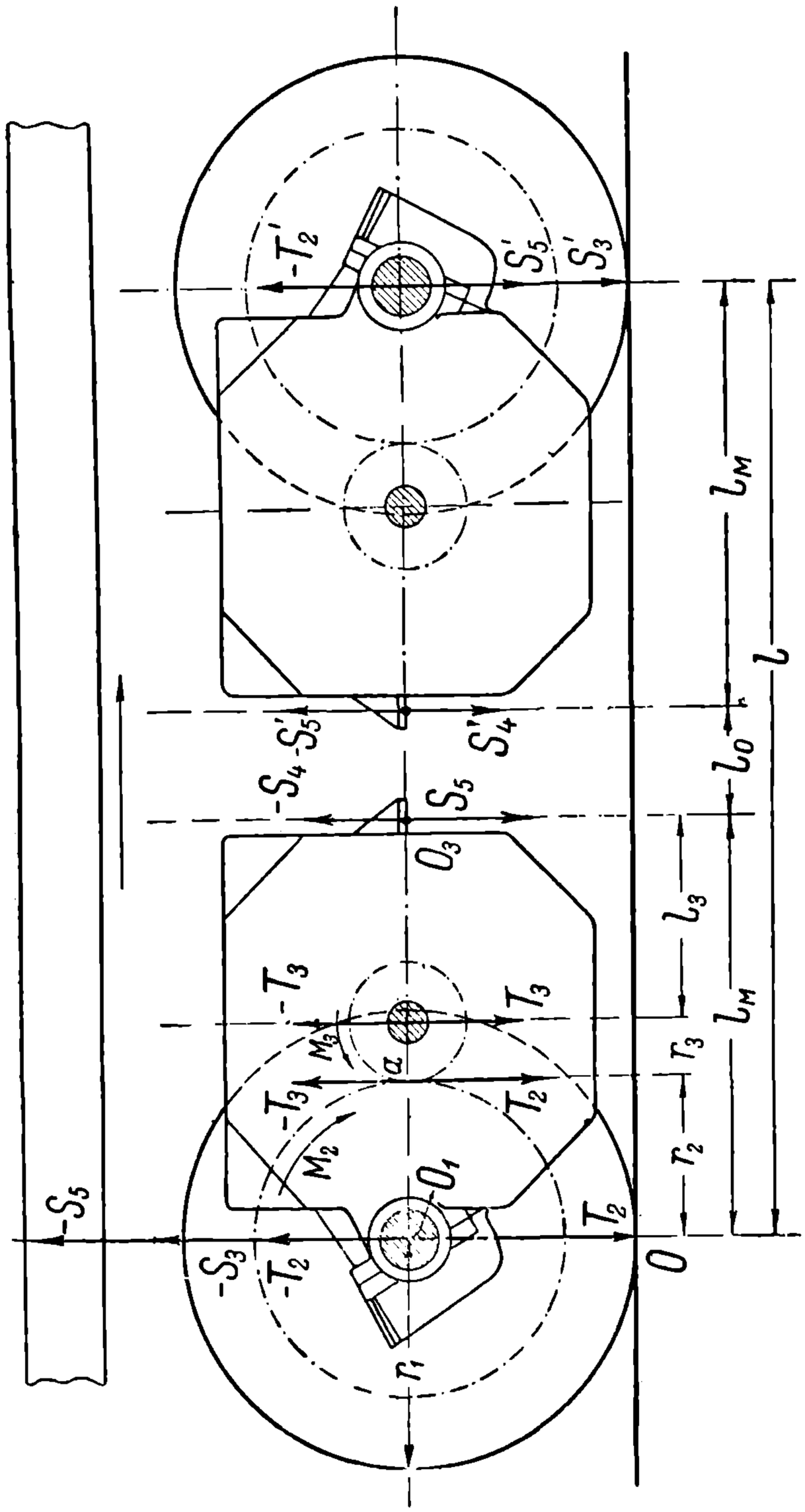


Рис. 415. Схема распределения усилий в подвижном составе двухосного типа при подвесноосевых двигателях.

Эффект действия этой силы можно выяснить путем приложения к оси рассматриваемого полуската двух сил T_2 и $-T_2$, причем здесь будем полагать силы со знаком плюс направленными вниз и со знаком минус — вверх. Комбинация полученных трех сил выражается в паре сил T_2 и $-T_2$, создающей основной рабочий момент вращения на ведущей оси, и в добавочном давлении полуската на рельсы, равном третьей силе T_2, действующей по линии OO_1.

При надавливании зубца шестерни на зубец большого колеса с силой T_2 первый подвергается действию силы реакции $-T_3$, равной по величине T_2.

Как и в предыдущем, для выяснения действия силы $-T_3$ приложим к центру вала якоря двигателей две равные и противоположные по направлению силы T_3 и $-T_3$. Совокупность последних трех сил дает пару T_3 и $-T_3$, уравновешивающую момент M_3 и силу $-T_3$, приложенную в центре вала двигателя, стремящуюся поднять весь двигатель. В результате последнего эффекта, полускат в местах осевых моторных подшипников и пружины, с помощью которых двигатель подвешивается к тележке или к кузову вагона, получает от кожуха двигателя направленные вверх давления $-S_3$ и $-S_4$. Нетрудно убедиться в том, что по величине эти силы равны:

$$S_3 = T_3 \frac{l_3}{l_м} = \frac{M_3 l_3}{r_3 l_м} \qquad (408)$$

и

$$S_4 \quad T_3 \frac{r_2 + r_3}{l_м} = \frac{M_3 (r_2 + r_3)}{r_3 l_м}. \qquad (409)$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Помимо рассмотренных усилий, при разбираемой подвеске двигателей необходимо учесть, что при наличии вращающего момента на валу якоря двигателя такой же момент, но действующий в противоположном направлении, развивается магнитной системой двигателя. Этот момент стремится повернуть кожух двигателя в направлении обратном вращению якоря. В результате нужно в точках опоры кожуха двигателя учитывать силы S_5 и $-S_5$, численное значение которых определяется согласно равенству:

$$S_5 = \frac{M_3}{l_м}. \tag{410}$$

Комбинируя все полученные усилия, можно перейти к их результирующим. Суммарное усилие, приложенное к моторноосевым подшипникам и стремящееся разгрузить ось от части веса самого двигателя, определится суммой:

$$S_{ос} = -(S_3 + S_5) = -\left(\frac{M_3}{r_3}\frac{l_3}{l_м} + \frac{M_3}{l_м}\right) = -\frac{M_3}{r_3 l_м}(r_3 + l_3). \tag{411}$$

Результирующее усилие, приходящееся на моторные подвесные пружины:

$$S_{пр} = \frac{M_3}{l_м} - \frac{M_3(r_2 + r_3)}{r_3 l_м} = -\frac{M_3 r_2}{r_3 l_м}. \tag{412}$$

Результирующее усилие, приходящееся на задний полускат в виде добавочной силы, определится выражением:

$$S_{рел} = \frac{M_3}{r_3} - \frac{M_3}{r_3 l_м}(r_3 + l_3) = \frac{M_3 r_2}{r_3 l_м}. \tag{413}$$

Для переднего полуската останутся в силе все приведенные соображения, но только направление действия всех полученных сил $S'_{ос}$, $S'_{пр}$ и $S'_{рел}$ будет обратное.

Теперь для окончательного установления усилий в рассматриваемом механизме необходимо осветить процесс взаимодействия определенных сил со всеми силами сопротивлений движению как внутренними, так и внешними (рис. 416).

При учете влияния сил сопротивления на распределение напряжений в отдельных частях вагона необходимо прежде всего разобраться в эффекте внутренних сил. Сводя вредные сопротивления движению в самих электродвигателях к понижению их момента, можно прочие вредные сопротивления в вагоне свести к парам, стремящимся повернуть вагон в направлениях, обратных вращению осей. В дальнейшем результирующие моменты, по отношению к осям вагона, всех пар сил трения будут обозначаться через $M_{тр}$ и $M'_{тр}$. При таком условии связь между полным моментом $\frac{M_3 r_2}{r_3}$, передающимся на рассматриваемую ось, и полезным M_2 при пренебрежении силами инерции вращения может быть определена выражением:

$$\frac{M_3 r_2}{r_3} = M_2 + M_{тр}. \tag{414}$$

К внешним силам сопротивления следует отнести силу сопротивления уклонов $R_п$ силу сопротивления воздушной среды $R_в$, сопротивление пути ΣR_1, силу инерции $R_и$ и силу на тяговом крюке $R_к$, если имеется прицепной состав. Все эти силы, противодействуя поступательному движению поезда, имеют различные точки приложения. В порядке вышеприведенного перечисления сил внешних сопротивлений в дальнейшем и высоты положения линий их действия над линией центров осей вагона будут обозначаться через h_c, $h_в$, h_1, h_c и $h_к$. Следует заметить, что сила сопротивления пути в части главнейших своих составляющих может считаться приложенной непосредственно к оси и потому $h_1 = 0$, а силы R_i и $R_и$ должны мыслиться на высоте положения центра тяжести вагона h_c.

Равнодействующая всех горизонтальных сил сопротивлений должна быть равна сумме всех перечисленных сил:

$$R = R_i + R_в + \Sigma R_1 + R_и + R_к. \tag{415}$$

Эффект действия силы R наиболее ясно виден, если приложить в плоскости, проходящей через оси вагона, две силы R_1 и R_2, равные R и противоположные ей по направлению. В результате взаимодействия этих сил с равнодействующей R получается опрокидывающая пара RR_1, и, кроме того, освобождается сила R_2, действующая в плоскости осей и являющаяся той силой внешних сопротивлений, которую необходимо преодолеть при поступательном движении. Преодоление

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

данной силы производится силами рабочей пары T_2 и $-T_2$ и второй пары T'_2 и $-T'_2$, которые выше получились в результате передачи движения от валов двигателей на ведущие оси. Сила R_2 компенсируется суммой сил $-T_2$ и T'_2, причем от пар освобождаются силы T_2 и $-T'_2$. Последние силы приложены в точках соприкосновения

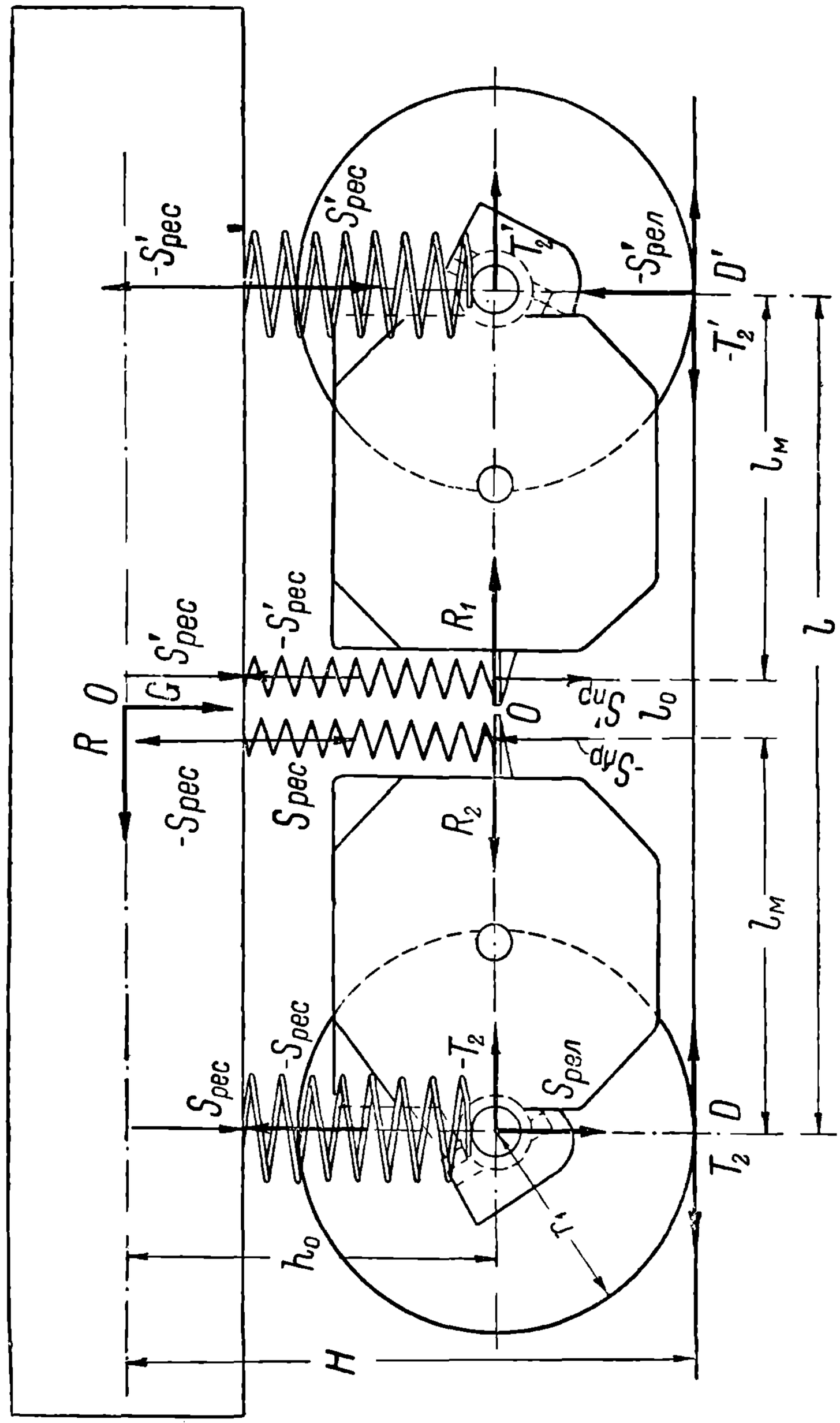


Рис. 416. Диаграмма усилий в двухосном подвижном составе при подвесноосевых двигателях.

колес с рельсами. Воздействуя на рельсы, они уравновешиваются реакциями последних, обозначенных на рисунке через D и D'. Силы же $-T_2$ и T_2, компенсирующие R_2, в сумме составляют общую силу тяги F_c. Нужно обратить внимание, что все силы T_2 и T'_2 на рис. 416 должны мыслиться приведенными к ободу колес, для чего их значения из рис. 415 должны быть умноженными на отношение $\frac{r_2}{r_1}$.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

ОПЕЧАТКИ

Стр.	*Строка*	*Напечатано*	*Должно быть*
370	1 сн.	пропуск	Кроме того, они должны мыслиться уменьшенными на величины внутренних сил сопротивлений движению.

Заказ 2070

НБ
УДУНТ
(ДІІТ)

Что касается указанной выше опрокидывающей пары RR_1, то эффект ее действия можно установить на основании соотношения:

$$M_{оп} = Rh_0 = R_i h_c + R_в h_в + R_и h_c + R_k h_k, \tag{416}$$

где h_0 определяет высоту положения равнодействующей сил всех внешних сопротивлений R.

Переходя теперь к выяснению окончательной картины действия всех сил, необходимо только сделать дополнительные разъяснения в ртношении сил $-S_{пр}$ и $S'_{пр}$. При рессорной подвеске действие рассматриваемых сил передается на надрессорную часть подвижного состава в виде сил $-S_{рес}$ и $S'_{рес}$, причем силы $-S_{пр}$ и $S'_{пр}$ уравновешиваются соответственными реакциями $S_{рес}$ и $-S'_{рес}$. Для выяснения действия силы $-S_{рес}$ нужно приложить к кузову по центральной линии действия буксовой рессоры две равные и противоположные силы $S_{рес}$ и $-S_{рес}$. В результате получается пара $-S_{рес}\,S_{рес}$ и сила $-S_{рес}$. Для последней характерно, что она передается через буксовые рессоры и напрягает их. В результате конечного эффекта при рассматриваемом типе подвижного состава она уравновешивается найденной выше силой $S_{рел}$, равной ей по величине (412) и (413). Точно такое же рассуждение приложимо и к силе $S'_{рес}$, эффект действия которой сводится к паре $-S'_{рес}S'_{рес}$ и силе $S'_{рес}$, уравновешиваемой также соответствующей силой $-S_{рел}$.

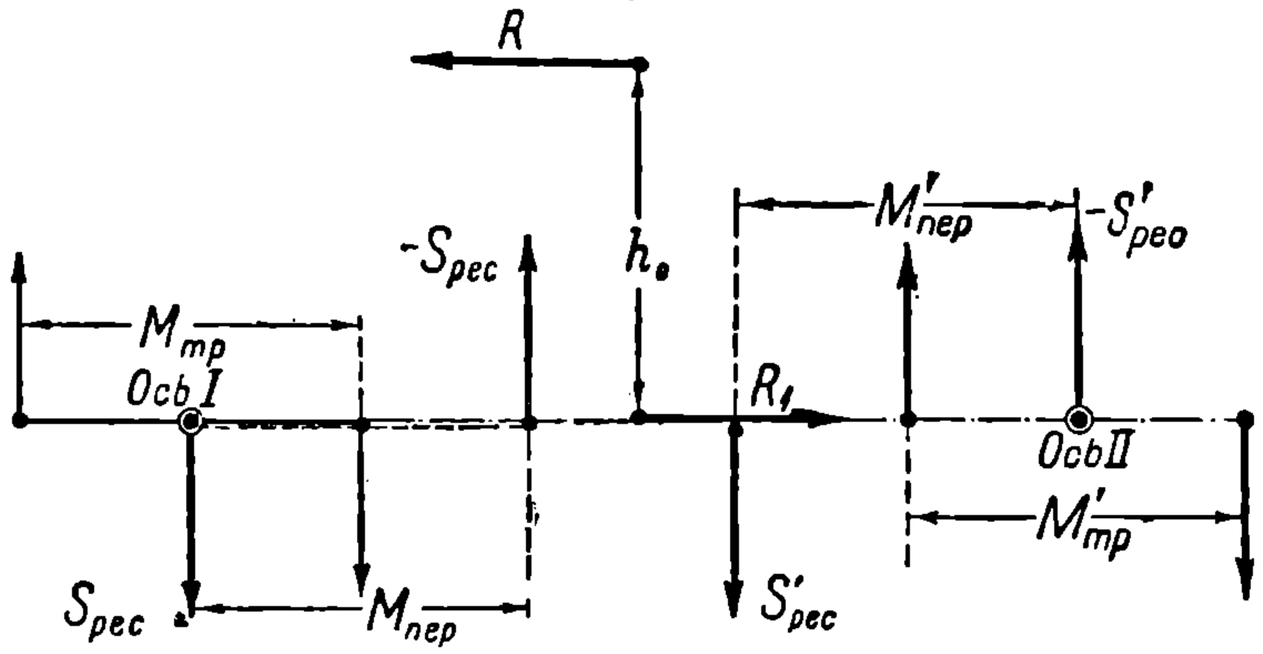


Рис. 417. Диаграмма результирующих усилий и моментов в двухосном подвижном составе при подвесноосевых двигателях.

Если теперь сопоставить действия всех сил, не уравновешенных соответствующими противодействиями, то они должны изобразиться согласно рис. 417. Все изображенные на рисунке пары, если взять их по отношению к оси I, производят опрокидывающий эффект, определяемый моментом:

$$M_{оп} = Rh_0 + M_{пер} + M'_{пер} - M_{тр} - M'_{тр}. \tag{417}$$

Далее следует принять во внимание на основании равенств (413) и (414) соотношение:

$$M_{пер} = S_{рес}\,l_м = \frac{M_3 r_2}{r_3} = M_2 + M_{тр}.$$

Для передней оси имеем такое же соотношение:

$$M'_{пер} = S'_{рес} l_м = M'_2 + M'_{тр}.$$

Отсюда выражение (417) принимает форму:

$$M_{оп} = Rh_0 + M_2 + M'_2.$$

Так как

$$M_2 + M'_2 = F_c r_1 = R_2 r_1 = Rr_1,$$

то окончательное выражение момента:

$$M_{оп} = Rh_0 + Rr_1 = RH. \tag{418}$$

Нетрудно видеть, что момент $M_{оп}$ стремится опрокинуть вагон около оси, проходящей через точки касания задних колес с рельсами. Это вызывает разгрузку передней оси и перегрузку задней. Значение этой недогрузки или перегрузки определяется выражением:

$$G_{оп} = \mp \frac{RH}{l}. \tag{419}$$

Следует особо отметить, что полученный опрокидывающий момент имеет место во всех системах подвижного состава. Сложнее дело обстоит с результирующим

НБ УГУНТ (ДІІТ)

давлением каждого колеса на рельс. В данном случае оно определилось только опрокидывающим моментом (418), так как другой фактор — силы $S_{рел}$ и $S_{рес}$ взаимно уравновесились. Однако, при некоторых конструкциях, главным образом, при наличии ведущих и бегунковых осей, такое равновесие может не получиться. Наиболее простой пример такого случая дает схема рис. 418, приводимая исследователем данного вопроса Linder'ом (Л. 237). Из трех осей здесь является ведущей с подвесноосевыми двигателями — средняя. Характерно здесь то, что основной опрокидывающий момент (418) никакого влияния на ведущую ось не оказывает, а уравно-

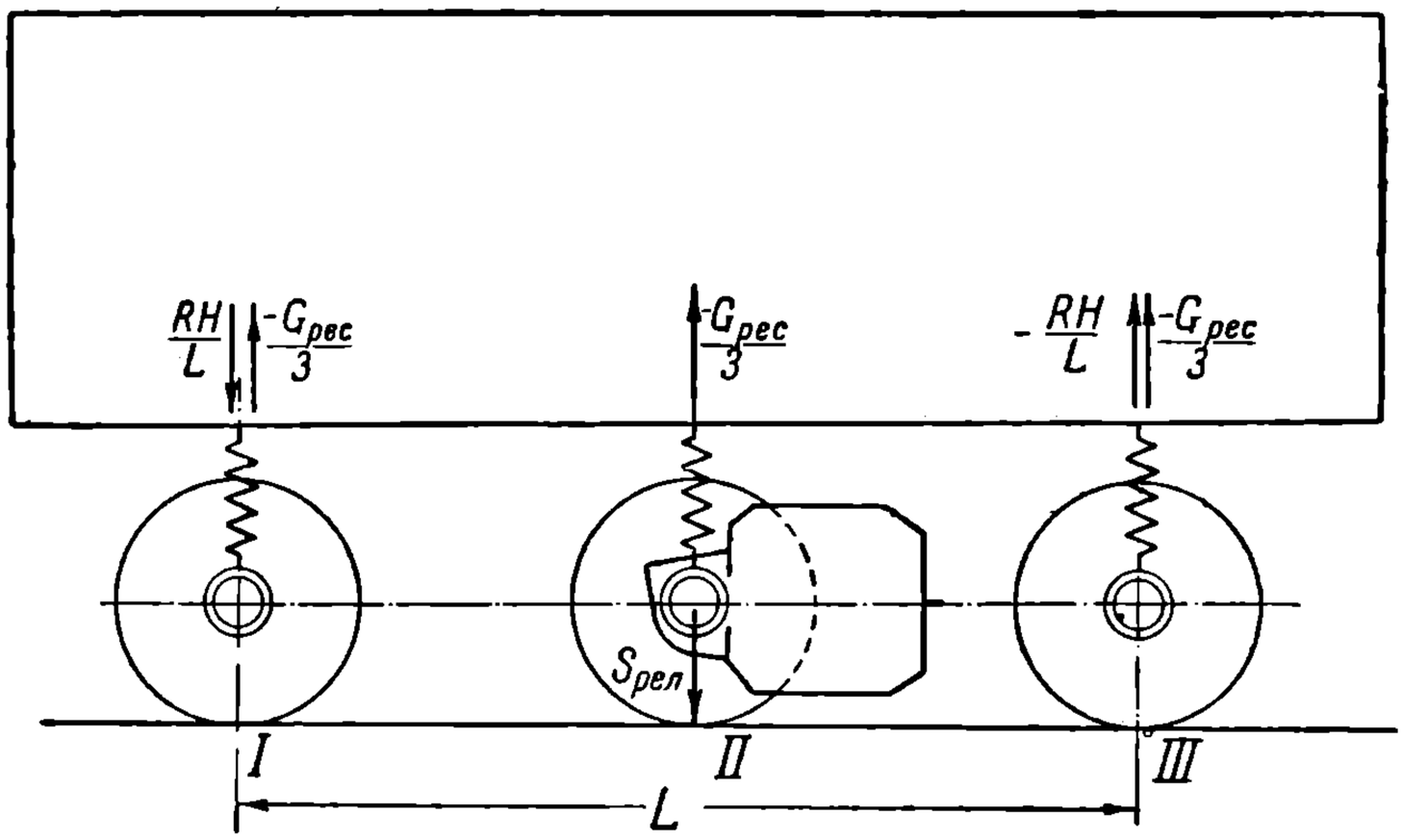


Рис. 418. Схема усилий в трехосном подвижном составе с одним центральным двигателем.

вешивается он действием на две крайние оси. Сила $S_{рел}$ здесь сохраняет свое полное значение. Что же касается силы $-S_{рес}$, то она, действуя на все надрессорное строение, поровну распределяется между всеми тремя осями. В результате изменение нагрузки первой оси на рельс определяется:

$$\left.\begin{aligned} G'_{рел} &= \frac{RH}{l} - \frac{S_{рес}}{3}, \\ \text{второй оси:}\quad G''_{рел} &= S_{рел} - \frac{S_{рес}}{3}, \\ \text{третьей оси:}\quad G'''_{рел} &= -\frac{RH}{l} - \frac{S_{рес}}{3}. \end{aligned}\right\} \qquad (421)$$

Весьма важно иметь в виду, что все приведенные соображения относительно сил $S_{рел}$ и $S_{рес}$ приложимы только к подвесноосевым двигателям. При тех индивидуальных передачах, в которых усилия на ведущие оси передаются не в одной точке, — в разобранных случаях — через место соприкосновения зубцов, — а в виде пар сил, картина распределения сил получается иная. Примером может служить передача с полым валом. Здесь на полый вал по общему правилу через большое зубчатое колесо передаются пары сил и индивидуальные силы. Легко сообразить, что с полого вала усилия на ведущие оси передаются в виде пар сил. Все же силы индивидуальные, связанные с зубчатым зацеплением, остаются в надрессорной части и, находясь в одной и той же части, непосредственно компенсируют друг друга, не вызывая напряжений в рессорах. Такое же распределение усилий получается при передаче Buchli и вообще при всех других передачах, при которых большое зубчатое колесо оказывается в надрессорном строении. То же самое относится к системам с непосредственной насадкой якоря на ведущие оси. Во всех этих случаях при выяснении распределения нагрузок между отдельными осями нужно считаться только с основным опрокидывающим моментом (418).

Для дальнейшего изучения вопроса о распределении сил в подвижном составе нужно выявить, каково оно у четырехосной системы подвижного состава при двух

НБ УДУНТ (ДІІТ)

поворотных двухосных тележках (рис. 419). При наличии у каждой тележки двух осей с нормально расположенными двигателями, силы $S_{рел}$ и $S_{рес}$ взаимно компенсируются, и потому здесь нужно считаться только с основными опрокидывающими моментами.

Если результирующая внешних сопротивлений, приложенных к кузову, равна R_1, то при перенесении ее действия на тележки на каждом шкворне получается сила $\frac{R_1}{2}$, противодействующая движению, и, кроме того, пара с моментом $R_1 h_1$, которая стремится разгрузить переднюю тележку и нагрузить заднюю.

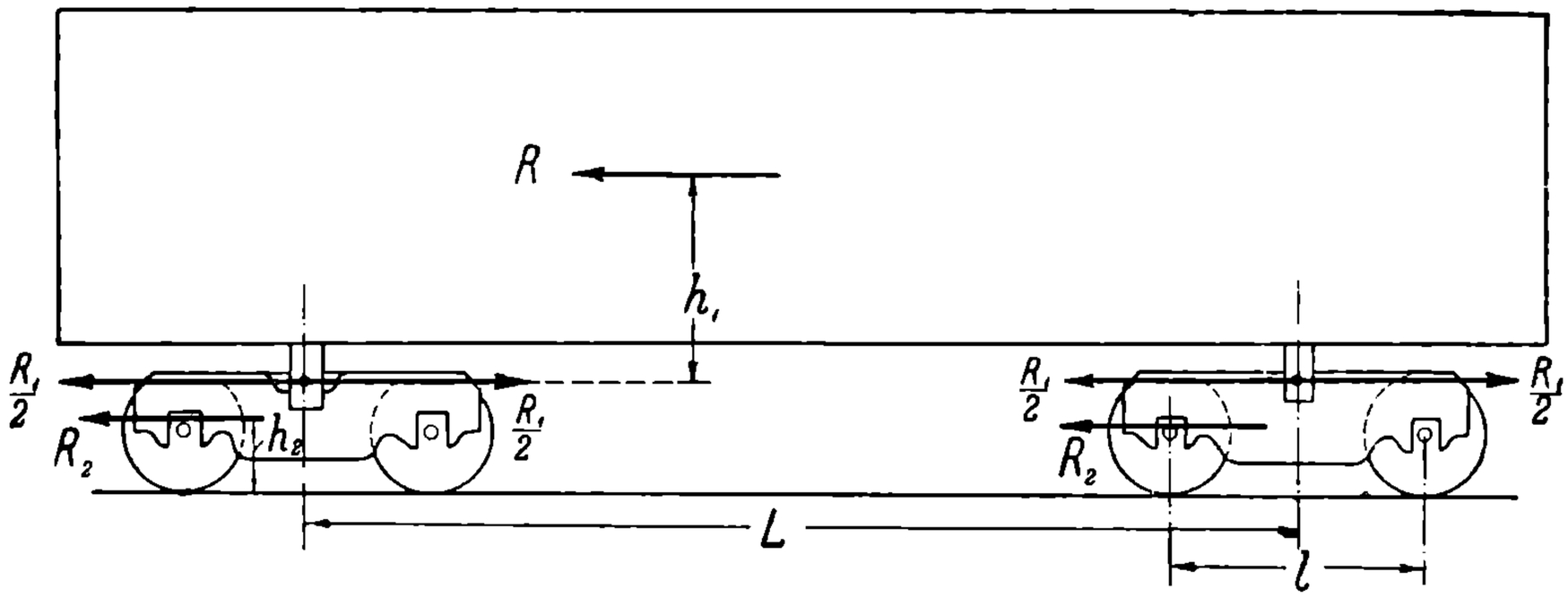


Рис. 419. Схема распределения усилий в четырехосном подвижном составе при подвесно-осевых двигателях.

Недогрузка или перегрузка тележек согласно предыдущему выводу определяется выражением:

$$G_{оп} = \mp \frac{R_1 h_1}{L}. \qquad (422)$$

Если далее обозначить через R_2 результирующую всех внешних сопротивлений тележек, включая силы $\frac{R_1}{2}$, передаваемые от кузова, и через h_2 высоты линий их действия над головками рельсов, то полные недогрузки и перегрузки передних и задних осей обеих тележек будут иметь выражения:

для передней:

$$G'_{оп} = -\frac{R_1 h_1}{2L} \mp \frac{R_2 h_2}{l}, \qquad (423)$$

для задней:

$$G_{оп} = \frac{R_1 h_1}{2L} \mp \frac{R_2 h_2}{l}. \qquad (424)$$

В том случае, если у поезда имеется прицепная часть и тяговый крюк прикреплен к кузову, в R_1 должно входить и усилие, необходимое для прицепного состава.

Сложнее дело обстоит с определением перераспределения веса, если осей в одной раме больше двух. Во всех этих случаях приходится решать по правилам механики совокупные системы уравнений.. Решение задачи при этом удобнее всего производить путем применения принципа замены сил внутренних связей внешними силами. Если в рассматриваемом случае искомым силам, перераспределяющим нагрузку на оси, противопоставить равные и противоположные реакции со стороны осей, то надрессорное строение, согласно законам механики, можно рассматривать отдельно от осей. Условия равновесия его будут такими же, как и в реальной обстановке, когда оно опирается на оси. В дальнейшем будем предполагать, что число осей будет n. Искомые реакции обозначим через N_1, N_2, ... N_n. При составлении уравнений равновесия, кроме этих сил, очевидно, нужно считаться с силами типа $S_{рес}$ и опрокидывающим моментом $M_{оп}$ (414). Ввиду того, что здесь действуют силы и моменты только в вертикальных плоскостях и системы подвешивания с обеих сторон подвижного состава симметричны, равновесие можно рассматривать, считая, что все силы и моменты действуют в одной централь-

НВ УИУНТ (ДІІТ)

ной вертикальной плоскости. При таком условии для равновесия надрессорного строения требуется соблюдение двух уравнений:

$$\left.\begin{aligned} \sum_{к=1}^{к=n} N_к &= \sum_{к=1}^{к=n} S_{рес_к} \\ \sum_{к=1}^{к=n} N_к l_к &= \sum_{к=1}^{к=n} S_{рес_к} l_к + M_{оп} \end{aligned}\right\}. \qquad (425)$$

Первое уравнение — для сил. Второе уравнение моментов, причем моменты могут браться относительно любой точки. Через $l_к$ обозначены плечи действия соответствующих сил относительно выбранной точки моментов.

Для решения задачи в общем виде этих двух уравнений достаточно только в случае двух осей. При таком условии получается два уравнения с двумя неизвестными N_1 и N_2. Для числа осей, превышающего этот предел, задача становится неопределенной. Решить эту задачу можно только путем некоторых предположений, достаточно достоверных, но не абсолютных. Предполагается, что искомые реакции, действующие от осей на рессоры, подчинены законам упругих сил, как это следует из уравнения (387). Дальше допускается, что разности величин между деформациями любой рессоры и двумя соседними, находящимися от нее по ту и другую стороны, пропорциональны расстояниям a между теми же парами рессор. Это условие выражается соотношением:

$$\frac{z_к - z_{к-1}}{z_{к+1} - z_к} = \frac{a_{к(к-1)}}{a_{к(к+1)}}.$$

Или иначе, исходя из выражений (387), данное соотношение можно изобразить в виде:

$$\frac{\frac{N_к}{p_к} - \frac{N_{к-1}}{p_{к-1}}}{\frac{N_{к+1}}{p_{к+1}} - \frac{N_к}{p_к}} = \frac{a_{к(к-1)}}{a_{к(к+1)}}. \qquad (426)$$

Уравнений типа (426) составляется такое количество, чтобы в совокупности с уравнениями (425) их получилось число, равное числу неизвестных n. Решение уравнений частично упрощается потому, что жесткости рессор p по большей части бывают одинаковыми.

Вышеразобранное решение вопроса сводилось к установлению реакций N, а следовательно и соответствующих им сил, которые должны через рессоры передаваться на оси. Путем комбинирования полученных таким образом сил по отдельным осям с соответствующими силами типа $S_{рел}$ на тех же осях можно установить результирующие силы, перераспределяющие нагрузки между отдельными осями (Л. 337).

Для подвижного состава с поворотными тележками приведенные соображения в основе остаются в силе. Однако, здесь могут быть три случая, несколько отличающиеся друг от друга. Наиболее простой случай, когда тележки не связаны одна с другой. При данной конструкции уравнения равновесия и упругих деформаций составляются отдельно для каждой тележки, причем опрокидывающие моменты для них определяются так, как это было уже сделано при разборе четырехосного вагона (рис. 419). Во втором случае, являющемся характерным для большинства электровозов, приходится иметь дело с поворотными тележками, соединенными сцепным шарниром. Тяговый крюк здесь крепится к тележкам, и тяговое усилие передается от тележки к тележке через сцепной шарнир. Наиболее простое решение задачи о распределении сил при сочлененной конструкции тележек получается в том случае, если сочленение является свободным в вертикальном направлении. Никаких вертикальных сил от одной тележки к другой здесь передаваться не будет. Отличие расчета от предыдущего будет заключаться только в том, что здесь опрокидывающие моменты для отдельных тележек при различии в высоте положения тягового крюка и сцепного шарнира будут неодинаковы. Для передней тележки опрокидывающий момент от силы тяги будет

НТБ УГУНТ (ДІІТ)

определяться силой, равной половине общей силы тяги электровоза и действующей на плече, равном высоте положения сцепного шарнира. Тележка же задняя будет подвергаться действию двух противоположных по знаку моментов, получающихся от полной силы тяги, действующей на высоте тягового крюка, и от силы, равной половине общего тягового усилия и действующей на высоте сцепного шарнира.

Более сложное решение задачи получается при тех конструкциях, при которых сцепной шарнир передает вертикальные силы от одной тележки к другой. В этих случаях в уравнение (425) нужно вводить два новых неизвестных — реакции от указанных вертикальных сил и их моменты. При таком условии для нахождения основных осевых реакций и реакций шарнирного сцепления приходится решать уравнения не отдельно для каждой тележки, а совместно для обеих. Вопрос упрощается тем, что реакции шарнирного сцепления для той и другой тележки, очевидно, должны быть равны и прямо противоположны по направлению.

То или другое устройство междутележечного соединения может оказать существенное влияние на перераспределение нагрузок между отдельными осями. В некоторых случаях находят применение свободные в вертикальном направлении соединения, а в других случаях глухие. Часто может оказаться выгодным применять междутележечные сцепки с таким зазором, при котором в определенных интервалах изменения силы тяги соединение работает в виде свободного, а затем после исчерпания всего зазора оно начинает работать при взаимном касаний тележек.

Кроме типа междутележечного соединения, высоты его положения и положения тягового крюка и других разобранных выше факторов, на перераспределение нагрузок между осями может оказывать также влияние тип опор и шкворневых пят, с помощью которых кузов опирается на тележки.

Задача о перераспределении нагрузки между отдельными осями обычно сводится к требованию определить так называемый коэфициент перераспределения сцепного веса. В большинстве случаев принято считать, что последний представляет собою отношение

нагрузки наиболее разгруженной оси к средней осевой нагрузке в нерабочем состоянии подвижного состава.

Нужно иметь в виду, что трактуемый коэфициент сцепного веса, как правило, при прочих равных условиях получается наибольшим при таком выборе параметров подвижного состава, при котором общий эффект разгрузки распределяется поровну между всеми загружающимися ведущими осями при возможно большем их числе из общего числа сцепных осей.

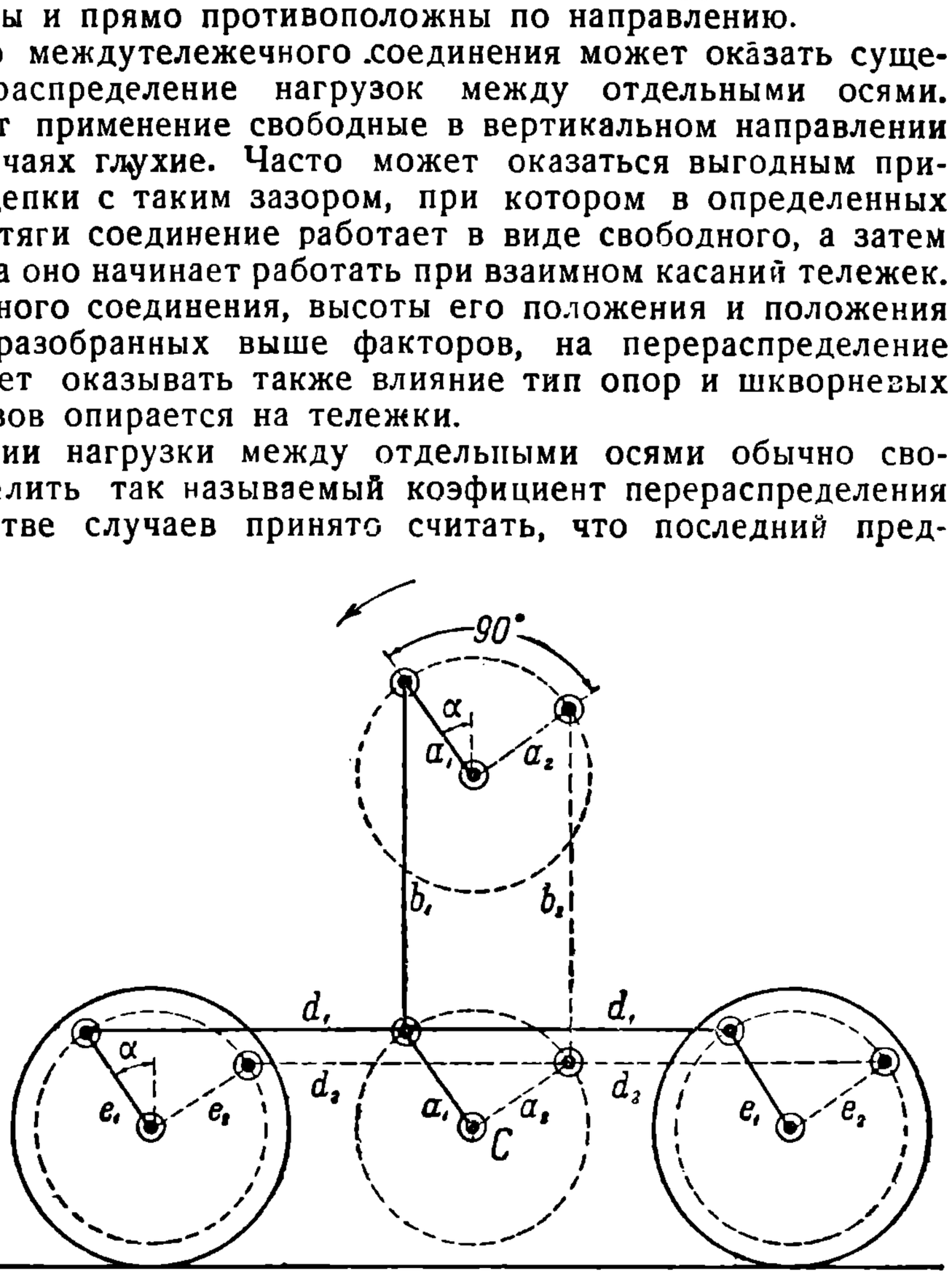


Рис. 420. Схема рычажной передачи с отбойным валом.

3. Рычажные передачи.

Рычажные передачи с отбойным валом. Данный тип передач принадлежит к числу групповых (рис. 420). Движение от вала двигателя с помощью кривошипов a_1 и a_2 и шатунов b_1 и b_2 передается на вал C. Назначение последнего воспринимать те удары и толчки, которые передаются от пути полускатом на передачу и двигатели. В соответствии со своим назначением ограждать от жестких ударов двигатели, данный вал носит название отбойного. Движение от отбойного вала передается тягами-спарниками d_1 и d_2 на кривошипы e_1 и e_2 ведущих колес. Система спарников с их кривошипами образует один общий механизм, носящий название дышла.

В разбираемой системе передачи, как и вообще во всех подобных кривошипно-шатунных механизмах, усилие, передающееся от кривошипа на соответственный

НБ УГУНТ (ДІІТ)

шатун, зависит от угла поворота кривошипа α. При условии $\alpha = 90°$, усилие, передаваемое на шатун, будет наибольшим, а при $\alpha = 0$ оно будет равно нулю. Для того, чтобы иметь на ведущих осях непрерывные тяговые усилия, нормально все рычажные передачи делаются двухсторонними со сдвигом кривошипов на угол 90°.

Примерами локомотивов с рычажными передачами могут служить типы, приведенные на рис. 421, 422 и 423. Первый локомотив имеет рычажную передачу с вертикальным шатуном, второй — с наклонным, а третий дает решение вопроса о рычажной передаче для случая двух двигателей. Из дальнейшего изложения теории передачи выяснится, что наклонные системы шатунов, особенно при двух двигателях, дают меньшие напряжения в отдельных звеньях передачи. Интересный тип электровоза, оборудованного Bergmann'ом с двигателем рекордной мощности в 3000 PS, приведен

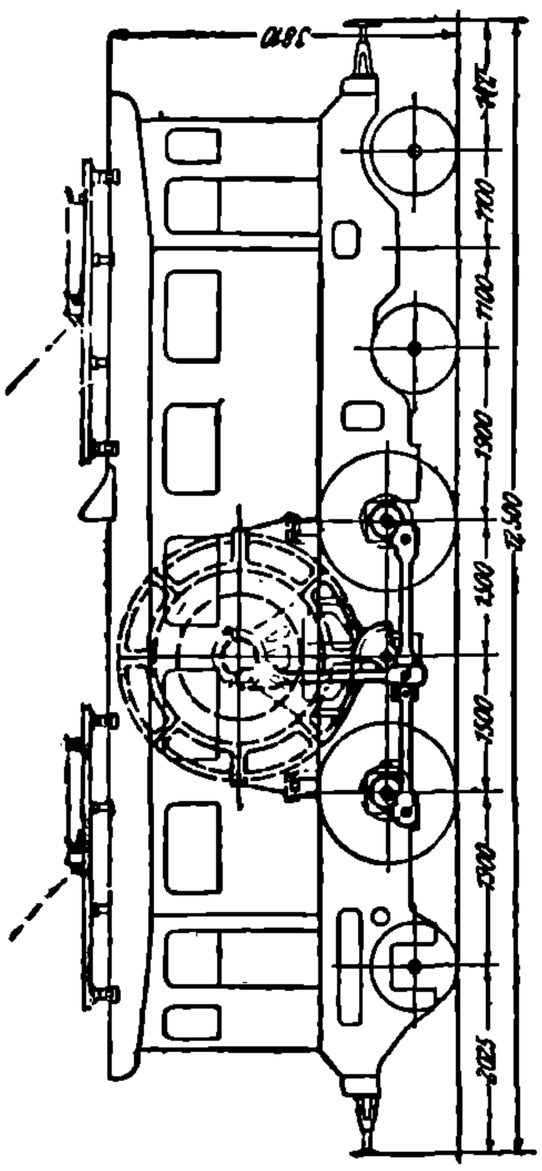


Рис. 421. Электровоз с рычажной передачею и вертикальным шатуном германских ж. д.

на рис. 424. Отличительною его особенностью является наличие при одном двигателе двух отбойных валов. Благодаря тому, что кривошипы не только на противоположных сторонах, но и на одной и той же сдвинуты под углом в 90°, здесь получается равенство тяговых усилий с той и другой стороны локомотива. Последнее свойство сообщает электровозу более спокойный и плавный ход.

Рычажные передачи без отбойного вала. Отбойный вал представляет собою тяжелую часть передачи, которая к тому же подвергается большим напряжениям. Ввиду этого были предложены конструкции рычажных передач без отбойных валов. В основе их лежат трехзвенные рамы Kando, широко применявшиеся на электровозах итальянских железных дорог (рис. 425). Вместо отбойного вала, компенсирование ударного эффекта здесь достигается применением кривошипного ползуна *a*, принцип действия которого можно более ясно себе представить из

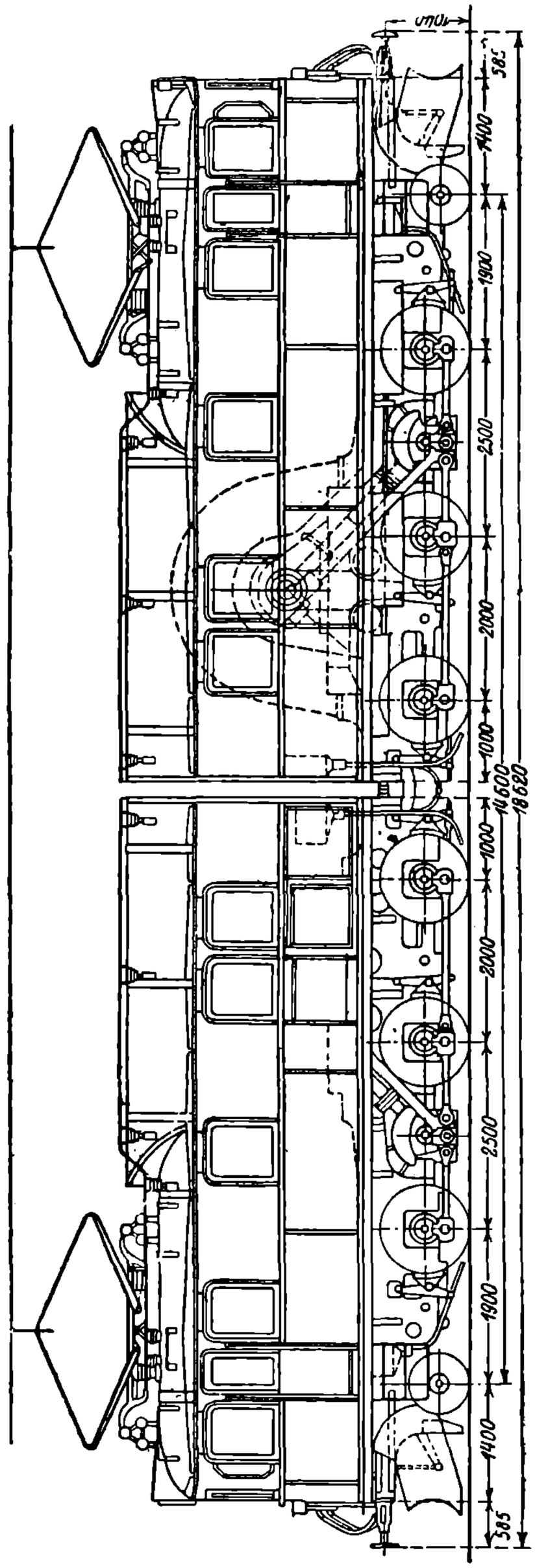


Рис. 422. Электровоз с рычажной передачею и наклонным шатуном завода SSW.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

рис. 437. Благодаря такому ползуну передача тангенциальных тяговых усилий идет нормальным образом. Что же касается вертикальных ударных перемещений полускатов и перемещений, вообще связанных с игрой рессор, то они разряжаются

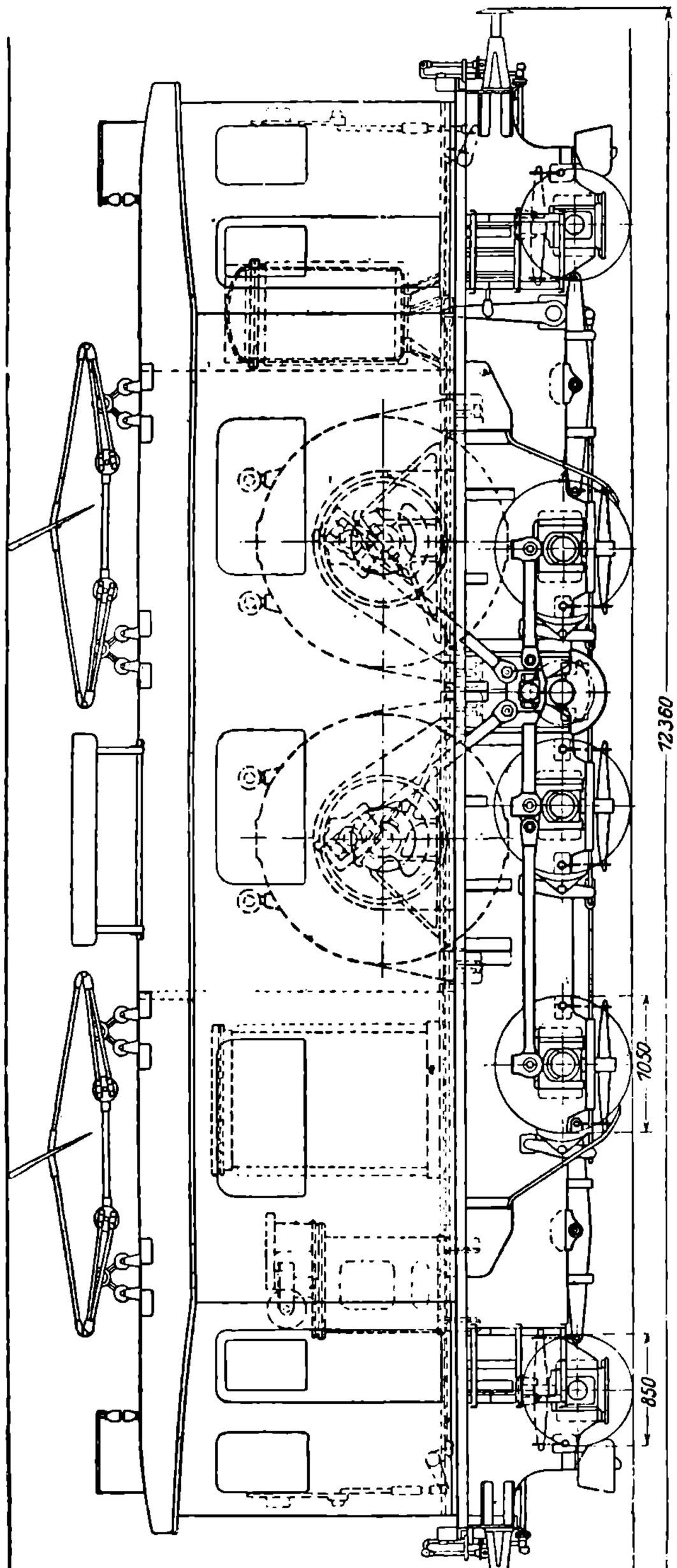


Рис. 423. Электровоз с двумя двигателями при рычажной передаче с одним отбойным валом завода SSW.

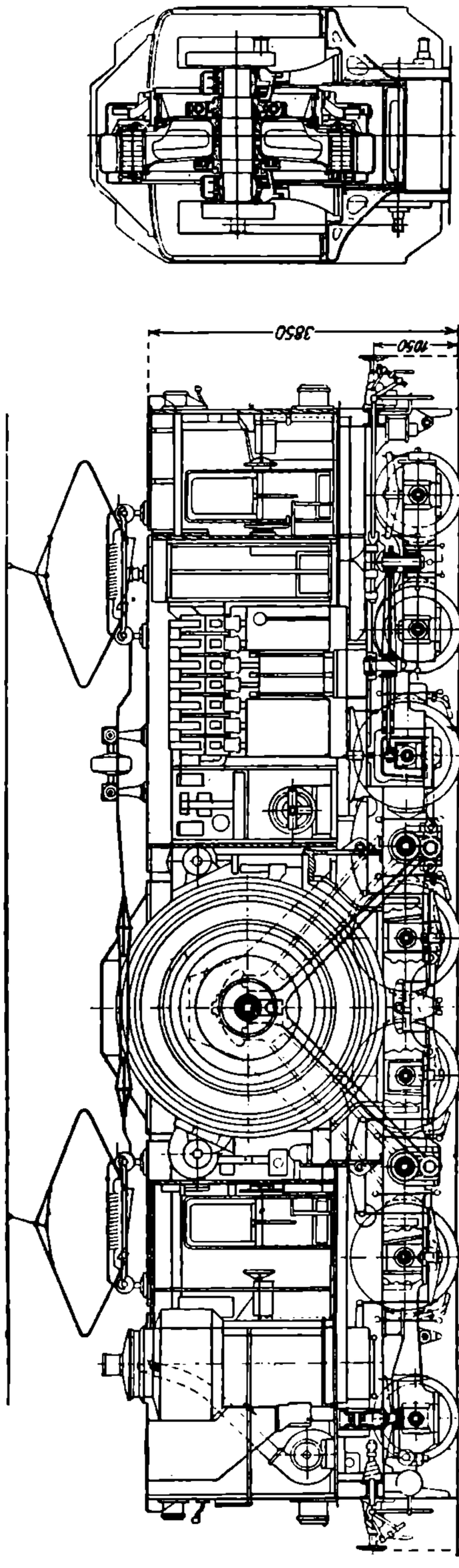


Рис. 424. Рычажная передача с двумя отбойными валами при одном двигателе завода Bergmann'a.

путем свободного вертикального перемещения пальцев кривошипов. Как будет объяснено ниже, в системе Kando поперечное звено рамы практически не испытывает напряжений, и потому Buchli предложил конструкцию двухзвенной системы, примененную на некоторых типах швейцарских и французских электровозов (рис. 426). Для придания всей системе большей эластичности и меньшей зависимости от неточности сборки и центровки один из шатунов соединяется с кулисою шарнирно.

НБ УГЛУНТ (ДІІТ)

Существенным недостатком передачи с кулисным ползуном является большая его тяжесть, трудность его смазки и необходимость в тяжелых противовесах. Ввиду этого Kando предложил передаточный механизм, в котором свойства, присущие предыдущей системе, достигаются с помощью шарнирного треугольника или четырехугольника, соединяемых с пальцем ведущего кривошипа и смежными спарниками посредством коленчатых рычагов (рис. 427). Благодаря такому устройству, данный механизм выполняет, по существу, передачу тягового усилия, как при жесткой раме Kando.

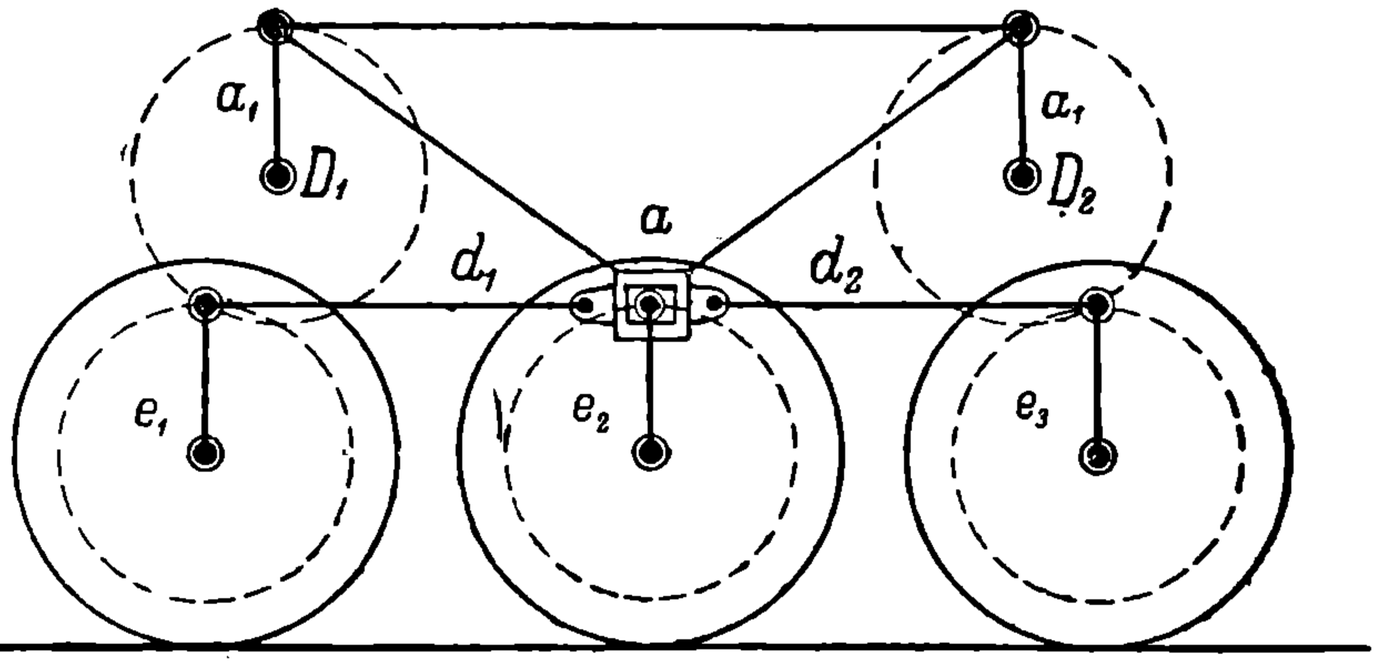


Рис. 425. Схема передачи Kando без отбойного вала с кулисным камнем и жесткой трехзвенной рамой.

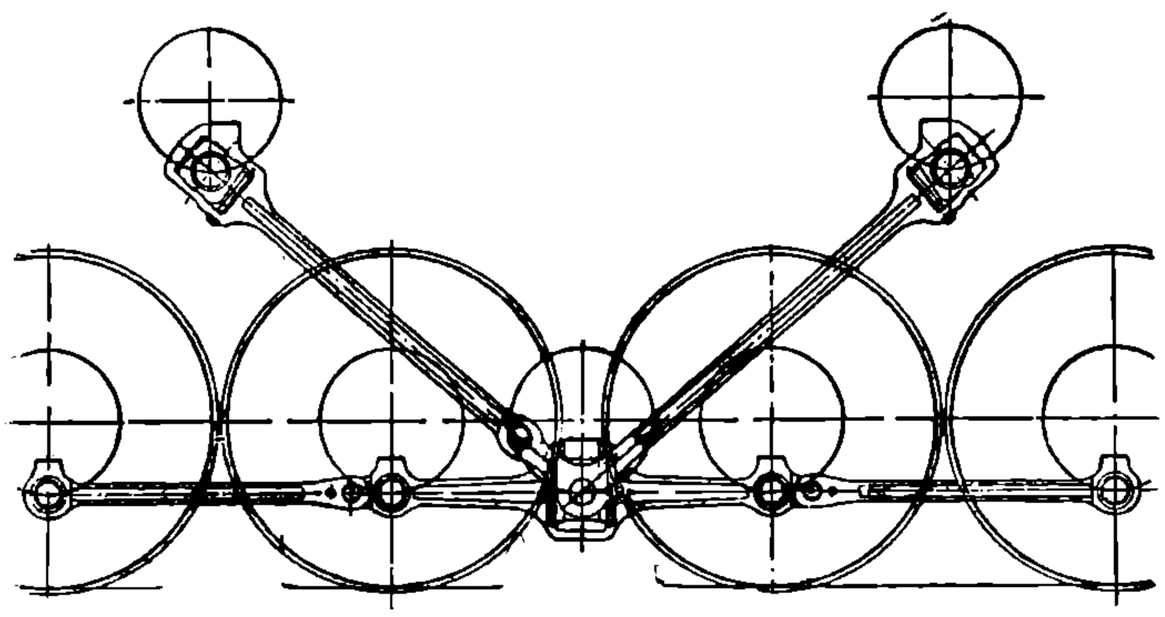


Рис. 426. Двухзвенная рычажная передача электровоза дороги Paris-Orléans.

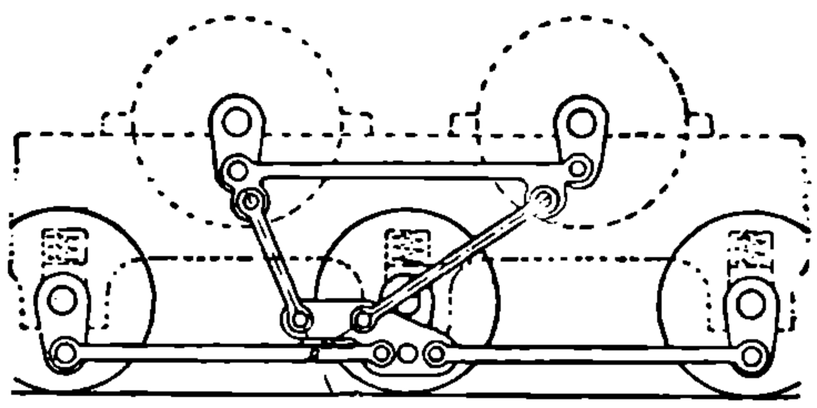


Рис. 427. Четырехзвенная свободная рама Kando.

а вместе с тем разряжает и удары при вертикальных перемещениях полуската и надрессорного строения путем свободного передвижения звеньев треугольника и коленчатых рычагов. Как варианты шарнирной системы Kando, имеются и другие конструкции, из коих внимания заслуживает система Blanchi (Л. 220).

4. Зубчато-рычажные передачи.

Характерной особенностью этой системы является передача движения от вала двигателя помощью зубчатых колес на промежуточный вал, с которого тяговые усилия посредством кривошипов и спарников передаются на ведущие оси (рис. 428). Такая система дает возможность, с одной стороны, избежать длинных шатунов, сильно осложняющих работу передачи и ее выполнение, с другой же стороны, она дает возможность применить быстроходные тяговые двигатели.

С точки зрения напряжений, действующих в отдельных частях механизма, как будет выяснено в последующем, наиболее рационально помещать центры ведущих осей и промежуточного вала на одном уровне. Однако, очень часто, из-за необходимости, по условиям передаваемой мощности, иметь большие диаметры зубчатых колес, приходится для этого ось промежуточного вала поднимать над осью полускатов. Если не прибегнуть к каким-либо добавочным приспособлениям и базироваться лишь на эластичности системы, то такой подъем во избежание вредных напряжений не берут выше 10—30 mm.

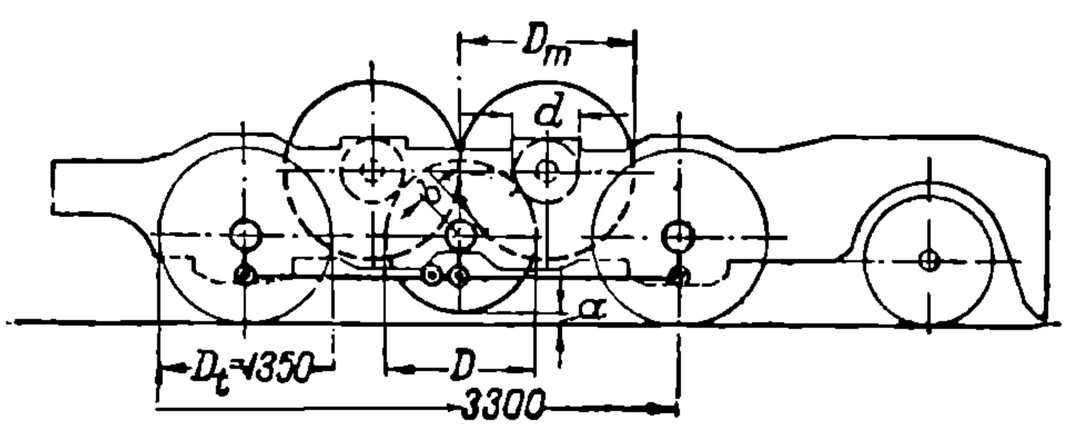


Рис. 428. Схема зубчато-рычажной передачи.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Больший подъем можно получить при применении кулисного ползуна (рис. 429). В этом случае тангенс подъема можно доводить до 0,08 при величине h до 75—120 mm. Применение кулисного ползуна возможно и при двух двигателях. В таких случаях в качестве передаточного механизма от валов двигателя к ведущим осям применяется обычно жесткая рама Kando. Примером может служить электровоз Лебчергской железной дороги завода Oerlikon общей мощностью около 2500 PS (рис. 430). Высота подъема промежуточного вала здесь может доводиться до 200—300 mm.

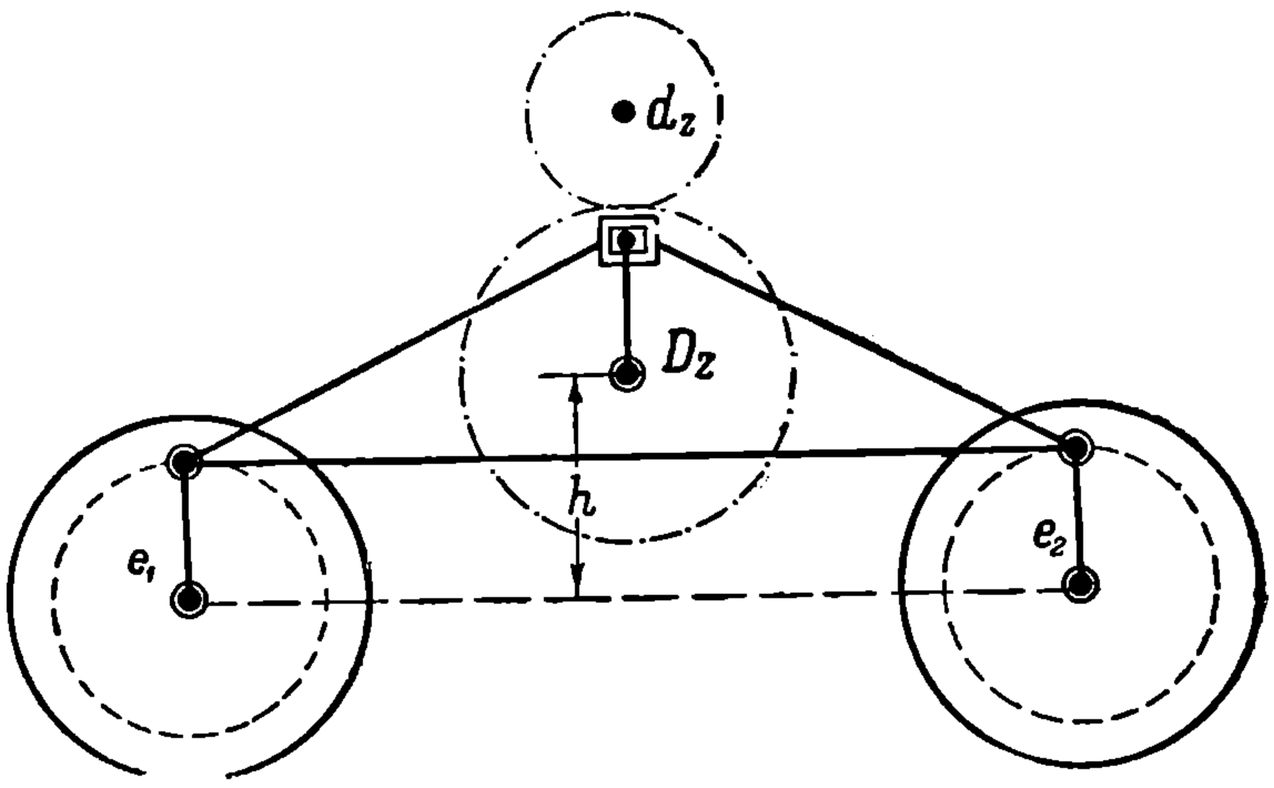


Рис. 429. Схема зубчато-рычажной передачи с кулисным камнем.

Механизм Kando требует двух двигателей. В этом случае система работает с одинаковыми движениями обоих валов. Анализ этой системы, произведенный немецким исследователем Kleinow'ым, показал, что работа такой передачи возможна и при одном двигателе, ординарном или сдвоенном безразлично (рис. 431). При такой комбинации второй вал обращается в вал вспомогательный, обеспечивающий правильную кинематику системы. Напряжение его значительно меньше, чем у основного вала, всего около 40%. Для того, чтобы еще лучше разгрузить кривошипы и вспомогательный вал от приходящихся на них от рамы усилий, подшипник для него c сделан качающимся около точки a. Фиксация подшипника и уравновешивание действующих на него усилий производятся с помощью пружинного поршня, который находится в цилиндре, имеющем возможность совершать также некоторое колебательное перемещение около шарнира b. С такой системой передачи выполнено значительное количество локомотивов для государственных швейцарских железных дорог.

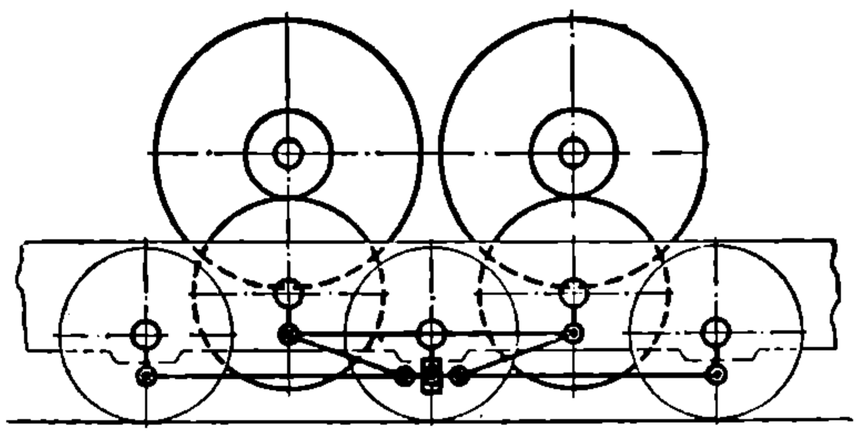


Рис. 430. Схема зубчато-рычажной передачи с кулисным камнем и жесткой рамой Kando.

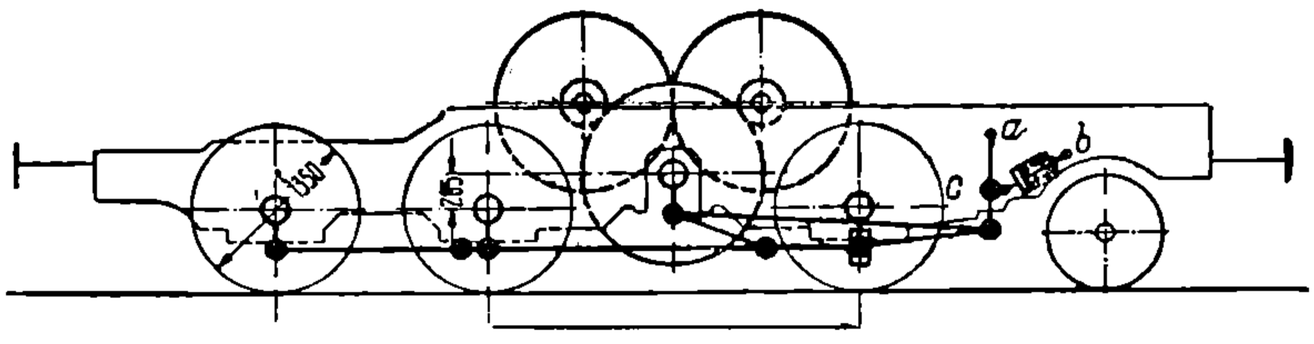


Рис. 431. Схема зубчато-рычажной передачи с несимметричной передаточной рамой.

Большие затруднения, связанные с кулисным камнем, заставляют искать конструкций, обеспечивающих без него надлежащее поднятие передаточного вала. Одним из решений этой задачи является система передачи, примененная на одной из серий локомотивов тех же швейцарских железных дорог рис. 432). Здесь между кривошипом промежуточного вала и ведущим кривошипом применен длинный шатун. Наклон его берется относительно небольшим при тангенсе около 0,08, но, благодаря большой его длине, повышение центра промежуточного вала получается порядка 250—280 mm. Недостатком этого механизма является трудность точно центровать отдель-

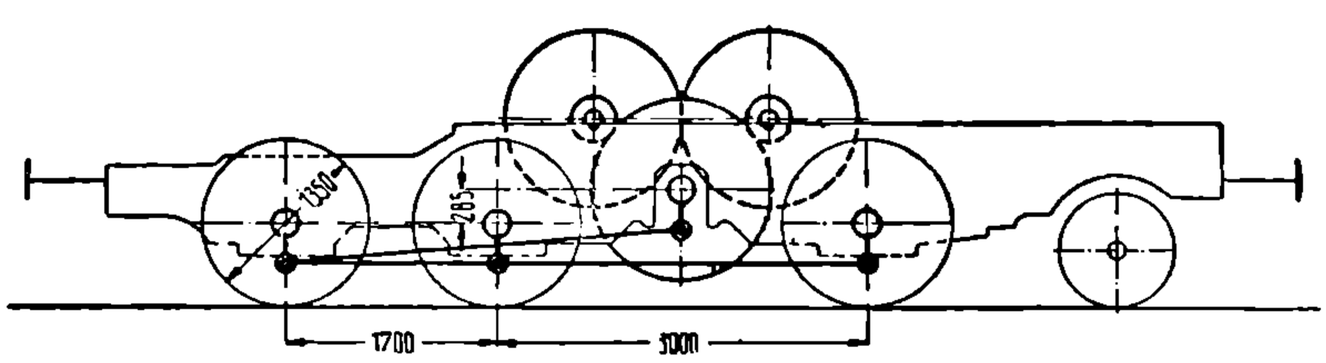


Рис. 432. Схема зубчато-рычажной передачи с длинным шатуном.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ные его звенья из-за слишком длинного шатуна, и как результат этого — легкая возможность возникновения паразитных колебаний всей системы передачи.

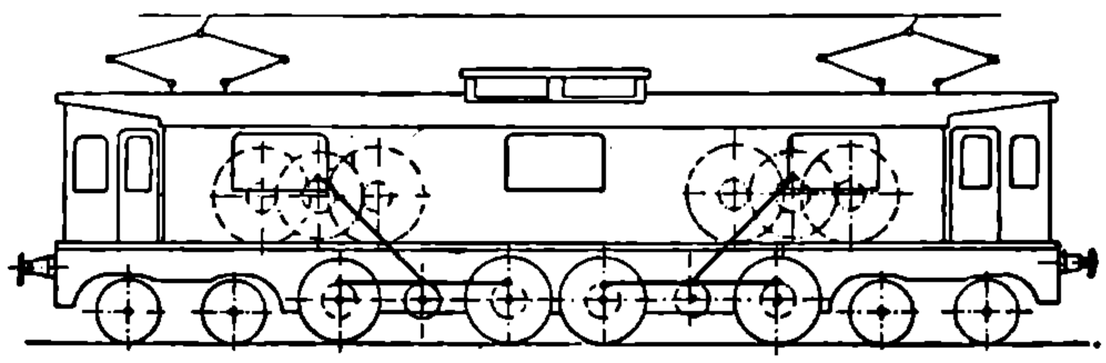


Рис. 433. Схема зубчато-рычажной передачи с высоко лежащими двигателями.

Наиболее совершенно с конструктивной точки зрения разрешает вопрос о поднятии передаточного вала система, представленная на рис. 433. В данном случае движение с промежуточного вала передается длинным шатуном на отбойный вал, от которого далее переносится на ведущие оси обычными дышлами. При такой системе можно свободно распоряжаться габаритом электровоза, иметь высокое положение центра тяжести и не иметь ползунных кулис. Однако, широкому распространению этой системы противодействуют сложность конструкции и плохой коэфициент полезного действия. Применена она на отдельных электровозах германских и австрийских железных дорог.

5. Силы, действующие в групповых передачах.

Зубчато-рычажные передачи. Распределение усилий в отдельных звеньях рычажных и зубчато-рычажных передач подчиняется сложной зависимости. Вопрос, главным образом, осложняется тем, что эти передачи представляют собою системы статически неопределимые. В данной главе предполагается дать анализ усилий, имеющих место в отдельных звеньях наиболее важных из только что приведенных передач. Разбор намеченной задачи предполагается вести, исходя предварительно из зубчато-рычажной системы, так как она по кинематике проще чисто рычажной.

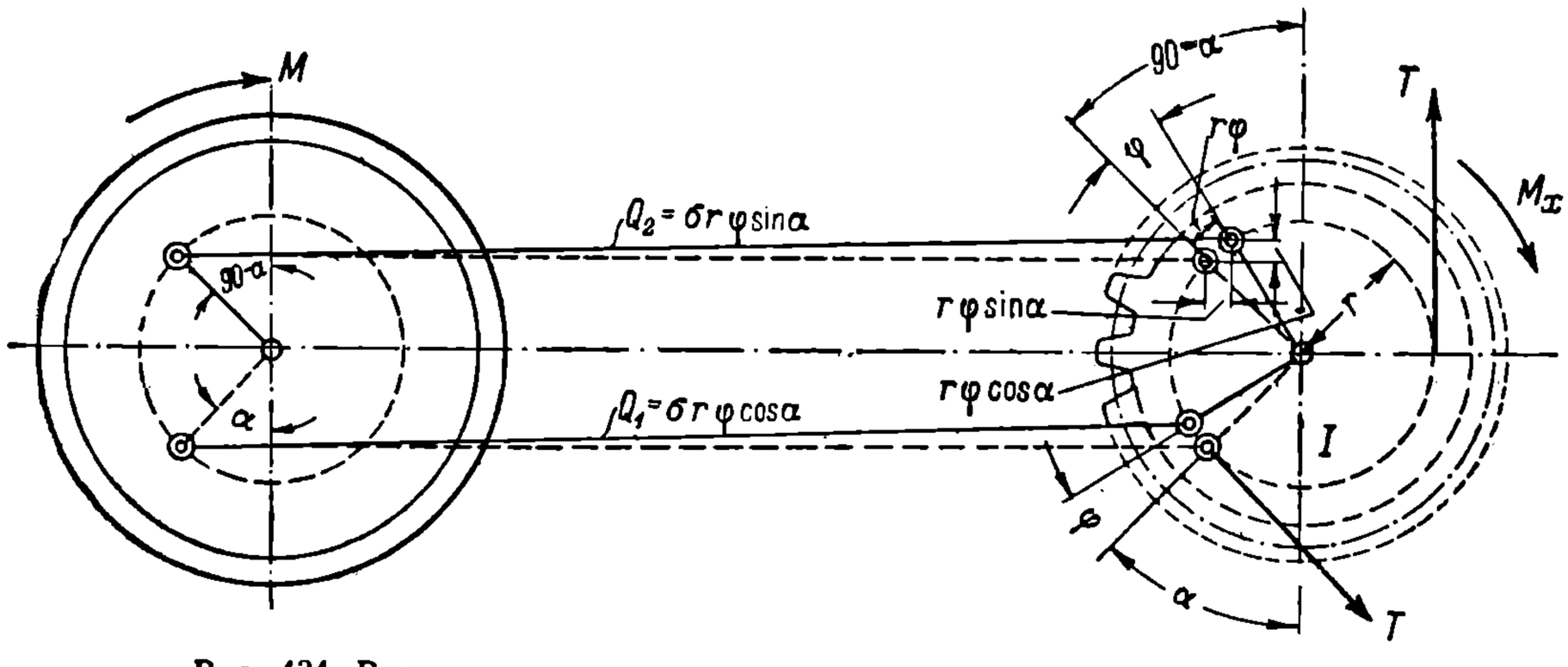


Рис. 434. Распределение усилий в звеньях зубчато-рычажной передачи.

Основной элемент зубчато-рычажной передачи, входящий в том или ином виде во все передачи подобного типа, представлен на рис. 434. Как из него видно, на периферии движения кривошипного пальца нужно представить себе тангенциальную силу сопротивления T, которую можно мыслить приложенной в любой точке периферии. На схеме для примера показаны две такие точки. Момент вращения M_x двигателей образует такую же по величине силу T, компенсирующую первую:

$$M_x = Tr. \tag{427}$$

Согласно данной схеме вращающий момент, получаемый на ведущих осях, будет передаваться с помощью двух спарниковых тяг, из которых одна находится по одну, а другая — по другую сторону электровоза. Обозначив напряжения в этих тягах через Q_1 и Q_2, можно написать выражение для момента M, получаемого на ведущих осях, в виде:

$$M = Q_1 r \cos\alpha + Q_2 r \sin\alpha. \tag{428}$$

НБ УПУНТ (ДІІТ)

Если пренебречь потерями в передаче и всякого рода паразитными колебаниями передаточного механизма, то можно считать:

$$M_x = M.$$

Точно определить величины Q_1 и Q_2 напряжений в соответствующих звеньях не представляется возможным, так как разбираемая система сил, как было отмечено, статически неопределима. Вопрос приходится решать предположительно, исходя из той достаточно верной предпосылки, что искомые напряжения пропорциональны деформациям, имеющим место в соответствующих звеньях. В основу последующего будет положено рассмотрение кривошипного механизма, у которого деформации будут предполагаться сосредоточенными исключительно в шатунах. Такой механизм в дальнейшем будет называться идеальным. В действительности, конечно, помимо шатунов, деформации будут иметь место и в других звеньях, например, в валах и кривошипах. Но эти деформации имеют относительно меньшее влияние на процесс передачи движения. При рассмотрении основного вопроса о движении можно ими пренебрегать, а учитывать их только в том случае, когда они могут иметь существенное влияние на процесс работы передачи.

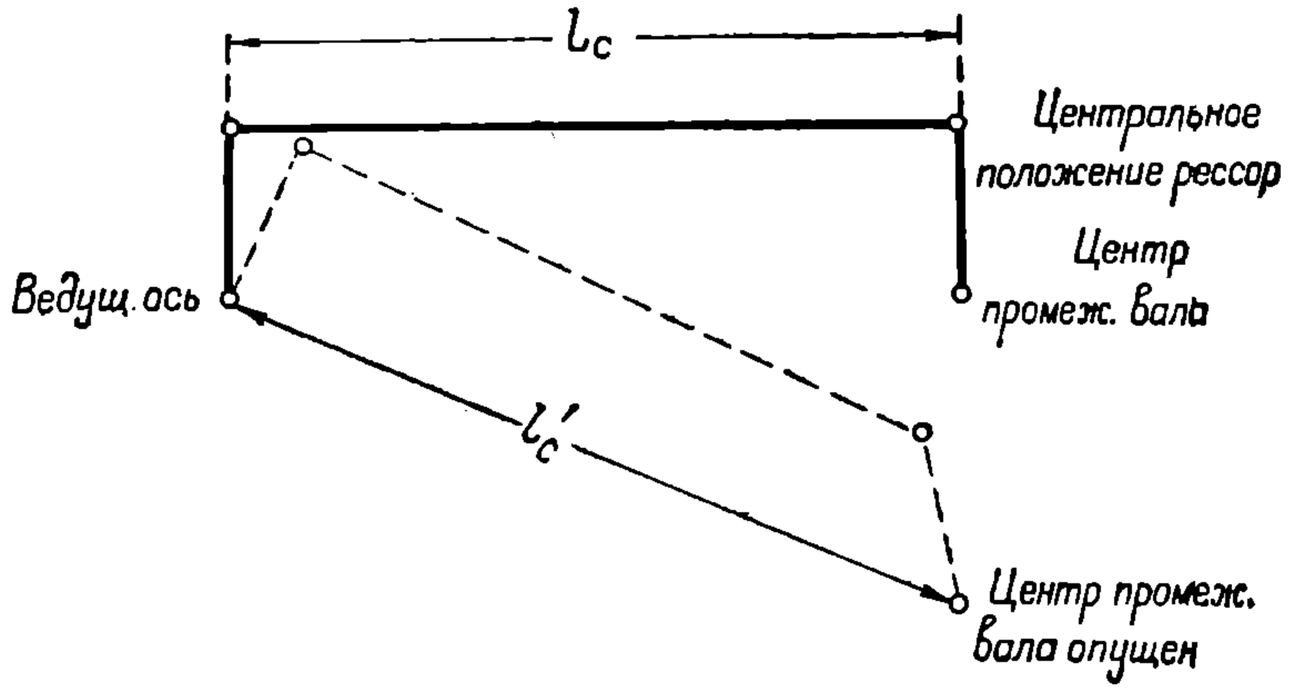


Рис. 435. Схема искажения рычажной передачи при игре рессор.

На основании сделанных предположений можно следующим образом установить значения Q_1 и Q_2. При передаче движения от передаточного вала к ведущим осям появляется неизбежный угол упреждения между ними. Если кривошипы ведомой оси повернулись на угол α, то кривошипы передаточного вала должны занять угол $\alpha + \varphi$. Угол упреждения получается из-за указанных деформаций шатунов. Чем больше угол упреждения, тем значительней эти деформации. При наличии деформации дуга упреждения для каждой точки передаточного вала, отнесенной к окружности вращения пальцев кривошипов, равна $r\varphi$. Проекция данной дуги на каждое данное направление шатуна даст, очевидно, величину деформации данного звена. Для случая, указанного на рис. 434, шатун *2* будет подвергаться деформации растяжения, величина которой определится значением $r\varphi \sin\alpha$, шатун же *1* будет испытывать деформацию сжатия, величина которой, согласно такому же разложению деформации, как и для шатуна *2*, будет равна $r\varphi\cos\alpha$. Согласно сделанным предположениям, силы Q_1 и Q_2, будучи соответственно предыдущему пропорциональны вызываемым ими деформациям, определятся выражениями:

$$Q_1 = \sigma r\varphi\cos\alpha \quad \text{и} \quad Q_2 = \sigma r\varphi\sin\alpha. \tag{429}$$

В данных выражениях σ означает в kg коэфициент жесткости шатунов, т. е. ту силу, которую необходимо приложить к шатунам для изменения их длины на единицу длины. Отсюда вращающий момент согласно уравнению (429):

$$M = \sigma r^2\varphi(\cos^2\alpha + \sin^2\alpha) = \sigma r^2\varphi. \tag{430}$$

Как показывает произведенный анализ, вращающий момент, передаваемый на ведущие оси при данном моменте сопротивлений, определяемых углом φ, является величиной постоянной, но напряжения в отдельных спарниках меняются по закону синуса и косинуса. При конструировании передаточных механизмов приходится весьма считаться с игрою рессор. Вследствие этой игры центр передаточного вала непрерывно перемещается по отношению к центрам ведущих осей. На рис. 435 приведена схема положений звеньев передачи при колебании рессор. Сплошными линиями показано среднее положение надрессорного строения, пунктиром же — его положение при осадке рессор. Как видно из схемы, вывод рессор из их среднего положения влечет за собою изменение линии центров l_c и, следовательно, нарушение

НТБ УИУНТ (ДІІТ)

параллельности кривошипов. В результате происходят добавочные перемещения рычажной передачи, неизбежно связанные с дополнительными в ней напряжениями, не учитываемые формулами (429). Простые соображения на основании рис. 438 показывают, что с точки зрения колебания рессор выгодно иметь одинаковый уровень высот центров передаточного вала и ведущих осей.

В случае указанной выше необходимости повысить по условиям мощности электровоза центр передаточного вала, условия работы механизма значительно ухудшаются. При таких конструкциях, как уже было указано, целесообразно удлинять шатун, давая ему небольшой угол наклона. Благодаря этому, согласно рис. 435, при колебании рессор должна получаться относительно меньшая разность между длинами шатуна и линии центров передаточного вала и ведущей оси.

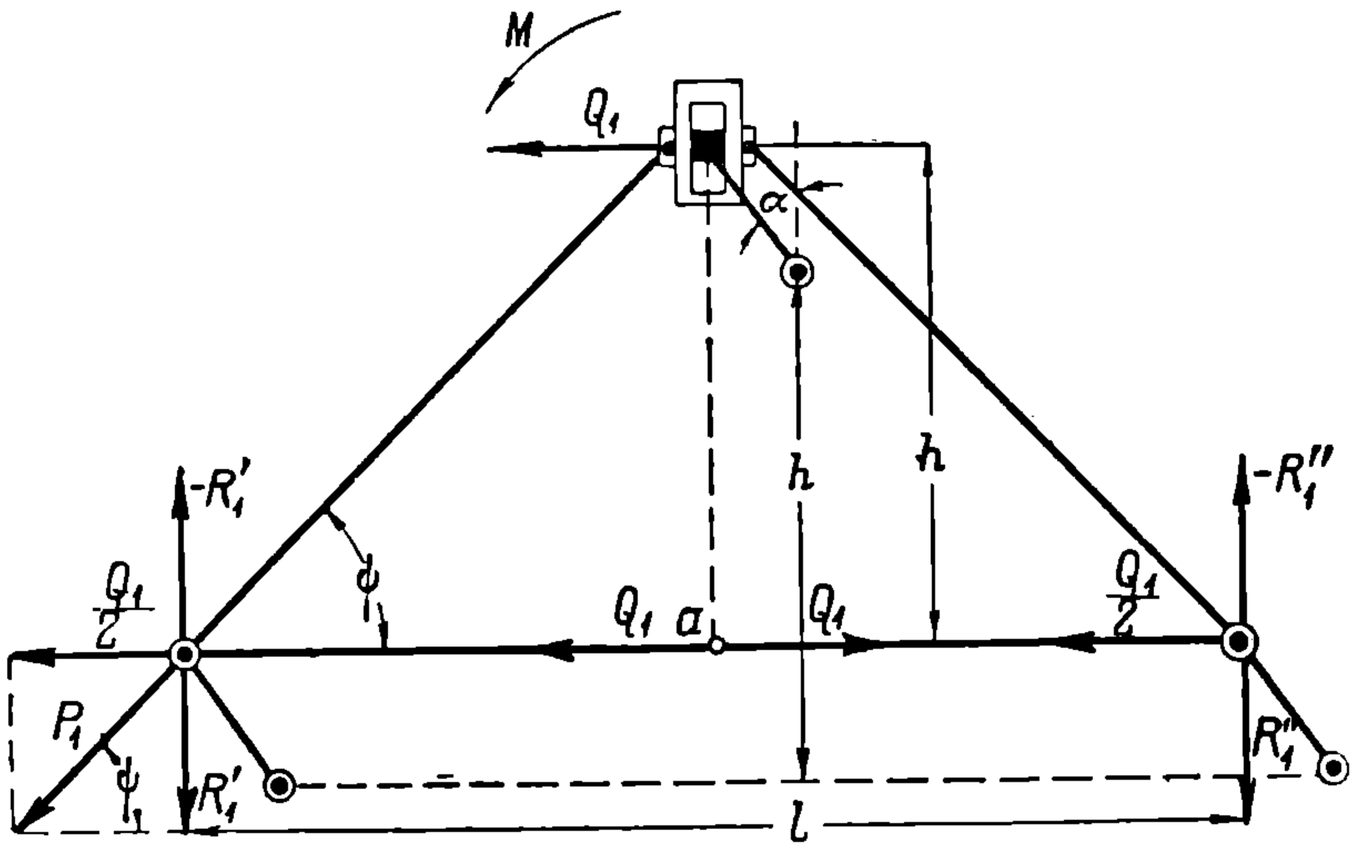


Рис. 436. Распределение усилий в передаче с кулисным камнем.

Распределение сил в передаточном механизме при поднятии уровня передаточного вала с помощью кулисного камня приведено на рис. 436. Этот рисунок легко уясняет, что в данной системе колебание рессор относительно мало отражается на деформациях рычажных звеньев. Заметив, что и в этой конструкции кривошипы каждой стороны заклинены под углом в 90°, нетрудно найти и здесь распределение сил по основным элементам передачи. Руководствуясь предыдущими соображениями, можно вывести следующие соотношения:

$$M = Tr = Q_1 r \cos\alpha + Q_2 r \sin\alpha,$$

где

$$Q_1 = T\cos\alpha \text{ и } Q_2 = T\sin\alpha.$$

Прикладывая мысленно в точке a две равные и противоположно направленные силы Q_1, мы одну из них, в данном случае направленную влево, реализуем в виде сил $\frac{Q_1}{2}$, действующих на пальцы кривошипов ведущих осей. Сила же, направленная вправо, образует с такой же силой, приложенной к кулисному камню, пару с моментом $Q_1 h$. Таким же самым образом на другой стороне механизма к пальцам кривошипов ведущих осей окажутся приложенными силы $\frac{Q_2}{2}$, и также будет иметь место момент $Q_2 h$. Силы $\frac{Q_1}{2}$ и $\frac{Q_2}{2}$ будут являться активными силами, производящими движение. Пары же с моментами $Q_1 h$ и $Q_2 h$ будут производить эффект, стремящийся опрокинуть передаточную раму, причем этот эффект будет вызывать на цапфах кривошипов первой стороны добавочные давления R_1' и $-R_1''$, а на цапфах другой стороны $-R_2'$ и R_2''. Реакции от этих давлений на пальцах кривошипов образуют пары сил $-R_1' R_1''$ и $-R_2'' R_2'$, которые соответственно уравновешивают опрокидывающие пары с моментами $Q_1 h$ и $Q_2 h$. Силы R_1', R_1'', R_2' и R_2'', очевидно, по величине должны быть равны:

$$R'_1 = R''_1 = \frac{Q_1 h}{l} \text{ и } R'_2 = R''_2 = \frac{Q_2 h}{l}.$$

Общие давления, приходящиеся на цапфы кривошипов ведущих осей, будут складываться из активных сил и сил давлений от действия опрокидывающих пар:

$$P_1 = \sqrt{\left(\frac{Q_1}{2}\right)^2 + R'^2_1}$$

и

$$P_2 = \sqrt{\left(\frac{Q_2}{2}\right)^2 + R'^2_2}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

или
$$P_1 = \frac{Q_1}{2}\sqrt{1+\frac{4h^2}{l^2}} = \frac{T}{2}\cos\alpha\sqrt{1+\frac{4h^2}{l^2}} \qquad (431)$$

и
$$P_2 = \frac{Q_2}{2}\sqrt{1+\frac{4h^2}{l^2}} = \frac{T}{2}\sin\alpha\sqrt{1+\frac{4h^2}{l^2}}. \qquad (432)$$

Давления периодически меняются по величине, но остаются постоянными по направлению, каковое определяется углом:

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{2R_1'}{Q_1} = \frac{2h}{l}.$$

Последнее соотношение показывает, что давления P_1 и P_2 неизменно направлены по наклонным звеньям рамы, составляющим с горизонтальными звеньями угол ψ.

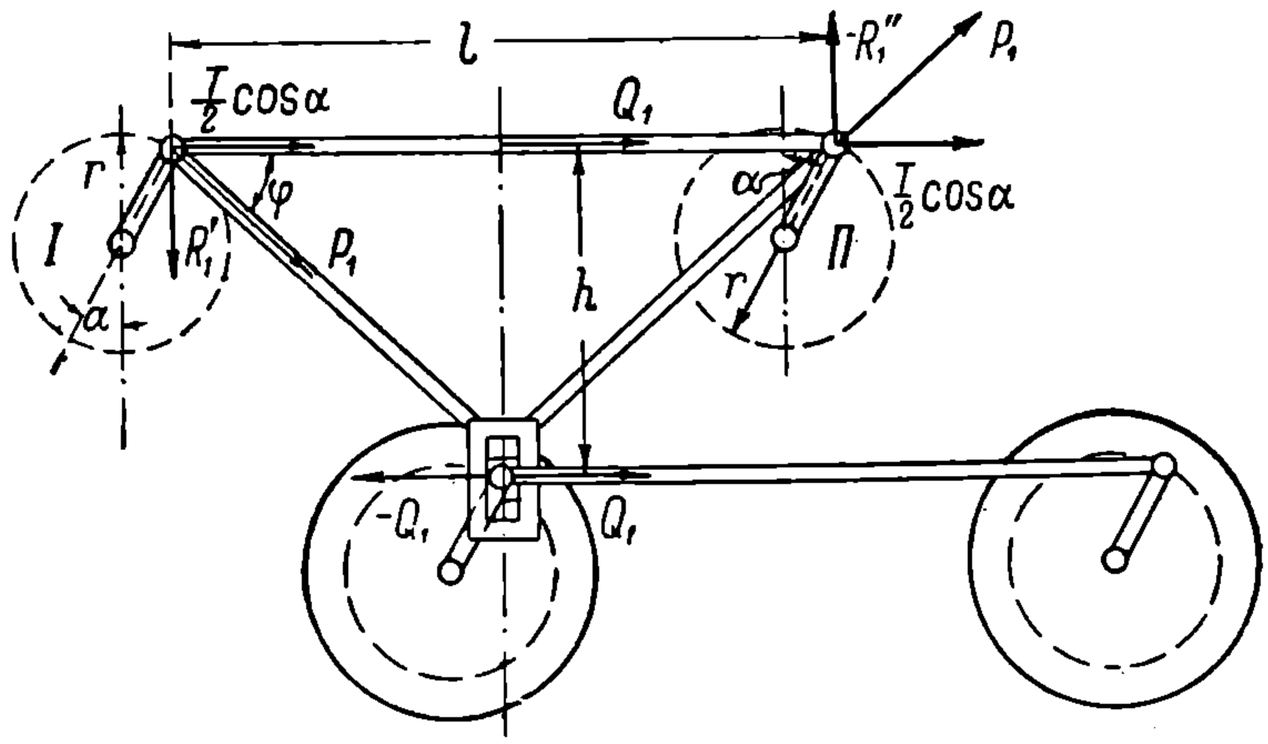


Рис. 437. Распределение усилий в передаче при жесткой раме Kando.

На основании выведенных выражений можно сделать заключение, что в данном механизме передаточная рама и соприкасающиеся с ней части испытывают действие переменных сил, причем в каждый данный момент под действием опрокидывающих пар ведущие оси то нагружаются, то разгружаются, приводя в колебательное движение и рессоры экипажа. Ввиду этого и при данной конструкции, хотя она в отношении игры рессор и более благоприятна чем предыдущая, итти далеко по пути увеличения h не представляется возможным.

Если перевернуть только что рассмотренную систему так, как это показано на рис. 437, то получится передаточный механизм Kando. Механизм этот обычно применяется при наличии двух передаточных валов. Если положить, что на каждом передаточном валу развивается момент $\frac{Tr}{2}$, то, согласно предыдущим положениям, действие усилий, развиваемых двигателями, сведется к получению ведущих сил Q_1 и Q_2 и опрокидывающих пар Q_1h и Q_2h. Давления, которые будут передаваться пальцами кривошипов, по предыдущему, направлены по наклонным звеньям и равны

$$\left.\begin{aligned} P_1 &= \frac{T}{2}\cos\alpha\sqrt{1+\frac{4h^2}{l^2}} \\ P_2 &= \frac{T}{2}\sin\alpha\sqrt{1+\frac{4h^2}{l^2}} \end{aligned}\right\}. \qquad (433)$$

Последние соотношения дают возможность сделать одно важное заключение. При условии симметрии передаточного механизма и равенства вращающих моментов, развиваемых на каждом передаточном валу, все давление, которое передается пальцем кривошипа на раму, идет исключительно по направлению наклонного звена, причем поперечное горизонтальное звено никакому напряжению не подвергается, так как к нему прикладываются все время силы, по совокупному своему действию его не напрягающие.

Теперь важно выяснить вопрос, как изменяются напряжения передаточных валов в передаче Kando. Выяснение этого вопроса достаточно произвести для одной стороны одного из передаточных валов, в данном случае первого. Для второго картина будет аналогичная. Крутящий момент вала, получаемый на одной из его сторон, при учете, что угол между направлениями P_1 и касательными в точках приложения P_1 к окружности перемещения этих точек равен $\varphi - \alpha$, может быть выражен соотношением:

$$M_1 = P_1 r\cos(\varphi-\alpha) = \frac{Tr}{2}\cos\alpha\cos(\varphi-\alpha)\sqrt{1+\frac{4h^2}{l^2}}.$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Момент этот является величиной переменной. Из условия его maximum'а и minimum'а получается:

$$M_{I_{max}} = \frac{Tr}{2}\cos^2\frac{\varphi}{2}\sqrt{1+\frac{4h^2}{l^2}}$$

и

$$M_{I_{min}} = \frac{Tr}{2}\sin^2\frac{\varphi}{2}\sqrt{1+\frac{4h^2}{l^2}}.$$

Подставляя вместо $\cos^2\frac{\varphi}{2}$ и $\sin^2\frac{\varphi}{2}$ их значения, выраженные параметрами передаточной рамы l и h, получаем формулы:

$$\left.\begin{aligned} M_{I_{max}} &= \frac{Tr}{2}\left[\frac{1+\sqrt{1+\frac{4h^2}{l^2}}}{2}\right] \\ M_{I_{min}} &= \frac{Tr}{2}\left[\frac{-1+\sqrt{1+\frac{4h^2}{l^2}}}{2}\right] \end{aligned}\right\}. \qquad (434)$$

Выражения (434) показывают, что момент кручения является величиною переменной, причем наибольшее его значение получается больше нормального момента $\frac{Tr}{2}$, развиваемого на данном валу двигателями. Значение этого maximum'а растет с возрастанием h, и потому чрезмерно увеличивать последнее не рекомендуется и при этой схеме, тем более, что и здесь опрокидывающие моменты могут вызвать колебания рессор и качку экипажа.

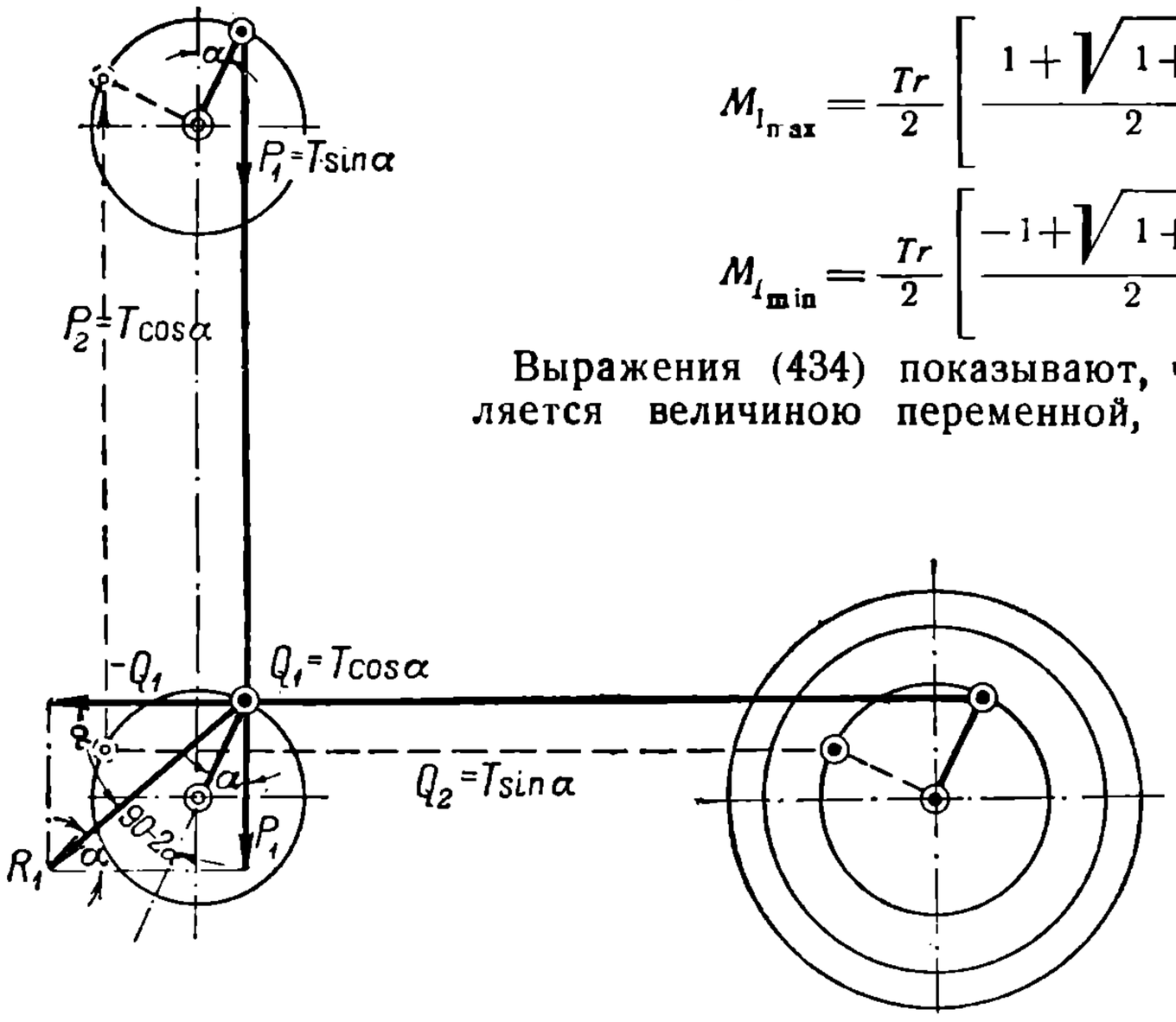


Рис. 438. Распределение усилий в рычажной передаче с вертикальным шатуном.

Рычажные передачи. На рис. 438 представлена рычажная передача с отбойным валом и вертикальным положением шатунов. Основные напряжения, определенные на основании вышеизложенных принципов, указаны на том же рисунке,

От вала электродвигателя так же, как от передаточного вала зубчатого колеса, вращающий момент Tr передается шатунами на отбойный вал. Напряжение в шатунах P_1 и P_2 по предыдущему определяется напряжениями, подчиняющимися закону синуса и косинуса. Общий результирующий момент на отбойном валу равен, если пренебречь потерями в передаче, той же величине Tr. Полученный таким образом момент передается дальше через спарники, вызывая в них, согласно предыдущему, напряжения $Q_1 = T\cos\alpha$ и $Q_2 = T\sin\alpha$.

Наиболее напряженными элементами в рассматриваемой передаче являются отбойный вал и его части. Прежде всего важно выяснить напряжения в пальцах кривошипов. Напряжения, которые испытывают пальцы кривошипов отбойных валов, определяются действующими на них силами P_1 и P_2, а также и теми реакциями $-Q_1$ и $-Q_2$, которые получаются в пальцах при передаче усилий Q_1 и Q_2 на спарниковые тяги. Выражения для общих усилий, приходящихся на пальцы, согласно рис. 438 получают вид:

$$R_1 = \sqrt{P^2{}_1 + Q^2{}_1} = T;$$
$$R_2 = \sqrt{P^2{}_2 + Q^2{}_2} = T.$$

Теперь видно, что эти напряжения постоянны по величине, но переменны по направлению.

Сила R_1, являющаяся результатом действия сил P_1 и Q_1 на соответствующий палец кривошипа, может быть разложена на две составляющие, одну по направле-

НБ УГУНТ (ДІІТ)

нию кривошипа и другую перпендикулярную к нему. Первая уравновешивается реакцией вкладышей подшипников вала, а вторая создает вращающий момент, величина которого по рис. 438 определяется выражением:

$$\Delta M = \pm R_1 r \cos 2\alpha = \pm Tr \cos 2\alpha, \qquad (435)$$

где знак плюс или минус определяется направлением момента, меняющегося в зависимости от направления сил P_1 и $-Q_1$.

На противоположной стороне передачи от силы R_2 получается момент такой же величины, но противоположного направления, так как силы P_2 и Q_2 имеют направления обратные P_1 и Q_1. Полученный вращающий момент, в зависимости от соотношения P_1 и $-Q_1$, действует или в одну сторону с активным моментом $P_1 r \sin\alpha$

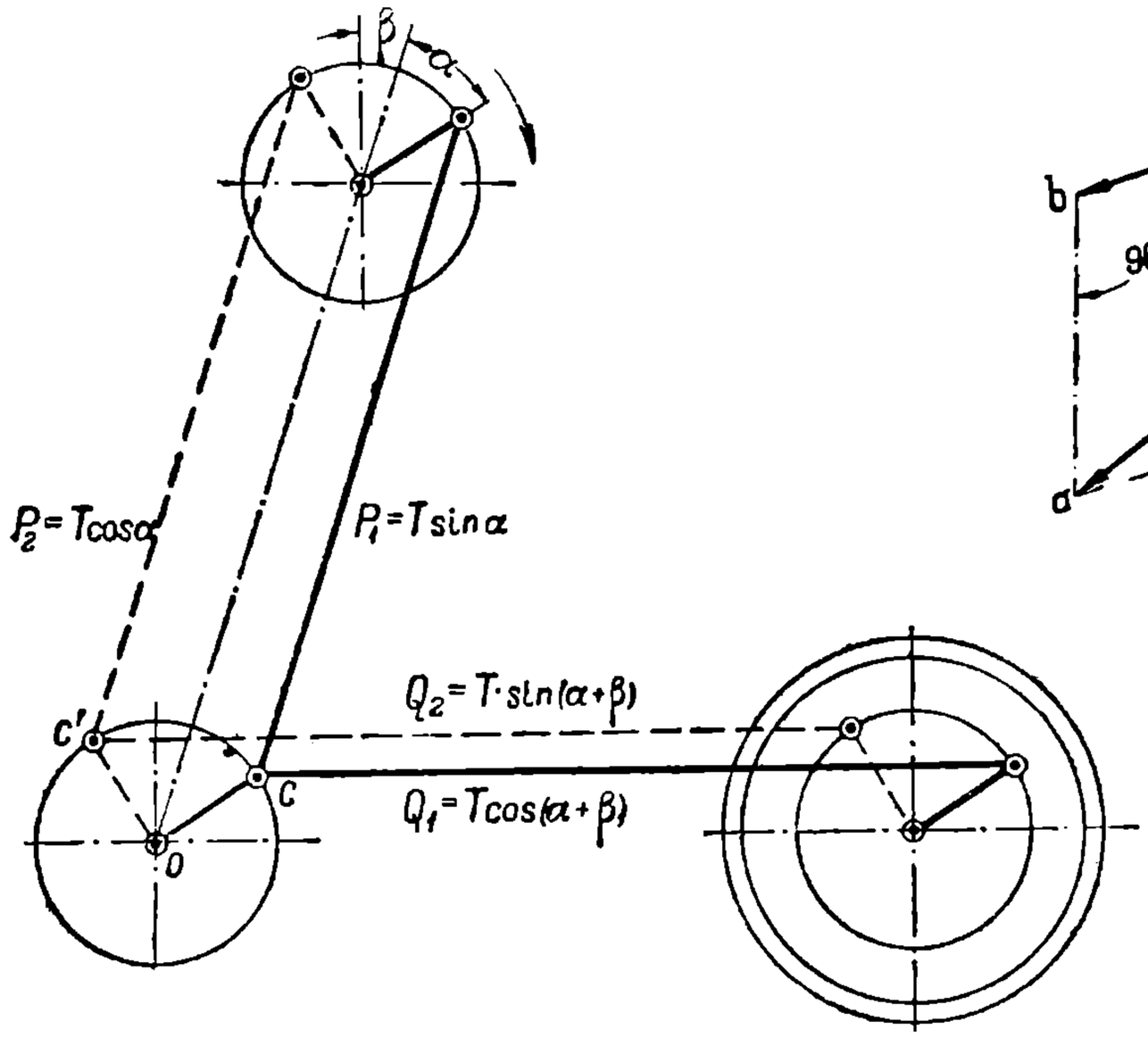


Рис. 439. Распределение усилий в рычажной передаче с наклонным шатуном.

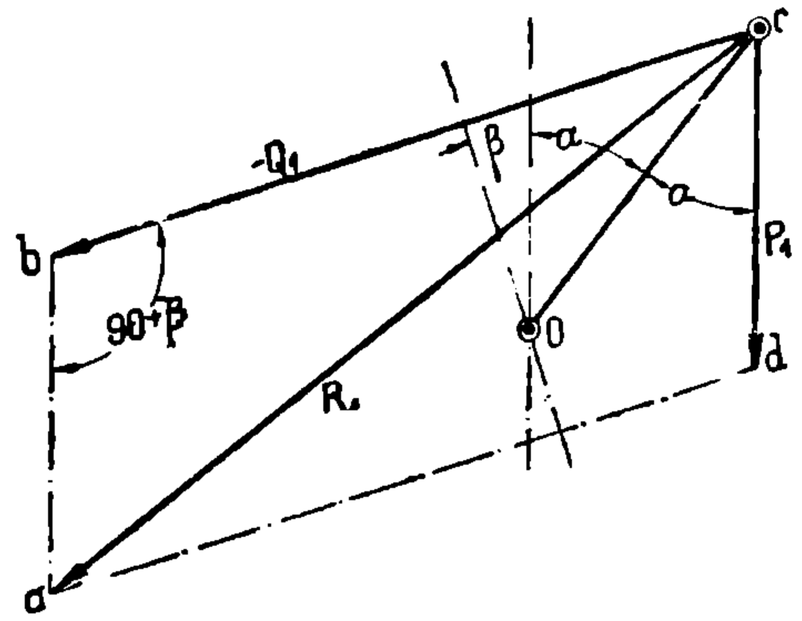


Рис. 440. Диаграмма усилий к рис. 439.

или же в обратную, передаваясь путем деформации кручения вала на противоположную сторону передачи и там складываясь с моментом $P_2 r \cos\alpha$. Наличие этих моментов показывает, что отбойный вал является звеном, передающим за счет своих деформаций моменты от одной стороны передачи к другой. Картина такова, что у момента, передаваемого шатуном одной стороны холостого вала, имеется недостаток или избыток по сравнению с моментом, передаваемым спарниками на ведущие колеса той же стороны, и вот эти то избытки и недостатки и компенсируются второй стороной. Действительно, момент, передаваемый шатуном *1*, равен:

$$M_1 = P_1 r \sin\alpha = Tr \sin^2\alpha.$$

Момент, передаваемый спарниками той же стороны:

$$M'_1 = Q_1 r \cos\alpha = Tr \cos^2\alpha.$$

Разность этих моментов

$$\Delta M = Tr(\sin^2\alpha - \cos^2\alpha) = -Tr\cos 2\alpha \qquad (436)$$

покрывается второй стороной, что находится в соответствии с выражением (435).

Распределение сил в рычажном механизме показывает, что здесь также имеют место силы, периодически меняющиеся, причем некоторые звенья, как, например, отбойный вал, могут получать деформации с двойной частотой по сравнению с частотой вращения.

Несколько иные соотношения получаются при наклонных шатунах (рис. 439 и 440). Здесь, как и в предыдущем, усилия, передаваемые шатунами P_1 и P_2, создают на

НБ УДУНТ (ДІІТ)

отбойном валу постоянный крутящий момент Tr, который вызывает при наличии угла β в спарниках усилия $T\cos(\alpha+\beta)$ и $T\sin(\alpha+\beta)$.

Из Δabc получается (рис. 440):

$$R_1 = \sqrt{T^2[\sin^2\alpha + \cos^2(\alpha+\beta) + 2\sin\alpha\sin\beta\cos(\alpha+\beta]} = T\cos\beta.$$

Далее подобно формуле (436) можно получить выражение:

$$\Delta M = Tr\sin^2\alpha - Tr\cos^2(\alpha+\beta) = -Tr\cos(2\alpha+\beta)\cos\beta. \qquad (437)$$

Из последних двух равенств следует, что наибольшие напряжения цапф и самого вала при наклонном шатуне в $\frac{1}{\cos\beta}$ раз меньше, чем при шатуне вертикальном.

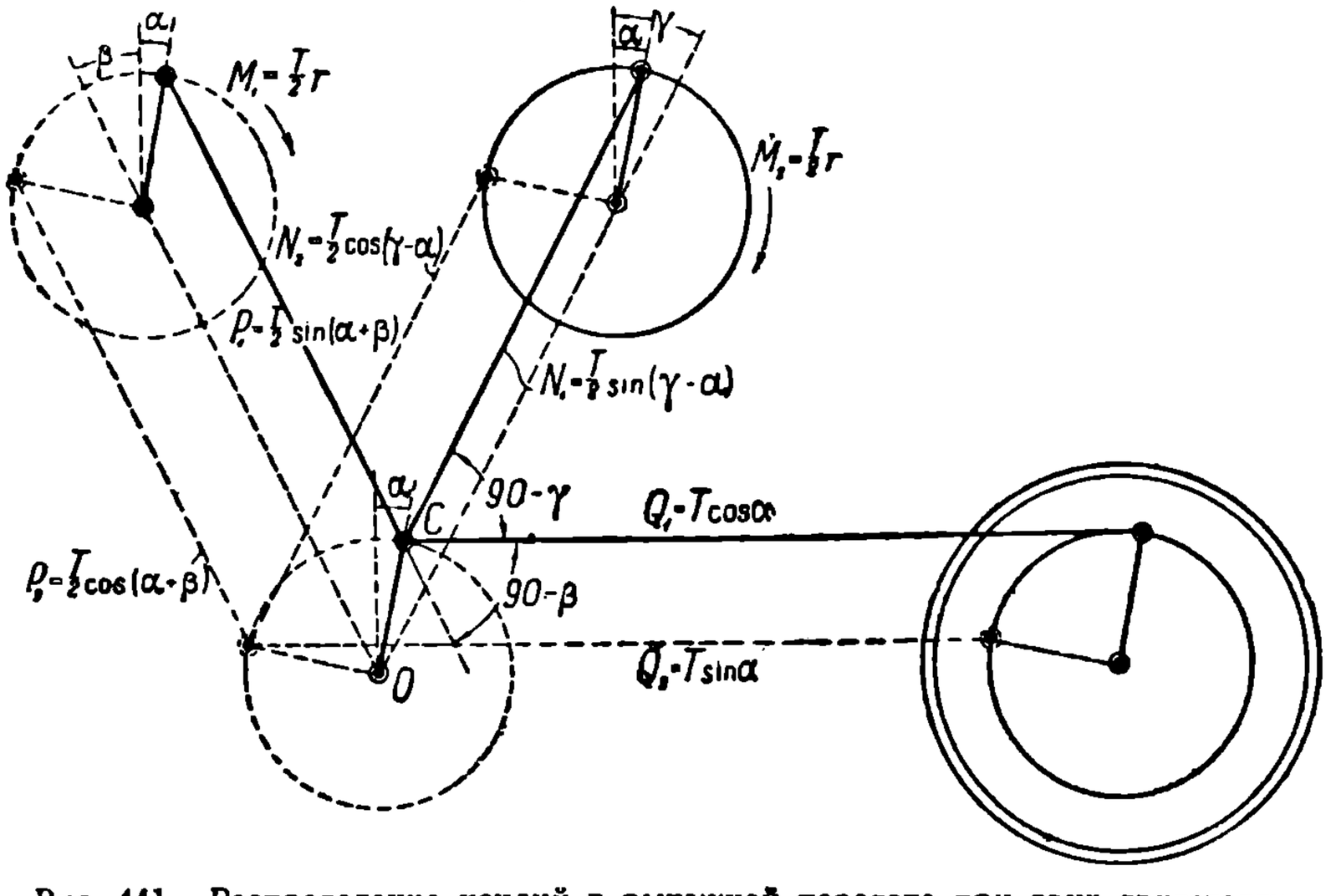


Рис. 441. Распределение усилий в рычажной передаче при двух двигателях с одним отбойным валом.

Точно таким же образом можно вывести формулы распределения сил в передачах с двумя парами наклонных шатунов и двумя электродвигателями (рис. 441). Определение давления на цапфу кривошипа холостого вала произведено на рис. 442. При этом построении сила Q_1 условно для удобства построения была разбита на две равные составляющие $\frac{Q_1}{2}$, из коих одна складывалась с N_1, а другая с P_1. Давление на первую цапфу равно:

$$R'_1 = \sqrt{P^2_1 + \left(\frac{Q_1}{2}\right)^2 - 2\,P_1Q_1\sin\beta} = \frac{T}{2}\sqrt{\sin^2(\alpha+\beta) + \cos^2\alpha - 2\cos\alpha\sin\beta\sin(\alpha+\beta)}$$

или

$$R'_1 = \frac{T}{2}\cos\beta.$$

Подобным же образом:

$$R''_1 = \frac{T}{2}\cos\gamma.$$

Отсюда:

$$R_1 = \sqrt{R_1{}^2 + R''_1{}^2 - 2R'_1R''_1\cos\psi},$$

где

$$\angle\psi = 180 - (\beta+\gamma).$$

Выражение для момента, передающегося через отбойный вал одной стороны передачи на другую:

$$\Delta M = \frac{Tr}{2}\sin^2(\beta+\alpha) + \frac{Tr}{2}\sin^2(\gamma-\alpha) - Tr\cos^2\alpha. \qquad (438)$$

При симметрии, как это обычно бывает:

$$\beta = \gamma.$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Тогда:

$$R_1 = T\cos^2\beta$$

и

$$\Delta M = -Tr\cos^2\beta\cos 2\alpha. \qquad (439)$$

Таким образом, в трех последних рассмотренных системах наибольшие напряжения в пальцах кривошипов отбойных валов и в самих валах подчинены соотношению:

$$1 : \cos\beta : \cos^2\beta. \qquad (440)$$

Это выражение показывает, что в отношении понижения напряжений наиболее выгодна система с двумя наклонными шатунами и двумя двигателями.

Для рычажных передач без отбойного вала методика расчетов остается той же самой. В частности, передача с жесткой рамой Kando подчинена в отношении напряжений тому же самому закону, что и разобранная выше система с зубчатым звеном (рис. 437).

В отношении двухзвенной системы Buchli (рис. 426), основанной на системе Kando, полезно иметь в виду следующие замечания. Как было уже указано при анализе рис. 437, при равных моментах обоих двигателей напряжения в поперечном звене, полученные от одного и другого двигателя, взаимно компенсируют друг друга, и через это звено никакого уравновешивающего тягового усилия не передается. Но если моменты будут различны, то это звено будет являться передатчиком избыточной или недостаточной величины этих моментов от одного двигателя к другому. Величины усилий, передаваемых поперечным звеном, будут зависеть от угла φ. Чем больше будет этот угол, тем большее значение получает поперечное звено. Ввиду того, что на практике возможно некоторое расхождение между характеристиками отдельных двигателей, Buchli не рекомендует делать угол φ больше 60°.

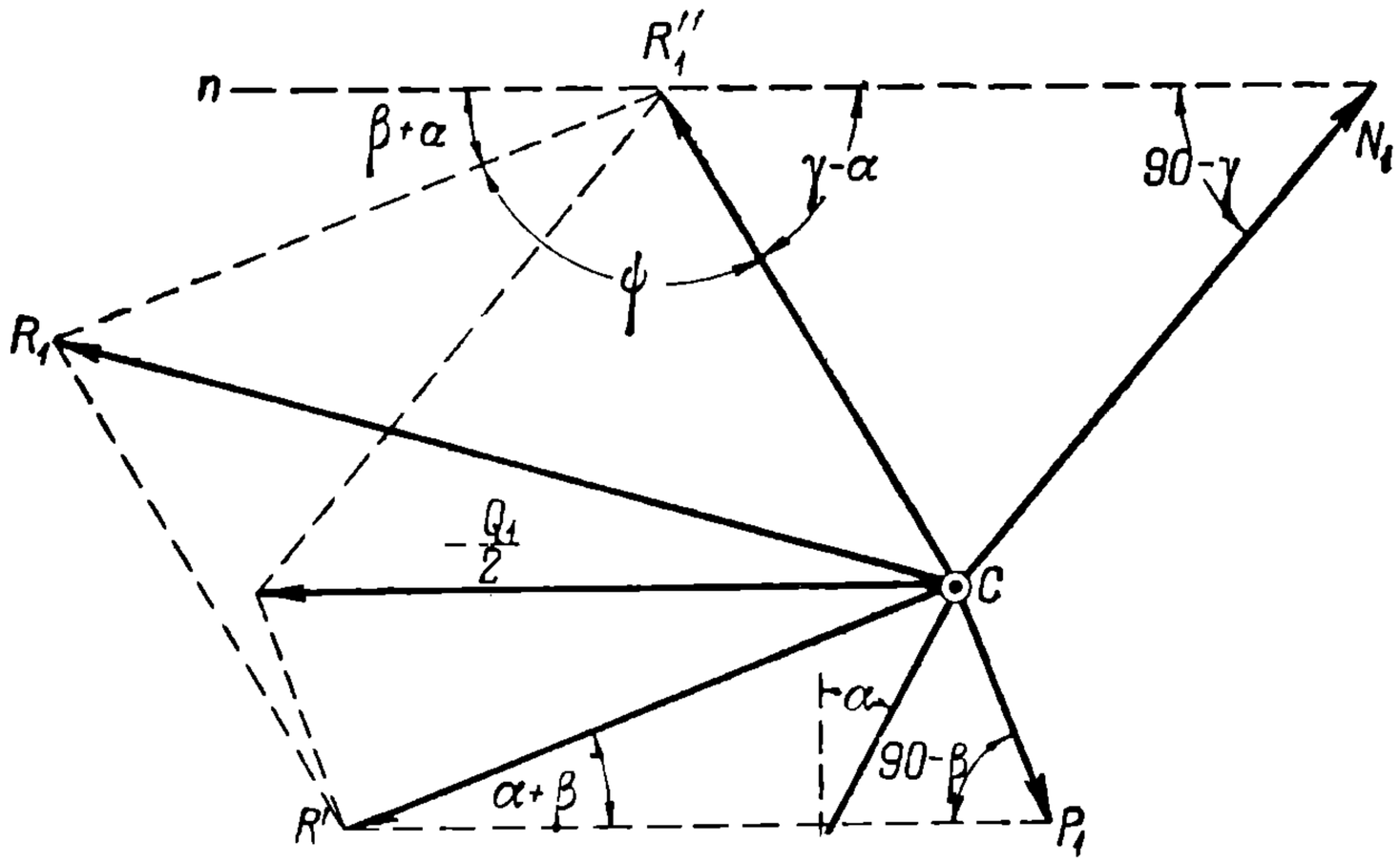


Рис. 442. Диаграмма усилий к рис. 441.

6. Паразитные колебательные процессы в рычажных и зубчато-рычажных передачах.

При выводе напряжений, действующих в отдельных частях рычажных и зубчато-рычажных систем, было выяснено, что при передаче движения действующие в отдельных звеньях усилия имеют переменную величину. В идеальном механизме и в случае идеальной его работы напряжения в передаточном механизме зависят только от угла поворота кривошипов α и от передаваемого тягового момента, определяемого выражением (430). При идеальном механизме допустимо считать, что в каждый данный элемент времени момент M_x, развиваемый тяговыми двигателями, уравновешивается исключительно моментом M, передаваемым на ведущие оси и производящим тяговое усилие.

Однако, в реальных условиях работы передаточного механизма указанное равенство не соблюдается. Рычажные механизмы представляют собою кинематически замкнутые системы, которые особенно склонны ко всякого рода колебательным процессам. Достаточно подвергнуть такой механизм действию какого-либо постороннего импульса, например, удара со стороны пути на полускат, и он придет в колеба-

НВ УРУНТ (ДІІТ)

тельное движение, которое будет подчиняться общим законам свободных колебаний системы (Л. 236).

Подобно тому, как пружина, выведенная из своего состояния равновесия, совершает колебательные перемещения, отдельные звенья передаточного механизма вследствие упругости своего материала также меняют свою длину, то укорачиваясь, то удлиняясь, образуя по существу такой же колебательный процесс, как и пружина, но только с относительно меньшими амплитудами, так как степень упругости у них меньше, чем у пружины. Ввиду этого, дабы уравнение (430) было применимо и для общего случая работы механизма с учетом возможных колебаний, оно должно быть пополнено введением в него члена, обусловленного силой инерции колеблющегося механизма. В общем случае момент, развиваемый двигателем, при пренебрежении силами трения должен уравновешивать не только тяговый момент, но и момент от силы инерции механизма.

Как видно из выражения (430), вращающий момент, передаваемый через рычажную систему, пропорционален углу φ. Этот угол без колебательных перемещений определяется вышеуказанными тяговыми усилиями. В случае же колебаний системы он зависит и от добавочных деформаций, обусловленных этими колебаниями. При таких условиях даже в пределах каждой данной тяговой силы угол φ является величиной переменной, и тогда общее уравнение динамики рассматриваемой системы должно получить вид:

$$M_x = \sigma r^2 \varphi + I \frac{d^2\varphi}{dt^2}, \tag{441}$$

где I — момент инерции системы по отношению к оси ее вращения.

Как следует из уравнения (441), момент M_x, развиваемый двигателями при каждом постоянном φ, является постоянной величиной, определяемой тяговыми усилиями. При переменном же φ, чем ни вызывалось бы его изменение, момент M_x изменяется, причем скорость вращения роторов при изменении M_x будет также меняться. Из теории же тяговых двигателей известно, что при возрастании скорости момент вращения их понижается, а при уменьшении возрастает. Если обозначить через M_0 среднее значение момента двигателей, определяемого тяговыми усилиями, то выражение для текущего значения общего момента может быть выражено уравнением:

$$M_x = M_0 - B\frac{d\varphi}{dt}, \tag{442}$$

где B дает меру уменьшения момента двигателя на каждую единицу увеличения угловой скорости ротора, выражаемую обычно в радианах в секунду (1/sec).

Подставляя в выражение (441) найденное значение, можно основное уравнение движения передаточного механизма представить в виде:

$$I\frac{d^2\varphi}{dt^2} + B\frac{d\varphi}{dt} + \sigma r^2 \varphi = M_0. \tag{443}$$

Если считать, что M_0 является величиной постоянной и что ему соответствует некоторое среднее значение φ_0, то колебания фактически должны совершаться около данной величины φ_0, определяемой равенством:

$$M_0 = \sigma r^2 \varphi_0.$$

Полагая, что $\varphi = \varphi_0 + x$, будем иметь уравнение колебания в виде:

$$I\frac{d^2x}{dx^2} + B\frac{dx}{dt} + \sigma r^2 x = 0. \tag{444}$$

Интеграл его:

$$x = e^{-\frac{B}{2I}t} f(t). \tag{445}$$

В зависимости от соотношения корней характеристического уравнения, как уже было указано в главе о рекуперации энергии (209—211), $f(t)$ может иметь три различные формы, причем при положительных I, B и σr^2 режим свободных колебаний будет всегда затухающим. Коэфициент B, называемый обычно коэфициентом затухания, зависит от типа двигателей. Для двигателей с шунтовой характеристикой он достигает значительных величин, и при них процесс затухания идет очень энергично. Для двигателей последовательных он значительно меньше. Если положить его равным нулю, уравнение (445) принимает форму гармонических колебаний:

$$x = C_1 \sin \omega_c t + C_2 \cos \omega_c t. \tag{446}$$

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Здесь ω_c—угловая скорость собственных колебаний, равная в данном случае:

$$\omega_c = r\sqrt{\frac{\sigma}{I}}. \tag{447}$$

Однако, в такой форме колебания удержаться не могут. Если предположить, что благодаря каким-либо случайным воздействиям такие колебания и возникли, то даже при $B=0$, чего в действительности не может быть, они были бы потушены другими демпферами, например, различными вредными сопротивлениями.

Таким образом, для идеального кривошипного механизма все колебательные паразитные движения носят затухающий характер, и потому для таких случаев, пренебрегая трением в звеньях механизма, можно полагать, что момент, передаваемый через передачу, равен тяговому моменту. Нужно указать, что при наличии элемента тушения амплитуда колебания понижается, и кроме того и самая частота колебаний становится меньше. В этом случае частота собственных колебаний:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{r^2\sigma}{I} - \frac{B^2}{4I^2}} \tag{448}$$

Для последовательных двигателей удельная величина коэфициента тушения B равна в среднем 0,05—0,1 mkg/1/sec на один kg веса ротора двигателя, а для шунтовых эта же величина равна 2—2,8 mkg/1/sec.

Переходя от идеальных кривошипных механизмов к реальным, приходится учитывать целый ряд добавочных факторов, которые осложняют картину колебательного процесса передачи и переводят гармоническое колебание в более сложную форму, содержащую в себе элементы неустойчивости работы механизма с возможностью получения резко выраженных резонансных эффектов.

Из числа основных причин данного явления следует прежде всего указать на неправильность сборки и изготовления передаточного механизма, а затем на неизбежную игру в кривошипных подшипниках. Помимо этого, здесь имеет значение эластичность валов и кривошипов, с которыми не считались при выводе вышеприведенного уравнения, справедливого исключительно для идеального механизма, с эластичностью только в шатунных звеньях.

Неправильность сборки и фабрикации может повлечь за собою неодинаковую длину шатунов, неодинаковую длину кривошипов и неправильный угол их насадки по отношению друг к другу. Влияние этих факторов сказывается в том, что вращающий момент, передаваемый двигателями, уже не является функцией, зависящей только от угла φ (430), что возможно в том лишь случае, если силы Q_1 и Q_2 (429) подчинены симметричному изменению по закону синуса и косинуса. При указанных неточностях в механизме симметрия обеих сторон механизма нарушается. Если предположить, что шатун, кривошип и угол заклинения кривошипа одной стороны механизма больше, чем следует, соответственно на b, d и δ по сравнению с другой, то уравнения (429) примут вид:

$$Q_1 = \sigma[r(\varphi - \delta)\cos\alpha - b - d\sin\alpha],$$

$$Q_2 = \sigma r\varphi\sin\alpha.$$

Отсюда, по аналогии с моментом (430):

$$M = \sigma r[r\varphi - b\cos\alpha - 0{,}5\delta(1+\cos 2\alpha) - 0{,}5\,d\,\sin 2\alpha]$$

или

$$M = \sigma r^2\varphi - 0{,}5\sigma r(\delta + 2b\cos\alpha + \delta\cos 2\alpha + d\sin 2\alpha). \tag{449}$$

Данное выражение показывает, что момент является функцией не только угла φ, но и текущего угла поворота кривошипа.

Игра в подшипниках пальцев кривошипов, как было указано, является вторым фактором, нарушающим гармоничность колебательного процесса механизма. Она вызывает разрыв непрерывности сцепления шатунов с кривошипами, вследствие чего в течение большего или меньшего промежутка времени может работать только один шатун. Та часть дуги окружности, на которой работают оба шатуна, называется совместной. При полном отсутствии игры угол, соответствующий этой дуге, равен 90°, при значительной же игре он может быть близок к нулю.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Из такой сложной картины передачи момента естественно вытекает зависимость этого момента не только от угла φ, как это имеет место в идеальном механизме благодаря непрерывной координации действий обоих шатунов (429), но и от положения кривошипов, т. е., другими словами, от угла их поворота. Если обозначить через a одностороннюю игру цапфы во вкладыше, то для периода совместного действия шатунов напряжения в них, ослабляемые игрой вследствие понижения величины деформаций, равны:

$$Q_1 = \sigma(r\varphi\cos\alpha - a)$$

и

$$Q_2 = \sigma(r\varphi\sin\alpha - a).$$

В период одностороннего действия каждый шатун испытывает те же самые напряжения, но только с той разницей, что когда напрягается первый шатун, второй не работает и наоборот. Если обозначить угол дуги, на которой работает только первый шатун, через, α_1 и угол, соответствующий началу работы только второго шатуна, через α_2, то от $\alpha = 0$ до $\alpha = \alpha_1$ работает первый шатун, от $\alpha = \alpha_1$ до $\alpha = \alpha_2$ работают оба шатуна совместно, и от $\alpha = \alpha_2$ до $\alpha = 90^\circ$ работает только второй шатун. Картина изменения момента по этим периодам такова:

$$M = \left\{ \begin{array}{l} \sigma r\left[r\varphi\cos^2\alpha - a\cos\alpha\right]_0^{\alpha_1} \\ \sigma r\left[r\varphi - a\,(\cos\alpha + \sin\alpha)\right]_{\alpha_1}^{\alpha_2} \\ \sigma r\left[r\varphi\sin^2\alpha - a\sin\alpha\right]_{\alpha_2}^{90^\circ} \end{array} \right\}. \qquad (450)$$

Влияние последнего фактора, влияющего на искажение гармонического колебания, а именно эластичности валов и кривошипов, можно учесть следующим образом. Если обозначить коэфициент их жесткости через ξ и принять, что он численно равен силе в kg, необходимой для производства периферийной деформации в угловых единицах равной единице, то при действии силы в kg на периферии кривошипов эластичность рассматриваемых частей механизма будет вызывать смещение кривошипного пальца на угол равный $\frac{1}{\xi}$. При усилиях в шатунах Q_1 и Q_2 тангенциальные их составляющие равны $Q_1\cos\alpha$ и $Q_2\sin\alpha$, а следовательно, углы деформации, производимые этими силами, равны $\frac{Q_1\cos\alpha}{\xi}$ и $\frac{Q_2\sin\alpha}{\xi}$. В результате при полном угле деформации φ, на деформации, связанные с шатунами, приходят только углы равные:

$$\varphi_1 = \varphi - \frac{Q_1}{\xi}\cos\alpha;$$

$$\varphi_2 = \varphi - \frac{Q_2}{\xi}\sin\alpha.$$

При таких условиях основные уравнения деформаций (429) принимают вид:

$$Q_1 = \sigma\varphi_1 r\cos\alpha = \sigma r\left(\varphi - \frac{Q_1}{\xi}\cos\alpha\right)\cos\alpha;$$

$$Q_2 = \sigma\varphi_2 r\sin\alpha = \sigma r\left(\varphi - \frac{Q_2}{\xi}\sin\alpha\right)\sin\alpha.$$

Определяя отсюда силы Q_1 и Q_2 и подставляя их значения в основное выражение момента (430), можно величину последнего получить в виде:

$$M = \sigma r^2\varphi\left(\frac{\cos^2\alpha}{1 + \frac{\sigma}{\xi}\cos^2\alpha} + \frac{\sin^2\alpha}{1 + \frac{\sigma}{\xi}\sin^2\alpha}\right). \qquad (451)$$

Если совместить все произведенные выше выкладки, можно на базе уравнения (443) составить обобщающее уравнение колебательного процесса:

$$I\frac{d^2\varphi}{dt^2} + B\frac{d\varphi}{dt} + \sigma r^2\varphi f_1(t) = M_0 + F_1 f(t).$$

Если перейти от этого уравнения к уравнению колебания около среднего значения φ_0, определяемого равенством $\varphi = \varphi_0 + x$, то общая форма уравнения колебаний:

$$I\frac{d^2x}{dt^2} + B\frac{dx}{dt} + \sigma r^2 x f(t) = F(t). \qquad (452)$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Функции $f(t)$ и $F(t)$, как видно из выведенных уравнений, зависят от следующих составляющих, в которых текущий угол поворота кривошипов выражен через угловую скорость ω и время:

$$f(t)\ldots \begin{cases} \cos^2 \omega t \\ \sin^2 \omega t \\ \dfrac{\cos^2 \omega t}{1+\frac{\sigma}{\xi}\cos^2 \omega t} \\ \dfrac{\sin^2 \omega t}{1+\frac{\sigma}{\xi}\sin^2 \omega t} \end{cases}$$

$$F(t)\ldots. \begin{cases} 0{,}5\sigma r(\delta + 2b\cos\ \omega t + \delta\cos 2\omega t + d\sin 2\omega t) \\ -\sigma r^2\varphi_0\cos^2\omega t + \sigma r a\cos\omega t \\ \sigma r a(\cos\omega t + \sin\omega t) \\ -\sigma r^2\varphi_0\sin^2\omega t + \sigma r a\sin\omega t \\ -\sigma r^2\varphi_0\left(\dfrac{\cos^2\omega t}{1+\frac{\sigma}{\xi}\varphi\cos^2\omega t} + \dfrac{\sin^2\omega t}{1+\frac{\sigma}{\xi}\sin^2\omega t}\right) \end{cases}$$

Как видно из приведенных выражений, результирующее колебательное движение подчинено чрезвычайно сложному закону. Объединить в одном уравнении эффект действия всех факторов, влияющих на результирующий колебательный процесс, не представляется возможным. Ввиду этого для исследования рассматриваемых колебаний остается только путь общего исследования тех свойств, которые содержат в себе функции $f(t)$ и $F(t)$.

Анализируя результирующее колебательное движение, необходимо прежде всего определенно констатировать, что оно не подчиняется простому линейному дифференциальному уравнению с постоянными коэфициентами, не имеющему члена вынуждения, как это имело место при идеальном кривошипном механизме (444). В данном случае имеется диференциальное уравнение с переменным коэфициентом при x и целым рядом членов вынуждения. Это обстоятельство влечет за собою возможность возникновения опасных колебаний, с опасностью перехода их в неустойчивый режим с чрезмерными амплитудами колебаний. При этом такая опасность кроется даже в самих свободных колебаниях системы, чего не может быть в условиях гармонических колебаний. Однако, и в данном случае главная причина возможности возникновения опасных колебаний все-таки лежит в резонансных взаимодействиях собственных колебаний системы с импульсным действием силы вынуждения. Если частота изменения силы вынуждения равна или кратна частоте собственных колебаний, то амплитуда собственных колебаний усиливается ритмично повторяющимися в такт импульсами силы вынуждения. В результате колебательный процесс может принять недопустимый характер и быть не только источником значительного увеличения вредных сопротивлений движению, но и причиной поломок самого механизма.

Путем общего анализа уравнений типа (452) при учете, что $f(t)$ и $F(t)$ могут содержать приведенные выше для них выражения, возможно показать, что частота вынуждающей силы ν_r, определяемой функцией $F(t)$, будет находиться в одном из таких соотношений с частотой движения самого механизма ν_b:

$$\nu_r = 2\nu_b;\ \nu_r = \nu_b;\ \nu_r = {}^1/_2\nu_b \text{ и } \nu_r = {}^1/_4\nu_b. \qquad (453)$$

Определение частоты или угловой скорости собственных колебаний ν_c, производимое очень просто для идеального механизма (448), в данном случае сильно осложняется наличием функции $f(t)$. Однако, в большинстве случаев собственные колебания, при введении функции $f(t)$, получают частоту, не особенно сильно отличающуюся от частоты гармонического колебания, т. е. при $f(t) = 1$.

Если проследить физику явлений, вызываемых эластичностью валов и кривошипов, то нетрудно сообразить, что эти явления должны вызвать, как и вообще всякое введение пружинящего звена, удлинение периода колебания системы и потому уменьшение частоты колебания, что можно учесть введением некоторого

НБ УДУНТ (ДІІТ)

коэфициента уменьшения k. На величину этого коэфициента могут влиять и другие факторы, как, например, игра в подшипниках.

При сделанных предположениях частота колебаний для реального механизма может быть определена выражением:

$$\nu_c = \frac{k}{2\pi}\sqrt{\frac{r^2\sigma}{I} - \frac{B^2}{4I^2}}. \qquad (454)$$

Разобранные колебания, подчиняющиеся уравнению, в котором имеется член $f(t)$, носят название квазигармонических. Для них обычно коэфициент k близок к единице, редко выходя из пределов 1—0,9.

Кроме квазигармонических колебаний, в системе рычажного передаточного механизма электровоза может возникать еще и другой тип негармонических колебаний, носящих название псевдогармонических. При них вращающий момент подчиняется более сложной зависимости от угла φ, чем это имеет место в гармонических и в квазигармонических колебаниях. В общем виде эта зависимость может быть определена выражением:

$$M = r^2\varphi f(\varphi).$$

Отличительным свойством псевдогармонических колебаний является то, что в процессе колебаний коэфициент жесткости σ частей механизма не подчиняется закону Гука. Здесь он не остается величиною постоянной, а является величиною переменной, зависящей от величины перемещений колеблющихся масс, в рассматриваемом случае от угла φ.

В условиях рычажных передаточных механизмов электровоза возникновение псевдогармонических колебаний наиболее вероятно из-за игры в цапфах кривошипов. При ее наличии путь, проходимый колеблющимися массами, составляется из пути, на протяжении которого упругие силы подчиняются закону Гука, и из пути, который проходится благодаря игре в просветах подшипников помимо этого. В результате, если рассматривать полный период колебаний, здесь уже нельзя говорить о непрерывно действующем постоянном коэфициенте жесткости. Здесь нужно говорить о некотором эквивалентном коэфициенте, на величину которого оказывает влияние соотношение длин путей, проходимых при соблюдении закона Гука, и путей, проходимых в просветах подшипников. Нетрудно видеть, что степень зависимости эквивалентного коэфициента жесткости от соотношения указанных путей будет определяться величиной угла φ. Заметим, что рассматриваемое влияние игры нужно отличать от влияния ее на рассмотренные выше квазигармонические колебания, и где действие ее связывалось с величиной угла α.

Теоретический анализ уравнений псевдогармонических колебаний показывает, что при них ждать резонанса не приходится. Однако амплитуды их колебаний могут получаться весьма большими и опасными для механизмов. Коэфициент уменьшения частот собственных колебаний, обозначенный в уравнении (454) через k, здесь следует ожидать порядка 0,7.

В практических условиях работы рычажных передач наибольшее значение имеют колебания квазигармонического типа. Ввиду этого при дальнейшем анализе колебаний передаточных механизмов мы, главным образом, будем касаться квазигармонических колебаний, причем наибольшее внимание будет сосредоточено на явлениях резонанса этого типа колебаний. В данном случае, как и вообще, условием появления резонансных колебаний должно явиться совпадение такта собственных колебаний с тактом колебаний вынужденных. При этом необязательно равенство частот свободных и вынужденных колебаний. Важна, главным образом, их кратность. Так как частоты собственных колебаний в разбираемых механизмах обычно значительно выше частот колебаний вынужденных, то резонансных явлений следует ожидать при совпадении частот вынужденных колебаний с долями частот колебаний свободных:

$$\nu_r = (1,\ 1/2,\ 1/3,\ 1/4, \ldots . 1/n)\, k\nu_c. \qquad (455)$$

Для установления связи резонанса со скоростью вращения механизма или скоростью движения локомотива нужно воспользоваться равенствами (453). Так как резонансные колебания при особенно незначительных скоростях движения практически не опасны, то совмещение равенств (453) и (455) дает возможность очертить опасную зону для резонансных колебаний следующими пределами:

$$\nu_b = (1,\ 1/2,\ 1/4)\, k\nu_c. \qquad (456)$$

НБ УПУНТ (ДІІТ)

В этих пределах обычно и имеют место на практике резонансные колебания. Та скорость локомотива, при которой они появляются, носит название критической ($v_{кр}$). Отношение скорости, соответствующей частоте собственных колебаний, к скорости критической называется модулем (μ):

$$\mu = \frac{v_c}{v_{kp}}. \tag{457}$$

Таким образом, наиболее вероятный модуль на практике—1 или 2 или 4.

Многочисленные опыты, произведенные фирмой BBC по определению μ дали результаты, приведенные в табл. 65.

ТАБЛИЦА 65.
Значение модуля.

μ	Число опытов
2	27
4	15
3	6
1	3

Все приведенные выше уравнения колебания выражают колебательный процесс всей системы передаточного механизма, так как в них введен эквивалентный момент инерции I всей системы. При практическом пользовании данным общим уравнением могут встретиться значительные затруднения по определению входящих в него постоянных. Но выведенные уравнения одинаково справедливы как для всей системы механизма, так и для любой единичной массы этой системы. Ввиду этого для упрощения проблемы колебательного процесса механизма можно свести вопрос к рассмотрению колебания некоторой концентрированной массы, взяв такую массу, которая имеет наиболее решающее влияние на весь процесс, и наделив ее связями, средне-эквивалентными для всего механизма. В обычных условиях передаточного механизма такими концентрированными массами, естественно, должны являться роторы электродвигателей, на которые нормально приходится подавляющая часть массы всего колеблющегося механизма.

При введении концентрированной массы, если ограничить вопрос рассмотрением наиболее вероятных случаев близости собственных колебаний к гармоническим, уравнение колебаний для каждой индивидуальной массы можно представить в виде:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + b\frac{dx}{dt} + cx = F(t). \tag{458}$$

Здесь m — масса в kg/m/sec², b — силы успокоения в kg/m/sec и c — эквивалентная жесткость связи в kg/m. В том случае, когда в механизме имеется несколько ярко выраженных, сосредоточенных масс, приходится составлять уравнения отдельно для каждой массы.

Из таких случаев на практике наиболее часто встречается комбинация с двумя двигателями, работающими на один общий передаточный механизм. Следует указать, что такая система в отношении процесса колебания представляет значительно бо́льшую опасность, чем механизмы с одним только двигателем. Главная причина этого состоит в том, что при одном двигателе конечная точка колеблющейся системы неизбежно упирается в неподвижную точку, фиксируемую силой сцепления колеса с рельсами и сильно препятствующую нарастанию размахов колебания системы.

При двух двигателях это нарастание гораздо меньше ограничено. Обе концентрированные массы роторов вовлекаются, благодаря имеющимся между ними связям, во взаимно обусловленные и по большей части усиливающиеся процессы колебания. Опорная неподвижная точка механизма в данном случае не лежит на пути той части механизма, которая соединяет оба ротора и потому она не может достаточно сильно задерживать взаимно обусловленные колебания роторов. Опыт с существующими электровозами вполне подтверждает опасность возникновения особенно интенсивных резонансных колебаний при наличии механизма с двумя двигателями. Этим обстоятельством, например, до известной степени вызвана конструкция электровоза Oerlikon'a (рис. 431), где во избежание двух двигателей применена довольно необычная система с качающимся коромыслом.

Переходя теперь к общему рассмотрению средств для успокоения колебаний передаточного рычажного механизма, необходимо констатировать, что здесь наиболее рациональной мерой следует считать введение пружинного звена в механизм.

НБ УПУНТ (ДІТ)

Выражение для частоты собственного колебания концентрированной массы можно написать в виде:

$$\nu_c = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{c}{m} - \frac{b^2}{4m^2}} \quad . \tag{459}$$

Это выражение показывает, что уменьшение жесткости c, достигаемое введением эластичного пружинного звена, сильно понижает величину периода собственных колебаний. Это во многих случаях имеет большое значение, так как благодаря этому можно значительно снизить критическую скорость, при которой возникает резонанс, а чем меньше эта скорость, тем менее разрушительно действует резонанс. Кроме того, усиление эластичности механизма увеличивает коэфициент тушения, т. е. отношение двух следующих друг за другом амплитуд колебания (Л. 230). Если обозначить этот коэфициент через d, то согласно теории колебаний его значение можно определить соотношением:

$$\ln d = \frac{\pi b}{2\sqrt{cm - \frac{b^2}{4}}} \tag{460}$$

Из этого выражения видно, что с уменьшением c, т. е. с увеличением эластичности, абсолютная величина d растет. При комбинации свободных колебаний с вынужденными, введение пружинной связи действует также благотворно. В данном случае размах колебаний определяет, как известно из теории колебаний, особый коэфициент, называемый коэфициентом нарастания. Его значение может быть определено выражением:

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\nu_r}{\nu_c}\right)^2\right]^2 + \frac{b^2}{mc}\left(\frac{\nu_r}{\nu_c}\right)^2}} \tag{461}$$

Отсюда видно, что усиление амплитуды колебания, т. е. коэфициент τ, будет уменьшаться с уменьшением c. Анализируя выражение (461), нетрудно видеть, что величина τ зависит при данной частоте собственных колебаний от частоты изменения вынуждающей силы, а следовательно, и от частоты вращения самого механизма. При возрастании ν_r до некоторой критической величины коэфициент τ растет, после чего он начинает падать. Определяя по общему правилу maximum для τ по ν_r, можно критическую величину для последней определить соотношением:

$$\nu_{r_{кр}} = \nu_c \sqrt{1 - \frac{b^2}{2mc}} \quad . \tag{462}$$

Из этого выражения следует, что чем меньше c, тем меньше и $\nu_{r_{кр}}$. В предельном случае, когда коэфициент нарастания начинает понижаться, уже начиная с нулевой скорости, чему соответствует $\nu_{r_{кр}} = 0$, соотношение постоянных системы должно удовлетворять равенству:

$$b = \sqrt{2mc} \quad . \tag{463}$$

Введение пружинного звена в настоящее время наиболее часто осуществляется путем применения пружинных зубчатых передач, причем, как было указано выше, пружины вставляются или в большое зубчатое колесо, или в шестерню. Иногда применяют пружинную насадку ротора на вал, что приходится делать главным образом при чисто рычажных передачах (рис. 72). В некоторых случаях пружины вставляют в одно из звеньев рычагов механизма. Например, в системе Oerlikon'a такую роль играет пружина, указанная на рис. 431.

Следует отметить, что пружины не только увеличивают эластичность, но вызывают и значительный демпфирующий эффект благодаря своему трению, причем этот эффект по своему действию гораздо более значителен, чем трение в цапфах самого механизма.

Для выявления практических соотношений факторов, влияющих на колебательный процесс рычажного механизма, можно привести данные для итальянского электровоза типа E трехфазного тока при $PS_h = 2 \times 1140$, предназначенного для $v_{max} = 50$ km/h, с рамой Kando. Момент инерции одного ротора — около 69 $m^2kg/m/sec^2$. Если отнести массу ротора к ободу ведущего колеса, то она будет

НВ УДУНТ (ДІІТ)

равна 240 kg/m/sec² при диаметре колеса 1070 mm. Коэфициент жесткости связей механизма c_1 согласно данным Couvenhoven'a можно принять равным 7 200 000 kg/m, а коэфициент тушения $b = 22\,200$ kg/m/sec. Отсюда частота собственных колебаний без учета тушения:

$$\nu_c = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{7\,200\,000}{240}} = 27{,}6\ \text{Hz}$$

и при учете тушения:

$$\nu_c = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{7\,200\,000}{240} - {}^1/_4\left(\frac{22\,200}{240}\right)^2} = 26{,}4\ \text{Hz}.$$

Критическая частота вынужденных колебаний получается равной:

$$\nu_{r_{кр}} = \nu_c\sqrt{1 - \frac{22\,200^2}{2 \cdot 240 \cdot 7\,200\,000}} = 0{,}92\nu_c$$

Скорость, соответствующая частоте свободных колебаний при $k = 1$, должна быть около 334 km/h. Критические скорости, при которых нужно опасаться режима резонанса:

$$v_{кр} = 334/4 \text{ или } 334/2, \text{ или } 334 \text{ km/h}.$$

Практически, конечно, опасна только скорость первая, т. е. 83,5 km/h, но и она превосходит предел $v_{max} = 50$ km/h.

Опыт показал, что при работе под током, когда сильный демпфирующий эффект обусловлен большой величиной b, присущей трехфазным двигателям, вообще никаких опасных колебаний возникнуть не могло даже при $v > 50$ km/h. Несколько иначе обстоит вопрос при движении электровоза без тока, когда b практически равно нулю. Здесь уже при $v > 60$ km/h, за отсутствием демпфера амплитуды колебаний могут сильно возрасти, так как коэфициент нарастания получается весьма значительный. При таких условиях уже выгодно ввести пружинное звено. Если применить его при $c = 520\,000$ kg/m, что вполне возможно, то при этих условиях:

$$\nu_c = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{520\,000}{240}} = 7{,}3\ \text{Hz}.$$

Тогда скорость, соответствующая этой частоте:

$$v_c = 89\ \text{km/h},$$

и критические скорости при $k = 1$:

$$v_{кр} = 22{,}25 \text{ или } 44{,}5, \text{ или } 89\ \text{km/h}.$$

Цифры для критической скорости показывают, что область резонансных колебаний попадет в область рабочих скоростей. Однако, это не опасно, так как пружинное звено настолько снижает амплитуду колебаний, что они становятся неопасными не только при работе под током, но и без тока.

Интересен случай устранения колебательных резонансных процессов в электровозе швейцарских железных дорог типа 1 — E — 1, с зубчато рычажной передачей и двумя двигателями при $PS_h = 2 \times 1250$. Для него получались сильные колебания при $v_{кр} = 1/4 v_c \cong 38 - 42$ km/h. Устранить эти явления можно было вставкой пружины в зубчатое колесо одного из двух двигателей. Благодаря этому удалось понизить у данного двигателя $v_{кр}$ до 17,32 и 32 km/h, тогда как у другого $v_{кр}$ оставалось равным около 38—42 km/h. Этим было уничтожено резонансное взаимодействие двух роторов, и колебания после этого успокоились. У этого электровоза приведенные массы равны около 1600—1700 kg/m/sec². Коэфициент жесткости c для части передачи без пружины равен около 10 000 000, для части с пружиной 1400 000 kg/m. Коэфициент тушения в данном случае был весьма мал, так как двигатели были последовательные.

Насколько вообще опасны резонансные колебания, видно из рис. 443, на котором приведена кривая сопротивлений движению для австрийского электровоза Митенвальденской железной дороги типа 1 — C. Если бы у этого электровоза не было резонансных колебаний, сопротивления движению шли бы по кривой *II*. В действительности же сопротивления движению легли по кривой *I*.

Кривая сопротивлений движению показывает, что они с возрастанием скорости начинают быстро расти до достижения критической скорости. По достижении ее

НБ УДУНТ (ДІІТ)

колебания успокаиваются и затем, при дальнейшем возрастании скорости, снова начинают расти до следующей критической скорости. В результате, сопротивления движению сильно возрастают, превышая при критических скоростях нормальные сопротивления движению почти на 3 kg/t.

Заканчивая изучение колебательных процессов, необходимо отметить, что эти колебания были причиной больших осложнений в работе электровозов с рычажными и зубчато-рычажными передачами. Помимо значительных добавочных паразитных потерь, резонансные колебания были неоднократно источниками крайне беспокойного хода локомотивов, вызывая в некоторых случаях полное расстройство передачи и даже поломку некоторых ее частей. В настоящее время, благодаря изучению резонансных колебаний борьба с ними облегчилась, но все-таки и до сего времени опасность их возникновения не может считаться окончательно устраненной.

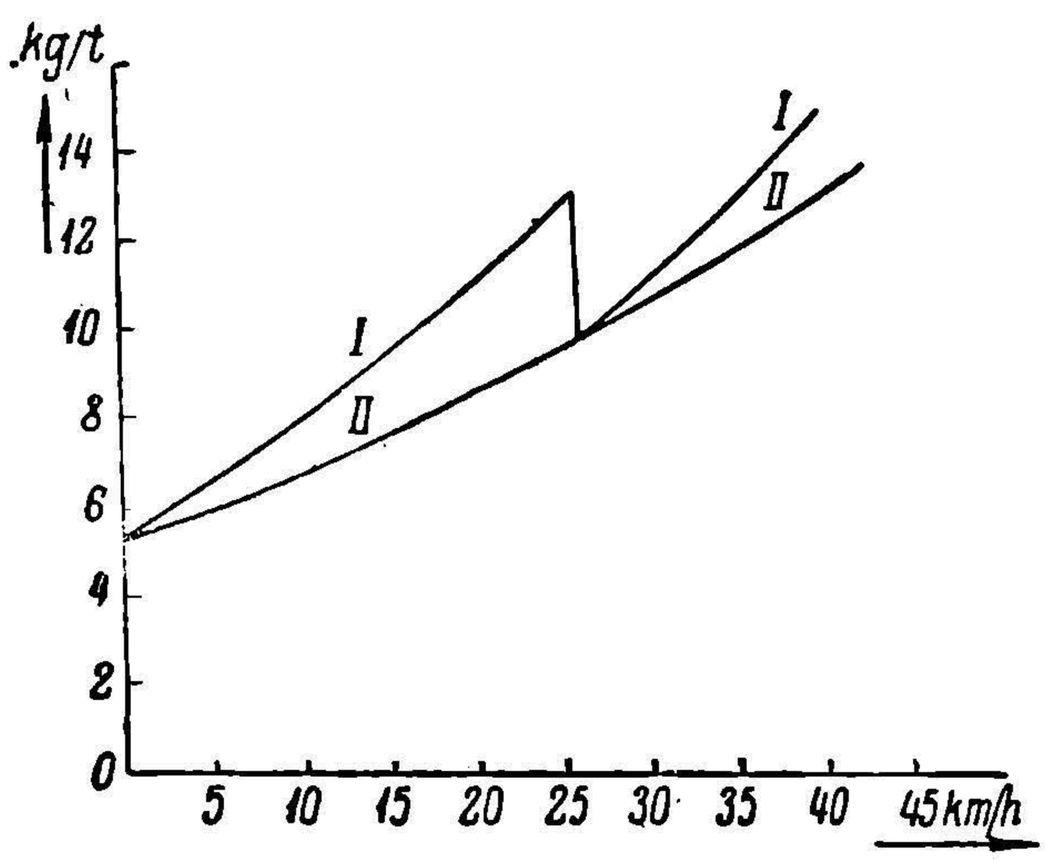


Рис. 443. Кривые резонансных колебаний электровоза австрийских ж. д.

При индивидуальных передачах колебательные процессы не представляют практически никакой опасности. Отсутствие длинных частей, шатунов и спарников, отсутствие кривошипных подшипников и относительно точная сборка всего механизма обычно вполне предотвращают появление опасных колебаний. Даже самая опасная в этом отношении индивидуальная передача Buchli практически не представляет никакой опасности в отношении колебательных процессов. Если применять в ней пружинные шестерни, то частота собственных колебаний получается весьма незначительной. Так, например, у электровоза BBC типа 1—C—2 при общей мощности $PS_h = 3 \times 700$ на основании данных завода, можно дать для каждого двигателя при прежних обозначениях следующие параметры колебаний с отнесением массы к ободу ведущего колеса:

$$m = 62{,}7 \frac{\text{kg} \cdot \text{sec}^2}{\text{m}}$$

и

$$c = 35300 \text{ kg/m},$$

где c — жесткость пружин шестерни. Эти цифры дают:

$$\nu_c = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{35\,300}{62{,}7}} = 3{,}76 \text{ Hz}.$$

Если учесть эластичность вала двигателя:

$$\nu_c = 3{,}68 \text{ Hz}.$$

В передаче Buchli сила вынуждения будет определяться выражением третьей гармоники (рис. 406). Скорость, соответствующая собственным колебаниям:

$$v_c = 67 \text{ km/h}.$$

В действительности она, из-за всякого рода игры (зубцы, шарниры, подшипники) снизилась до 70%:

$$v_c = 47 \text{ km/h}.$$

Частота колебаний вынуждающей силы — тройная, и поэтому критической скорости резонансных колебаний следует ждать при

$$v_{кр} = 47/3 = 15{,}7 \text{ km/h},$$

т. е. она настолько мала, что резонансные колебания совершенно неопасны.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

7. Непосредственная насадка двигателей на ведущие оси.

Идея насадки двигателей на ведущие оси с первого взгляда кажется весьма заманчивой. Избежать промежуточной передачи по целому ряду соображений очень желательно. Передача является источником значительных потерь. Коэфициент полезного действия зубчатых передач в условиях эксплоатации нормально не превышает 96—97,5%, а у рычажных и, особенно, зубчато-рычажных, с учетом паразитных колебаний, он не превосходит в среднем 94—95%. Кроме того, передачи рычажного и зубчато-рычажного типа являются очень часто причиною неспокойного хода локомотива. Все передачи нормально требуют большого количества смазочных материалов. Ввиду всех этих соображений становится вполне понятным стремление избавиться от передач.

Первые попытки осуществить тягу электрических поездов без промежуточной передачи вылились в применение двигателей, у которых вал ротора был полым, как в системе Вестингауза. Он сопрягался с ведущими колесами посредством пружин. Но в таком виде система не удержалась. Пружины оказались в тяжелых условиях работы, и, кроме того, габаритные соотношения получались неблагоприятными. Ввиду этого стали отдавать предпочтение двигателям с насадкой на ось только одного ротора и креплением электромагнитов к раме локомотива. Тип подобного двигателя был уже разобран в отделе II „Тяговые электродвигатели Там же были указаны и основные его недостатки.

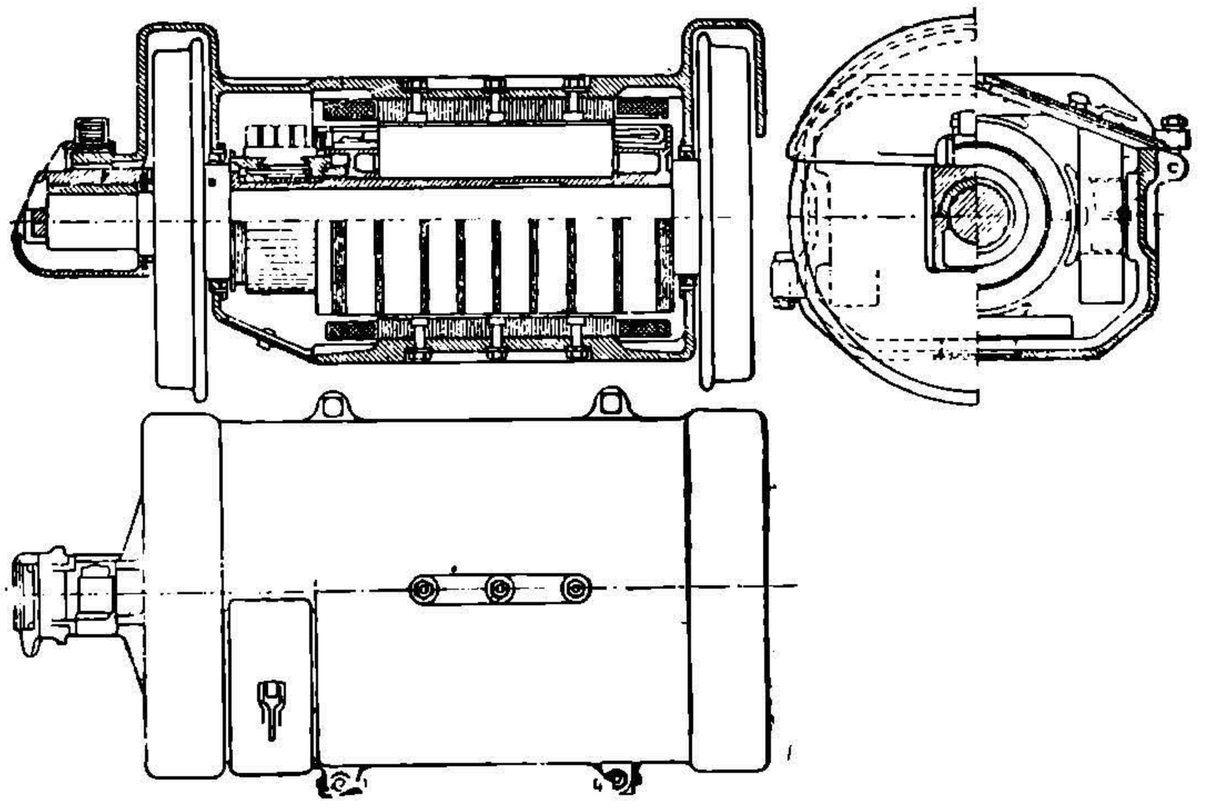


Рис. 444. Осевой двигатель.

Подобные типы локомотивов применяются преимущественно в Америке. Они имеют место на дорогах N.C.R.R. и Ch.M.St.P.R. В Европе они имеются только на французской дороге Paris-Orléans и то в виде пробных. Общую схему расположения двигателей рассматриваемых локомотивов можно видеть из рис. 30 и 31.

В общем работа рассматриваемого типа электровозов оказалась достаточно удовлетворительной. Жесткая нагрузка на ось, которой здесь приходится сильно опасаться, держится в достаточно приемлемых размерах, порядка 4300—4500 kg. Главную причину малого распространения этих электровозов нужно искать в несовершенстве двигателей с точки зрения экономики их производства. Примером применения двигателей с непосредственной насадкой двигателя на ось для вагонов может служить рис. 444.

8. Сравнительная оценка различных систем передач.

Оценивать передаточные механизмы и их применимость для различных условий работы нужно с точки зрения экономики и затем с точки зрения технических достоинств их как в отношении прочности и надежности в работе, так и в отношении стоимости их в эксплоатации.

При решении вопроса о выборе передачи с точки зрения экономики необходимо иметь в виду, что самою дорогою частью в электровозе, зависящей от той или другой системы передачи, являются несомненно двигатели. Стоимость самой передачи обычно относительно невелика, и потому выбор передачи, главным образом, определяется желанием иметь по возможности дешевый и легкий двигатель. О весовых соотношениях различных передач может дать представление табл. 66.

Как уже было отмечено выше, важнейшим фактором, обеспечивающим получение легкого и дешевого двигателя, является применение по возможности высоких окружных скоростей для роторов и, как следствие этого, коллекторов электродвигателей. Согласно существующей практике строительства в настоящее время при-

НБ УГМНТ (ДІІТ)

ТАБЛИЦА 66.

Сравнительные весовые данные передач в kg.

Типы передач	Зубчатая	Система полого вала	Система Buchli	Зубчато-рычажная
Шестерни	2 × 125	2 × 125	260	200
Большие зубчатые колеса .	2 × 365	—	660	—
То же с валом	—	1565	—	1375
Шатуны и спарники .	—	—	54	180
Зубчатые сегменты . . .	—	—	74	—
Рама передат чного механизма .	—	—	—	270
Кожухи для покрытия передачи . .	2 × 135	125	740	740
Комплект крепления промежуточного вала и моторные подшипники	180	480	170	135
Внешние подшипники для шестерен и больших колес . .	—	—	120	—
Полускаты	2100	2000	2230	2400
Итого .	3350	4420	4300	5300

нимают наибольшую расчетную скорость на периферии роторов двигателей около 50—55 m/sec. Ввиду этого желательно в каждом частном случае выбрать такую систему передачи, которая дала бы возможность применить двигатели с указанной окружной скоростью. Нижеприводимые данные показывают, каковы вообще перспективы в отношении мощностей отдельных двигателей при различных передачах в связи с габаритными ограничениями и в связи с требованиями экономического расчета двигателей. В основу изложения этого вопроса положена работа Wisty (Л. 233).

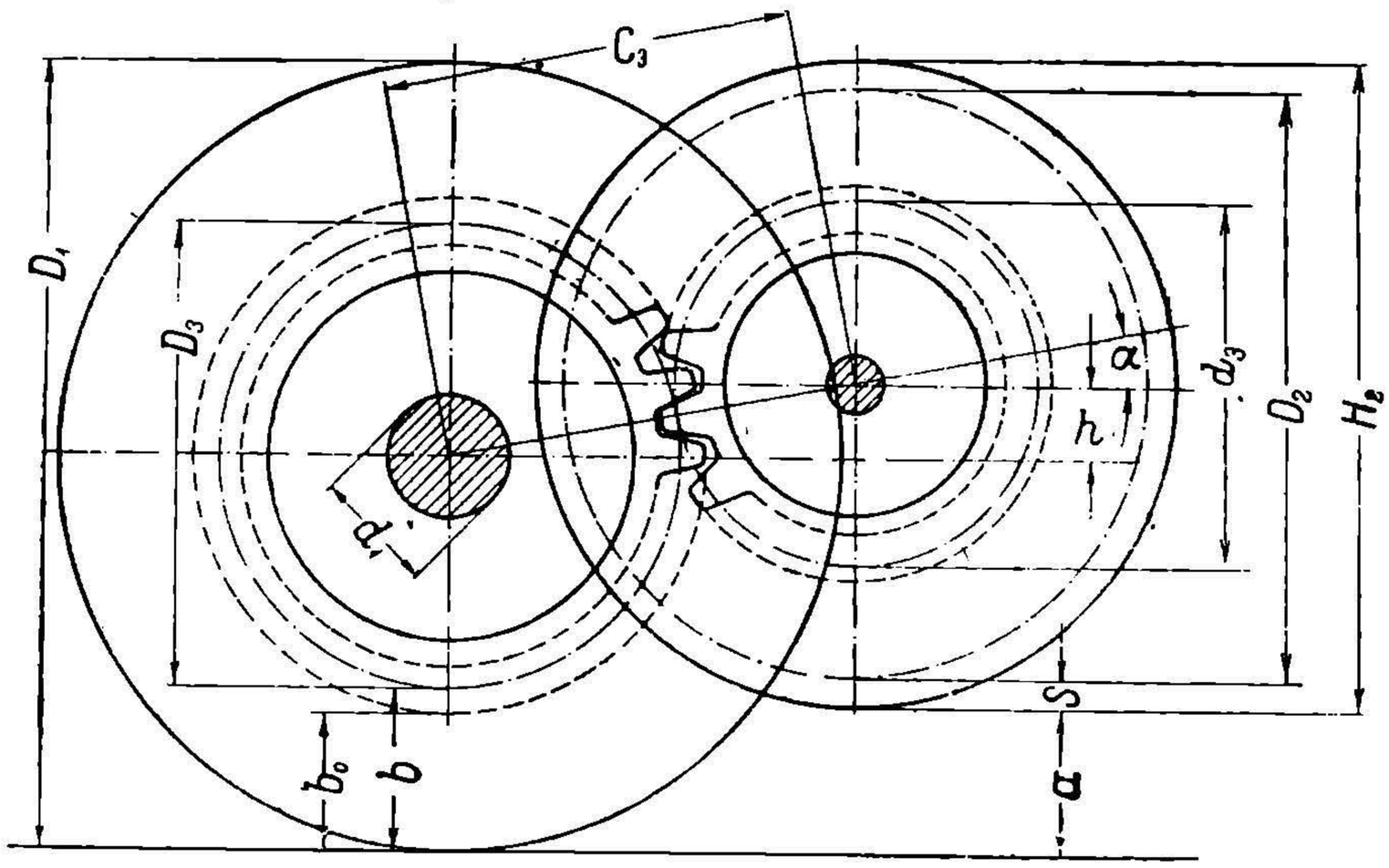


Рис. 445. Схема габаритных соотношений при зубчатой передаче.

Зубчатая передача простого типа. Основные габаритные элементы передачи приведены на рис. 445. Здесь D_1, D_2 и d_1 в метрах — соответственно диаметры ведущего колеса, ротора и оси полускатов, H_2 — высота кожуха двигателя, a и b_0 — наименьшие допустимые расстояния кожуха двигателя и кожуха передачи до головки рельсов. Обычно эти величины не меньше 100 mm. При трамвайном движении часто $a = 120$ и $b_0 = 110-112$ mm. Расстояние начальной окружности до уровня головки рельсов обозначено через b. Величина h определяется наклоном угла α, тангенс которого, как было указано выше, берут не больше 0,14—0,15 Через D_3 и d_3 обозначены диаметры начальных окружностей большого и малого зубчатых колес. Расстояние s дает размеры толщины статора, включая междужелезное пространство. В дальнейших выкладках приняты также следующие обозначения:

k_3 — передаточное число;
v_2 — окружная скорость ротора в m/sec;
v_1 — скорость электровоза в km/h;
n_1 — число оборотов его колеса в min;
n_2 — число оборотов двигателя в min;
v_3 — окружная скорость большого зубчатого колеса в m/sec.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

При этих условиях соотношения между основными элементами рабочего механизма будут следующие:

$$r_3 + R_3 = C_2\ ; \qquad r_3 = \frac{C_3}{k_3 + 1}\ ; \qquad R_3 = \frac{k_3 C_3}{k_3 + 1},\ ; \qquad v_2 = \frac{\pi D_2 n_2}{60};$$

$$v_1 = 3{,}5\frac{\pi D_1 n_1}{60}\ ; \qquad v_3 = \frac{\pi n_2 d_3}{60} = \frac{2\pi n_2 C_2}{60(k_3 + 1)}\ ; \qquad v_3 = \frac{2v_2 C_3}{(k_3 + 1) D_2};$$

$$k_3 = \frac{2v_2 C_3}{v_3 D_2} - 1.$$

Далее, для необходимости соблюсти габаритные соотношения имеем:

$$C_3 \geqslant \frac{D_2 + 2s + d_1}{2}.$$

Из последних двух выражений выводится важное соотношение для передаточного числа:

$$k_3 \geqslant \frac{(D_2 + 2s + d_1)\, v_2 - v_3 D_2}{v_3 D_2}. \tag{464}$$

Заметив далее, что

$$v_3 = \frac{\pi (D_1 - 2b) n_1}{60} = \frac{(D_1 - 2b) v_2}{k_3 D_2},$$

можно из выражения (464) получить основное уравнение, ограничивающее диаметр ротора в связи с типом передачи:

$$D_2 \leqslant \frac{(D_1 - 2b - 2s - d_1)}{\frac{v_2 - v_3}{v_2}}. \tag{465}$$

Теперь необходимо выяснить, какое ограничение накладывает рассматриваемый тип передачи на мощность двигателей и какие наибольшие мощности нормально при нем достижимы. При анализе этого вопроса наиболее рационально исходить из основного расчетного уравнения (10) тягового двигателя, с введением постоянной C:

$$KW_h = \frac{D_2^2 l_2 n_2}{C 10^6}.$$

При переводе размерности стоящего в этой формуле диаметра D_2 из сантиметров в метры и введении окружной скорости ротора v_2:

$$KW_h = \frac{60 D_2 l_2 v_2}{\pi C} = A\frac{v_2^2}{v_2 - v_3}, \tag{466}$$

где

$$A = \frac{60 l_2}{\pi C}(D_1 - 2b - 2s - d_1).$$

Данную величину A можно принять за постоянную, так как длина железа ротора l_2 и высота железа статора (кожуха и магнитных сердечников) относительно мало изменяются с изменением мощности в тех пределах, которые здесь возможны. При переходе к предельным мощностям l_2 приходится брать наибольшую возможную, а s, как указано, в этих пределах влияет относительно мало.

Из рассмотрения выведенных соотношений следует, что мощности, которые можно получить при зубчатой передаче, определяются, главным образом, соотношением $\frac{v_2^2}{v_2 - v_3}$. При увеличении этого числа мощности растут. Нетрудно видеть, что в данном случае мощности зависят от соотношения v_2 и v_3. Если исходить из того требования, чтобы v_2 соответствовало экономическим предпосылкам, то в зависимости от мощности может оказаться выгодным взять или большее, или меньшее значение v_3. При больших двигателях, особенно, когда речь идет о предельных мощностях, несомненно, желательно иметь для v_3 относительно более высокое значение. Практически величина v_3 обычно бывает ограничена механическими требованиями и очень часто по этой причине ее не представляется возможным выбрать в соответствии с экономикой расчета двигателя, т. е., главным образом, с величиной $v_2^{\frac{1}{2}}$. Если исследовать мощности в зависимости от $\frac{v_2^2}{v_2 - v_3}$ при $v_3 = \text{const}$, то изменение мощностей в функции от v_2 подчиняется закону гиперболы. При этом характерно, что мощности могут расти не только с увеличением v_2, но и с уменьшением ее. Последнее обстоятельство, на первый взгляд мало понятное,

НБ УДУНТ (ДІІТ)

объясняется тем, что при уменьшении v_2 можно уменьшить $k_з$ и за счет этого увеличить C_3, что дает возможность повысить и D_1, причем это увеличение может иметь на мощность большее влияние, чем уменьшение v_2. При выявлении влияния v_2 и v_3 на мощность не нужно упускать из виду, что возможность увеличения мощности согласно формуле (465) определяется только продольными размерами двигателя, которые, если их в специальных случаях не ограничивает габаритная длина тележек, можно выбирать вообще в значительных пределах.

Иная картина получается, если учесть габаритные ограничения двигателя по высоте. Тогда может оказаться, что мощности, достижимые с точки зрения уравнения (465), не могут быть осуществлены из-за недостатка места по вертикали. Проверку допустимых мощностей по высоте следует производить по формуле:

$$D_2 \leqslant D_1 + 2(h - s - a). \qquad (467)$$

Естественно, что диаметры роторов двигателей, удовлетворяя уравнению (465), одновременно должны удовлетворять и выведенному соотношению.

Другим очень важным ограничением, которое часто ставит предел желательной величине v_2, является передаточное число $k_з$. При очень большом его значении часто не представляется возможным выполнить шестерню из-за чрезмерно малого количества зубцов.

В качестве критерия, определяющего при данной передаче предельно возможную для двигателя v_2, равную 50 m/sec, может служить табл. 67, приводимая Wisty.

ТАБЛИЦА 67.

Основные параметры подвижного состава с простой зубчатой передачей при $v_{2max} = 50$ m/sec.

D_1	v_{1max}	n_{1max}	v_{3max}	D_2	n_{2max}	$k_з$	KW при $0{,}6\,n_{2max}$	F в kg на оси	Необх. сцепной вес в t на ось	a в mm	$\frac{h}{C_3}$
1,05	50	252	8,70	0,420	2380	9,40	120	1460	10	183	—
	75	378	14,85	0,495	2020	5,35	150	1 220	10	170	0,05
	100	505	19,8	0.580	1740	3,45	180	1100	10	170	0,134
	150	222	10,5	0,605	1575	7,10	200	2450	15	188	
1,2	75	332	15,65	0,680	1470	4,42	220	1800	14	170	0,062
	100	442	20,8	0,800	1230	2,78	270	1650	14	170	0,150
	125	553	20,8	0,530	1870	3,38	160	735	7	225	—
1,4	50	189	10,9	0,845	1130	6,00	290	3550	22	170	—
	75	283	16,4	0,960	1020	3,60	340	2750	21	170	0,105
	100	378	20,6	0,985	985	2,60	350	2140	18	170	0,120
	125	474	20,6	0,680	1440	3,04	220	1070	10	235	—
1,6	50	165	11,2	1,070	910	5,50	380	4650	29	170	0,038
	75	248	16,9	1,250	775	3,12	470	3800	28	160	0,126
	100	332	20	1,100	870	2,62	400	2450	21	170	0,063
	125	415	20	0,800	1220	2,94	270	1320	12	275	—
1,8	50	147	11,5	1,300	735	5,00	500	6100	38	170	0,05
	75	221	17,3	1,500	635	2,87	590	4800	35	160	0,135
	100	295	20	1,320	725	2,45	500	3060	26	170	0,06
	125	368	20	1,000	995	2,70	360	1750	16	275	—

Из данной таблицы видно, что при относительно малых скоростях движения и небольших D_1, что, например, имеет место при трамвайных условиях, достижение экономических v_2 практически невозможно. Трудно достигнуть их и для пригородного движения при $D_1 = 1050$ mm, причем здесь главные ограничения, как видно из таблицы, могут быть обусловлены передаточным числом. Что касается локомотивов, где D_1 можно брать в довольно широких пределах, то здесь достижение $v_2 = 50$ m/sec вполне возможно даже при относительно небольших скоростях движения, пригодных для товарного движения. Ввиду этого разбираемая передача в области применения ее к электровозам может в очень широком диапазоне мощностей обеспечить получение легких двигателей, построенных с хорошим использованием материала.

О мощностях двигателей, которые применяются при разбираемой подвеске, нужно сказать следующее. При трамвайных условиях движения, когда приходится на оси вагона оставлять место для воздушного компрессора, нормальные конструк-

НБ УГУНТ (ДІІТ)

ции двигателей дают возможность иметь мощности при широкой колее до 85 kW_h, что с избытком достаточно для практики. При наиболее часто применяемой на трамваях колее в 1 m с $D_1 = 650—850$ mm эти мощности можно довести до 50—70 kW_h, но при этом поместить компрессор между колесами уже не удается. Если же применить специальные конструкции для двигателей с внутренними подшипниками и с насадкой зубчатого колеса на втулку центра, то без помещения компрессора мощности двигателей даже при $D_1 = 850$ можно довести до 250 kW_h.

В случае же электровозов, как показывает табл. 67, даже при условии наибольшего использования материала для $v_2 = 50$ m/sec можно иметь мощности, вполне удовлетворяющие требованиям, так как практически у такого типа электровозов на одной оси нормально требуется редко мощность выше 550 kW_h. Ввиду этого, с точки зрения возможных мощностей, разбираемая передача дает широкое решение вопроса. Например, у электровоза Bergmann'a для немецких дорог эта мощность доведена до 550 kW_h. Нужно отметить, что табл. 68 дана при ширине колеи в 1435 mm. В СССР колея шириною в 1524 mm, и потому у нас приведенные в табл. 68 мощности можно значительно повысить.

Анализ показывает, что неподрессорная часть веса электровозов при данной системе получается не особенно высокой. Эти веса вообще даже ниже, чем у большинства паровозов. Центр тяжести у таких электровозов тоже лежит не особенно низко, так как вес электродвигателей составляет не больше 40% от веса общего оборудования, и аппаратуру можно поместить над двигателями, тем самым подняв центр тяжести.

Передача с полым валом. Основное уравнение для диаметра ротора каждого из сдвоенных двигателей, по существу, таково же, как и у двигателей с рассмотренной подвеской. Но преимущество этой системы в том, что здесь высота двигателя практически неограничена. Ограничения здесь могут касаться, главным образом, диаметра зубчатого колеса. Диаметр ротора, как и для предыдущей системы, при диаметре полого вала d_1, определяется соотношением:

$$D_2 \leqslant \frac{D_1 - (2b + 2s + d_1)}{\frac{v_2 - v_3}{v_2}}. \qquad (468)$$

Мощности, которые в данном случае можно иметь при экономическом использовании окружной скорости, видны из табл. 68.

ТАБЛИЦА 68.

Основные параметры подвижного состава при передаче с полым валом при $v_{2max} = 50$ m/sec.

D_1	v_{1max}	n_{1max}	v_{3max}	D_2	n_{2max}	k_3	KW при $0{,}6\, n_{2max}$	KW на ось	F в kg на ось	Необх. вес на ось в t по сцеплению
1,4	50	189	10,9	0,665	1430	7,55	210	420	5100	32
	75	283	16,4	0,770	1240	4,40	260	520	4250	31
	100	378	20	0,780	1220	3,23	260	520	3180	26
	125	474	20	0,425	1240	4,72	120	240	1180	11
1,6	50	165	11,2	0,910	1045	6,34	320	610	7800	49
	75	248	16,9	1,060	900	3,63	380	760	6200	45
	100	332	20	0,840	1130	3,40	290	580	3550	29
	125	415	20	0,540	1760	4,25	170	340	1660	15
1,8	50	147	11,5	1,150	830	5,65	430	860	10500	67
	75	221	17,3	1,330	720	3,25	500	1000	8180	59
	100	295	20	1,130	845	2,86	420	840	5150	42,5
	125	368	20	0,715	1330	3,60	240	480	2350	21
2,0	50	133	11,85	1,400	680	5,10	540	1080	13200	84
	75	200	17,80	1,660	575	2,87	660	1320	10700	75
	100	265	20	1,350	705	2,66	520	1040	6350	52,5
	125	332	20	0,865	1100	3,32	300	600	2930	26,5

При наличии сдвоенных двигателей для данной передачи можно иметь мощности на каждой оси выше, чем это возможно по сцеплению. Данная передача должна считаться наиболее подходящей для скорых электровозов. Центр тяжести

НБ УДУНТ (ДІІТ)

здесь лежит высоко. Кроме того, электровоз получается весьма компактным, так как значительную часть оборудования, как уже отмечалось, можно поместить над двигателями, не занимая места по длине, укорачивая тем самым электровоз и повышая в то же время положение его центра тяжести.

Передача Buchli. Для лучшего использования двигателей у данной передачи приходится обычно располагать центр большого зубчатого колеса над центром оси электровоза (рис. 446). Если применить к данной передаче тот же метод выкладок, что и для подвесноосевых двигателей, можно получить следующие выражения:

$$C_3 = \frac{D_1 + d_2 + 2h - 2e}{2};$$

$$C_3 \geqslant \frac{D_2 + d_1 + 2s - 2e}{2};$$

$$v_3 = \frac{\pi (D_1 - 2b + 2e) n_1}{60};$$

$$D_2 \leqslant \frac{D_1 - 2\left(b + s + \frac{d_1}{2} - 2e\right)}{\frac{v_2 - v_3}{v_2}}. \qquad (469)$$

Главное ограничение при определении D_2 по формуле (469) заключается в необходимости иметь определенное превышение положения вала двигателя над ребордой колеса. Ввиду игры рессор это превышение рекомендуется делать порядка 60—70 mm. Помимо того, габарит двигателя не должен задевать за ось электровоза. Последнее требует соблюдения условия:

$$D_2 \leqslant D_1 - 2s + d_2 - d_1 + 2h. \qquad (470)$$

Наконец, диаметр большого колеса тоже ограничен условием, чтобы кожух его не задевал за поверхность пути, причем считаться надо с возможной игрой рессор. Это расстояние не должно быть меньше 150—250 mm.

Мощности двигателей, которые можно получить при данной системе передачи, приведены в табл. 69. Из нее видно, что они могут вполне соответствовать предельным, возможным по сцеплению. Только в некоторых случаях нельзя получить предельную окружную скорость, главным образом, из-за величины h.

ТАБЛИЦА 69.

Основные параметры электровозов с передачей Buchli при $v_{2max} = 50$ m/sec.

D_1	v_{1max}	n_{1max}	v_{3max}	v_{2max}	e в mm	D_2 в m	h в mm	n_{2max}	$k_э$	KW при $0{,}6n_{2max}$	F в kg на ось	Необх. вес на ось в t по сцеплению
1,4	50	189	11,5	50	30	0,910	— 45	—	—	—	—	—
			11,5	30,7	30	1,120	60	523	2,75	240	2900	17,5
	100	378	20	50	30	0,915	— 42	—	—	—	—	—
			20	39,3	30	1,120	60	670	1,77	300	1470	12,5
	125	474	20	50	30	0,570	—215	—	—	—	—	—
			20	29	30	1,120	60	495	1,04	220	1070	10,0
1,6	50	165	11,7	50	30	1,150	— 15	—	—	—	—	—
			11,7	36	30	1,300	60	530	3,20	350	4250	25,5
	100	332	20	50	30	1,120	— 30	—	—	—	—	—
			20	41,3	30	1,300	60	606	1,82	400	2450	20,5
	125	415	20	50	30	0,735	—222	—	—	—	—	—
			20	30,3	30	1,300	60	445	1,07	280	1370	12,5
1,8	50	147	11,95	50	30	1,130	—125	—	—	—	—	—
			11,95	40,7	30	1,500	60	520	3,54	450	5750	34,5
	100	295	20	50	30	1,310	— 35	—	—	—	—	—
			20	42,4	30	1,500	60	540	1,83	500	3050	25,5
	125	368	20	50	30	0,900	—240	—	—	—	—	—
			20	31,3	30	1,500	60	400	1,09	360	1750	16,0

Габарит электровоза при передаче Buchli получается удовлетворительным. Однако, при нем приходится иметь внутреннюю раму, и нельзя обычно разместить аппара-

НБ УИМТ (ДІІТ)

туру управления над двигателями. Зубчатая передача работает в очень хороших условиях при хорошей смазке. Практически BBC доводит мощности двигателей до 850 PS_h.

Передачи зубчато-рычажные. Для передачи без помещения центра оси зубчатого колеса над центром оси электровоза габаритные соотношения определяются такой же формулой, как и для системы полого вала:

$$D_2 \leqslant \frac{D_1 - 2b - 2s - d_1}{\frac{v_2 - v_3}{v_2}}. \qquad (471)$$

Размеры самих двигателей здесь практически ограничиваются габаритом относительно мало. Однако, большие размеры двигателей все-таки осложняют конструкцию, так как тогда приходится сильно раздвигать оси электровозов и удлинять жесткую базу. Главное ограничение мощностей здесь обусловлено большим зубчатым колесом. При сдвоенных двигателях колесо это лучше используется, и потому при них можно получить значительно более высокие мощности.

Зубчато-рычажная передача с повышением h центра вала зубчатого колеса дает возможность иметь бо́льшие мощности. Для нее имеет место соотношение:

$$D_2 \leqslant \frac{D_1 - 2b - 2s - d_1 + 2h}{\frac{v_2 \quad v_3}{v_2}}. \qquad (472)$$

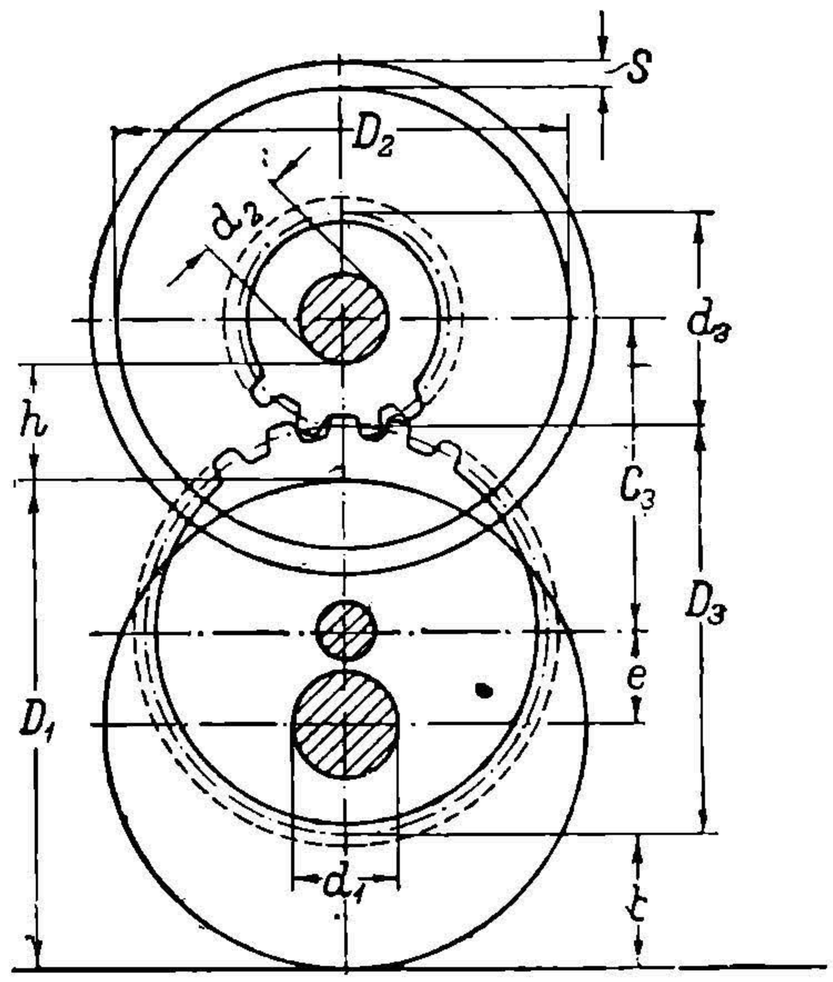


Рис. 446. Схема габаритных соотношений при передаче Buchli с качающимися секторами.

Как уже отмечалось, повысить центр передаточного вала можно по различным способам. Большое повышение при обычной системе бескулисного камня допускать нельзя, так как игра рессор тогда весьма неблагоприятно напрягает сцарниковые тяги. В данном случае $\sin\alpha \cong \operatorname{tg}\alpha \leqslant 0{,}015 - 0{,}02$, и для величины h приходится брать обычно не больше 15—30 mm. При применении кулисного камня повышение может быть значительно больше и доходить до 75—120 mm при $\sin\alpha \cong \operatorname{tg}\alpha \leqslant 0{,}08$. Недостатки данной системы — трудность смазки и относительная тяжесть камня и противовесов. Так как система эта не дает достаточного повышения и вместе с тем содержит такие нежелательные в эксплоатации части как ползуны, то она большого распространения не имеет и применяется только на локомотивах второстепенного значения. Значительно большие возможности дает система Kando. При ней повышение можно доводить до 300—350 mm. Однако, особенно больших повышений и при ней получить не удается. Рама тяжела и сильно перегружает пальцы кривошипов. В отношении колебательных процессов система Kando представляет значительную опасность. Здесь имеются два двигателя, жестко соединенные, и, кроме того, кулисный камень имеет неизбежную игру. Наиболее целесообразна данная система, как показывает практика, для трехфазных электровозов, где благодаря двигателям происходит сильное успокоение колебаний.

Значительное повышение можно получить при длинных наклонных шатунах. Наклон можно брать порядка $\operatorname{tg}\alpha = 0{,}08$ при $h = 280$ mm. Недостаток этой системы — в возможности возникновения резонансных колебаний, так как здесь из-за длинных шатунов особенно возможны неточность сборки и игра в подшипниках.

При системах передач с отбойным и передаточным валами можно получить высокое положение центра тяжести электровоза и иметь большой простор как в выборе размеров самого двигателя, так и в отношении размещения аппаратуры. Кроме того, можно иметь относительно небольшой диаметр ведущих колес.

При применении данной системы ограничение по расстоянию от поверхности рельсов отпадает. Кроме того, скорость v_3 непосредственно не ограничивается диаметром ведущего колеса, причем v_3 может быть значительно выше v_1. Здесь

$$D_2 \leqslant \frac{3{,}3D_1\frac{v_3}{v_1} - 2s - d_1}{\frac{v_2 - v_3}{v_2}}. \qquad (473)$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Ограничения в данном случае могут быть только по габариту самого электровоза, главным образом по высоте его. Данная система особенно пригодна для тихоходных электровозов и в частности для узкой колеи. Недостатки — сложность передачи, большие передаточные потери и возможность возникновения резонансных колебаний из-за трудности правильной сборки и большого числа подшипников. Данные о параметрах электровозов с зубчато-рычажными передачами при $v_{2\max} = 50$ m/sec приведены в табл. 70.

ТАБЛИЦА 70.

Основные параметры электровозов с зубчато-рычажными передачами при $v_{2\max} = 50$ m/sec.

$h = 0$									$h = 200$ mm						С высоко лежащим двигателем при отбойном вале и система Kando					
D_1	$v_{1\max}$	$n_{1\max}$	$v_{3\max}$	D_2	$n_{2\max}$	$k_з$	KW при $0{,}6\,n_{2\max}$	F на оси	$v_{3\max}$	D_2	$n_{2\max}$	$k_з$	KW при $0{,}6\,n_{2\max}$	F на оси	$v_{3\max}$	D_2	$n_{2\max}$	$k_з$	KW при $0{,}6\,n_{2\max}$	Давление на ось по сцеплению
1,05	50	252	10,5	0,450	2120	8,00	130	—	15,8	1,030	925	3,68	360	4300	20	1,550	615	2,42	590	29,5
	70	350	14,6	0,510	1870	5,35	150	1300	20	0,965	990	2,82	340	3050	20	0,965	990	2,82	340	—
1,2	50	222	11,1	0,645	1480	6,66	210	—	15,7	1,190	800	3,60	440	5250	20	1,880	506	2,28	730	36,5
	80	350	17,4	0,765	1250	3,57	260	1980	20	1,050	910	2,60	365	2800	20	1,050	910	2,60	365	—
1,4	50	190	11,4	0,870	1100	5,78	300	—	15,4	1,440	663	3,50	540	6600	20	2,320	410	2,15	1000	50,0
	93	350	20	1,150	910	2,60	365	2400	20	1,050	910	2,60	365	2400	20	1,050	910	2,60	365	—
1,6	50	165	11,6	1,100	866	5,25	400	—	15,2	1,680	568	3,45	645	7900	20	2,770	334	2,02	1210	60,0
	106	350	20	1,050	910	2,60	365	2100	20	1,050	910	2,60	365	2100	20	1,050	910	2,60	365	—
1,8	50	147	11,9	1,350	705	4,80	510	—	15,0	1,930	495	3,36	750	9100	20	3,230	—	—	—	—
	100	295	20	1,320	722	2,45	510	3120	20	1,320	722	2,45	510	3120	20	1,320	722	2,45	510	17,5
	119	350	20	1,050	910	2,60	365	1880	20	1,050	910	2,60	365	1880	20	1,050	910	2,60	365	—

Рычажные передачи. При ней выражение для диаметра ротора получаем в виде:

$$D_2 = \frac{3{,}6 v_2}{v_1} D_1. \tag{474}$$

При обычных габаритах $D_2 \leqslant 2700$ mm. Кроме того, по механическим условиям нельзя допускать $n_1 > 400$ в min и $D_1 < 1050$ mm. При данных условиях, чтобы достигнуть $v_2 = 50$ m/sec, необходимо иметь наибольшую скорость движения поезда не меньше:

$$v_1 = \frac{3{,}6 \times 50 \times 1{,}05}{2{,}7} \cong 70 \text{ km/h}.$$

При величинах ниже данной окружные скорости, требуемые экономикой расчета, получить нельзя. Таким образом, данная система передачи приемлема только для быстроходных электровозов. Недостаток ее, как было уже указано,—в большой склонности к резонансным колебаниям. Наименее опасной в этом отношении надо считать систему Bergmann'a с двумя отбойными валами (рис. 424).

Якорноосевые двигатели. Основное уравнение размеров двигателя по существу то же, что и в предыдущем случае.

Если считать, что поверхность якоря должна находиться над уровнем поверхности рельсов на a, то ограничение по диаметру можно представить в виде:

$$D_2 \leqslant D_1 - 2a. \tag{475}$$

При данных системах нельзя обычно получить высокие окружные скорости. Точно так же ограничены и мощности. На практике:

$$v_2 < 30 \text{ m/sec}$$

и

$$KW_h < 400.$$

Окончательное суждение о сравнительной выгодности различных систем передачи с точки зрения лучшего использования материала в двигателе и его стоимости можно составить себе, исходя из общей стоимости двигателей и локомотива. Можно считать приблизительно материал в двигателях использованным одинаково, когда их число заменяется другим при одновременном изменении передаточного

НБ УПУНТ (ДІІТ)

числа в обратном отношении. Если мы имеем соответственно N_1 и $k'_з$, N_2 и $k''_з$, где N_1 и N_2 — числа двигателей, то принцип одинакового использования требует соотношения:

$$k''_з N_1 = k'_з N_2. \tag{476}$$

Например, при чисто рычажной передаче, если $k'_з = 1$ и $N_1 = 1$, замена одного двигателя несколькими выгодна только в том случае, если число двигателей будет меньше передаточного числа зубчатой передачи:

$$N_2 \leqslant k''_з.$$

Приведенное соотношение легко выводится из основных уравнений мощности и силы тяги, если только при выводе его сделать некоторые допущения.

Следует указать, что данное соотношение выведено без учета габаритных ограничений. В действительности, конечно, они могут нарушить указанный принцип. Например, при тихоходных электровозах рычажная передача может оказаться значительно менее выгодной, даже если в известных пределах:

$$N_2 > k''_з.$$

Вообще, все приведенные выше выкладки показывают, что двигатели с чисто рычажными передачами и двигатели осевые могут иметь некоторые шансы для своего применения при относительно высоких скоростях. Однако, и тогда приходится весьма считаться с техническим несовершенством этих систем. Сложность механизма, резонансные эффекты в рычажных передачах и значительные неподрессоренные веса при осевых двигателях диктуют вообще весьма осторожный подход к указанным системам.

Переходя к передачам с зубчатым звеном в том или другом его виде, можно констатировать, что в электровозах все подобные системы практически дают возможность получить легкие двигатели с хорошим использованием материала.

В отношении зубчато-рычажных передач необходимо иметь в виду, что механизм у них значительно сложнее по конструкции, дороже в эксплоатации и имеет меньший коэфициент полезного действия, чем у индивидуальных зубчатых передач. Например, расход масла на смазку при рычажных передачах значительно выше, чем при индивидуальных зубчатых. По немецким данным, на 100 электровозокилометров этот расход определяется соответственно для первых в 25—45 kg и для вторых 10—15 kg. Помимо этого, рычажные передачи склонны к резонансным колебаниям, и для предотвращения их требуется очень кропотливая пригонка частей передачи, что очень удлиняет срок ремонта электровоза.

Индивидуальные зубчатые передачи просты по конструкции и не страдают резонансными колебаниями. Очень проста и дешева в эксплоатации система простой зубчатой передачи. Для тихоходных электровозов, особенно при постоянном токе, она применяется предпочтительно перед всеми другими. При однофазных двигателях, где желательно иметь все время доступ к коллектору и где по условиям экономики расчета особенно важно иметь большие мощности, с этой передачей конкурирует зубчато-рычажная, хотя в последнее время и в области однофазного тока намечается сдвиг в пользу применения простой трамвайной подвески. Трамвайная подвеска на практике чаще всего применяется при скоростях до 60—75 km/h, а иногда даже до 100—110 km/h. Индивидуальные передачи Вестингауза и Buchli применимы преимущественно для скорых электровозов. Здесь они в настоящее время имеют очень широкое применение, особенно передача Вестингауза и ее варианты.

III. КОНСТРУКЦИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ.

1. Классификация подвижного состава.

Подвижной состав электрических железных дорог состоит в основе из вагонного парка и электровозов. В свою очередь вагонный парк разделяется на вагоны прицепные и моторные. Прицепной вагонный парк содержит в себе вагоны пассажирские и вагоны товарные. Последние разделяются на крытые, полувагоны, платформы, цистерны и целый ряд других типов, то или другое видоизменение которых зависит от перевозимых грузов.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Особенностью электрических железных дорог является широкое применение моторных вагонов, сочетающих в себе электровоз и пассажирский вагон. Моторные вагоны в таких видах транспорта, как городской и пригородный, имеют большие преимущества. Они обеспечивают прежде всего большую гибкость составления поездов. Кроме того, при нескольких моторных единицах в поезде получается возможность достигать больших начальных ускорений. Очень удобно при моторвагонных составах обращать поезда на станциях, особенно на станциях тупикового типа.

Для движения дальнего и вообще для всех типов товарного движения применяются электровозы. По своему основному виду современные электровозы разделяются на магистральные и промышленные. Магистральные электровозы разделяются на пассажирские и товарные, хотя во многих случаях здесь резкой грани не существует. Имеются также типы, которые могут работать с очень небольшими изменениями конструкции при том и другом виде движения.

Очень разнообразны по типу и назначению электровозы промышленные. В зависимости от того, в каком производстве должен работать локомотив, он получает свое особое оформление. Для подземного транспорта применяется один тип, для надземного — другой. Каждое производство, например, горное, металлургическое, предъявляют свои требования к типу электровоза.

При изучении подвижного состава приходится его устройство разбивать на два основные элемента: кузов и ходовые части. Очень важною деталью подвижного состава является его рессорное строение, назначение которого, как уже было выяснено, смягчать удары, приходящиеся от полускатов на кузов. В зависимости от того, сколько последовательных рядов рессор отделяют оси от кузова, рессорное строение разделяется на однорядное и многорядное. На практике применяются системы однорядные, двухрядные и трехрядные.

Для сцепления отдельных единиц подвижного состава в поезде необходимо иметь буферные и тягово-сцепные приборы. Назначение буферов, представляющих собою нормально пружинные устройства,—смягчать удары и толчки, получаемые отдельными единицами поезда при набегании друг на друга или подталкивании. Особенно резкие удары имеют место при быстрой остановке поезда или при маневрах.

Назначение тяговых и сцепных приборов — передавать усилия тяги от ведущих единиц моторных вагонов или электровозов на весь состав поезда. Тяговые и сцепные приборы, называемые часто упряжью поезда, разделяются на два основных класса: упряжь сквозную и упряжь прерывчатую. При первом типе тяговое усилие вдоль поезда передается непрерывно через одну и ту же сквозную цепь, состоящую из соединенных сцепными приборами тяг отдельных единиц поезда. При втором типе тяговые приборы крепятся непосредственно к раме каждой поездной единицы с задней и передней сторон. В этом случае тяговые усилия передаются через рамы подвижного состава, чем эта система существенно отличается от первой.

При сквозной упряжи буфера и тягово-сцепные приборы по большей части делаются раздельными. По бокам лобовых частей рам размещаются буфера, по два с каждой стороны, а тягово-сцепной прибор помещается посредине. При несквозной упряжи буферные и тягово-сцепные приборы нормально объединяются в одном механизме.

При изложении в дальнейшем вопросов, касающихся подвижного состава, предположено обращать главное внимание на те его типы, которые преимущественно применяются при электрической тяге. В первую очередь будет уделено внимание моторным вагонам и электровозам. Что же касается общего вагонного парка нормального железнодорожного типа, то он будет описываться только попутно.

2. Вагоны электрических железных дорог.

Типы кузовов вагонов электрических железных дорог. Кузова вагонов электрических железных дорог весьма разнообразны по своей конструкции. Классифицировать их приходится с различных точек зрения. Особенно разнообразны по конструкции вагоны городских электрических железных дорог. Железнодорожные вагоны в основе своей конструкции представляют значительно меньше вариантов, чем вагоны для городского транспорта.

Большое разнообразие у существующих вагонов наблюдается в отношении расположения мест для сидения и общего внутреннего устройства. Размещение сидений

НБ УИИНТ (ДІІТ)

для пассажиров производится тремя способами. Первый способ — продольное расположение сидений (рис. 447), второй — поперечное (рис. 448) и третий — комбинация той и другой системы (рис. 449). При поперечных скамьях следует различать расположение всех пассажиров лицом к направлению движения и лицом друг к другу. В отношении преимуществ того или иного расположения скамей нет единства взглядов. В тех случаях, когда ширина вагона не позволяет иметь по ширине больше трех мест, как это обычно бывает в трамвайных условиях, количество мест для сидения при одной и той же длине вагона получается приблизительно одинаковым для всех систем их расположения. Преимущество продольных скамей заключается в большей перегрузочной способности вагона. Преимущество поперечных скамей — большее удобство для пассажиров, если только переполнение вагонов не выходит из определенных норм. В том случае, если ширина вагона позволяет иметь поперек четыре или больше сидений, число мест при поперечных скамьях получается больше. В железнодорожной практике почти всегда применяется поперечное расположение сидений.

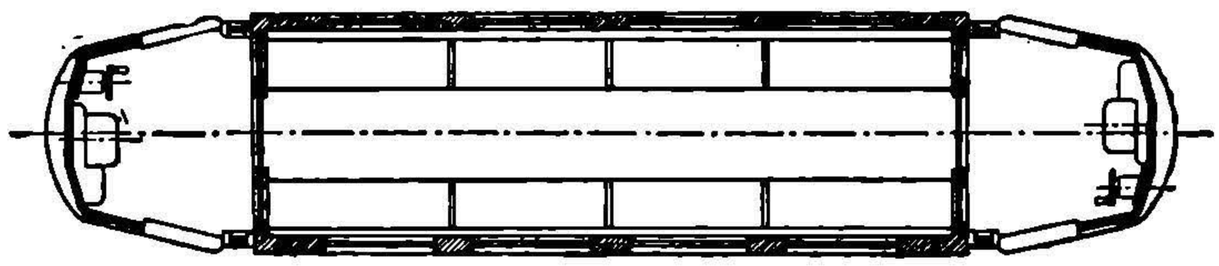


Рис. 447. Вагон с продольным расположением сидений.

В отношении габаритных размеров вагонов и их внутреннего устройства твердых норм не существует. Длина двухосных вагонов трамвайного типа между буферами чаще всего колеблется в пределах от 8,5 до 11 m. Длина кузова без площадок определяется в 6—6,6 m. Площадки нормально занимают 1,500—1,750 m. Ширина рассматриваемых вагонов колеблется в пределах от 2000 до 2600 mm. Для узкой колеи ширина вагона чаще всего берется порядка 2000 mm. При широкой колее замечается вполне определенная тенденция итти на увеличение ширины вагона до 2550—2600 mm; при такой ширине представляется возможность иметь четыре места для сидения поперек вагона. Старые вагоны в Европе имели ширину чаще всего около 2200—2350 mm.

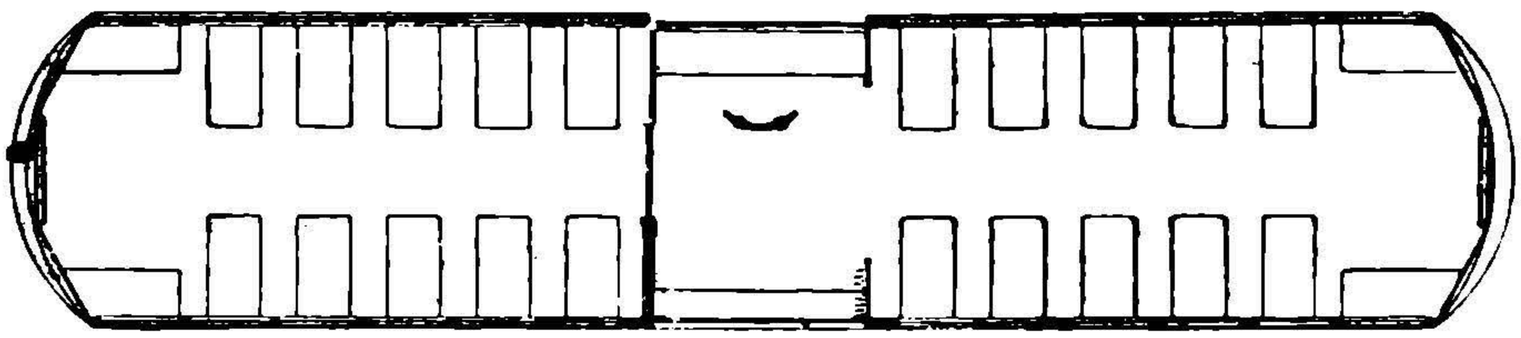


Рис. 448. Вагон с поперечными сидениями.

Кроме двухосных вагонов, для городских железных дорог очень часто, особенно в Америке, применяются четырехосные вагоны. При двухосных вагонах число мест для сидения нормально не превышает 24—36, при четырехосных эта цифра практически может быть сильно увеличена. В Америке трамвайные вагоны четырехосного типа нормально имеют 40—55 мест при длине от 12 до 15 m и ширине 2430—2600 mm. Высота кузовов трамвайных вагонов от пола до верхней части крыши берется около 2200—2300 mm.

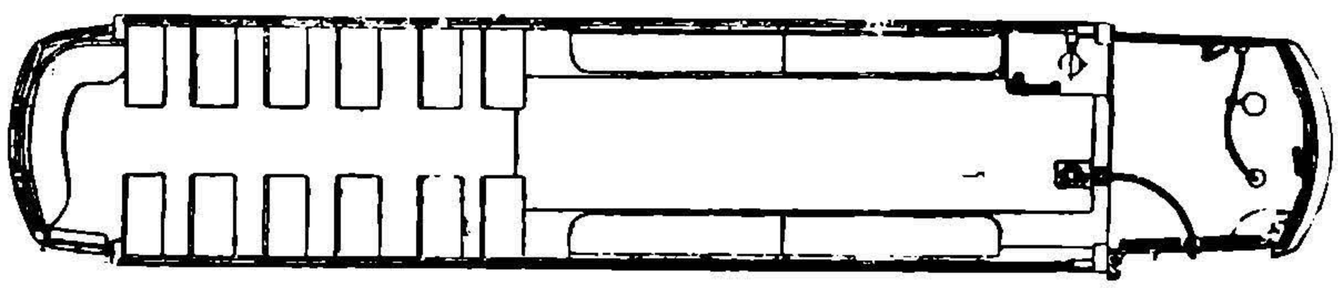


Рис. 449. Вагон со смешанным расположением сидений.

Размеры вагонов железнодорожного типа (рис. 450) достигают по длине 20—23 m и по ширине до 3480 mm при высоте до 4060 mm. Число мест для сидения в железнодорожных вагонах доводится до 100—110. В некоторых случаях в вагоне имеются небольшое багажное отделение и уборная. Кроме того, когда оборудование не умещается под вагоном, на площадке имеется специальная камера для аппаратов управления, куда преимущественно выносятся аппараты высокого напряжения. Иногда, в американской практике, вагоны снабжаются даже небольшим почтовым отделением.

НБ УПУНТ (ДІТ)

Ширина скамей при продольном их расположении берется в пределах около 480—500 mm. Поперечные скамьи имеют от 440 до 490 mm. Длина поперечных скамей при одном месте — около 450 и при двух — около 880 mm.

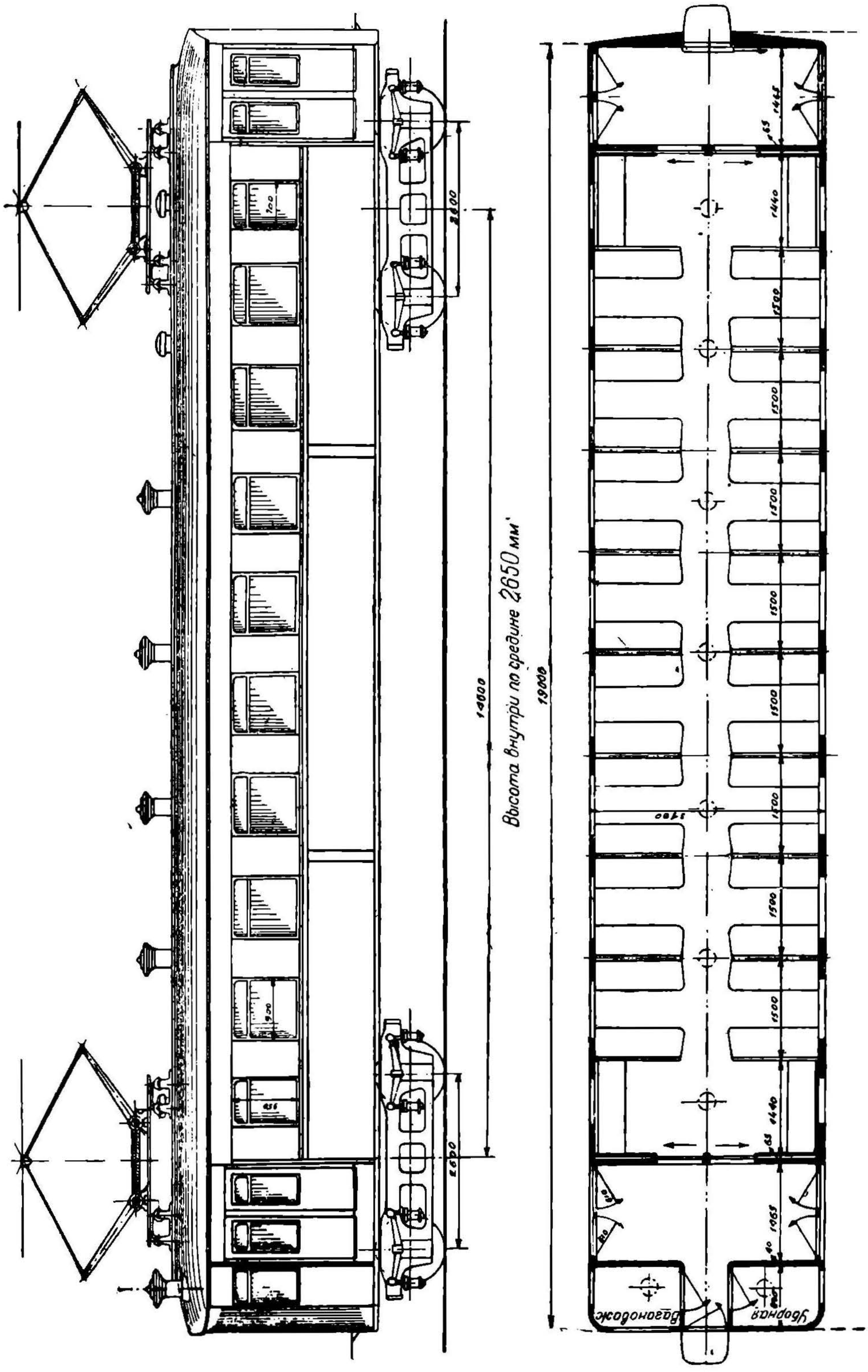


Рис. 450. Моторный вагон пригородных ж. д. СССР.

Расстояния между поперечными скамьями при сидении пассажиров лицом в одну сторону берется около 300, а при сидении лицом друг к другу около 470—560 mm. Ширина прохода между скамьями колеблется в пределах 600—700 mm.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

В железнодорожных вагонах число мест поперек вагона доходит иногда до шести, по три с каждой стороны вагона. Длина трехместных скамей берется чаще всего около 1350—1500 mm.

Среднее место между железнодорожными и трамвайными вагонами занимают вагоны метрополитенов. Seefehlner приводит варианты расположений сидений в вагонах главнейших метрополитенов Европы и Америки (рис. 451). Длина метрополитенных вагонов колеблется в пределах 14—22 m, ширина — в пределах 2300—

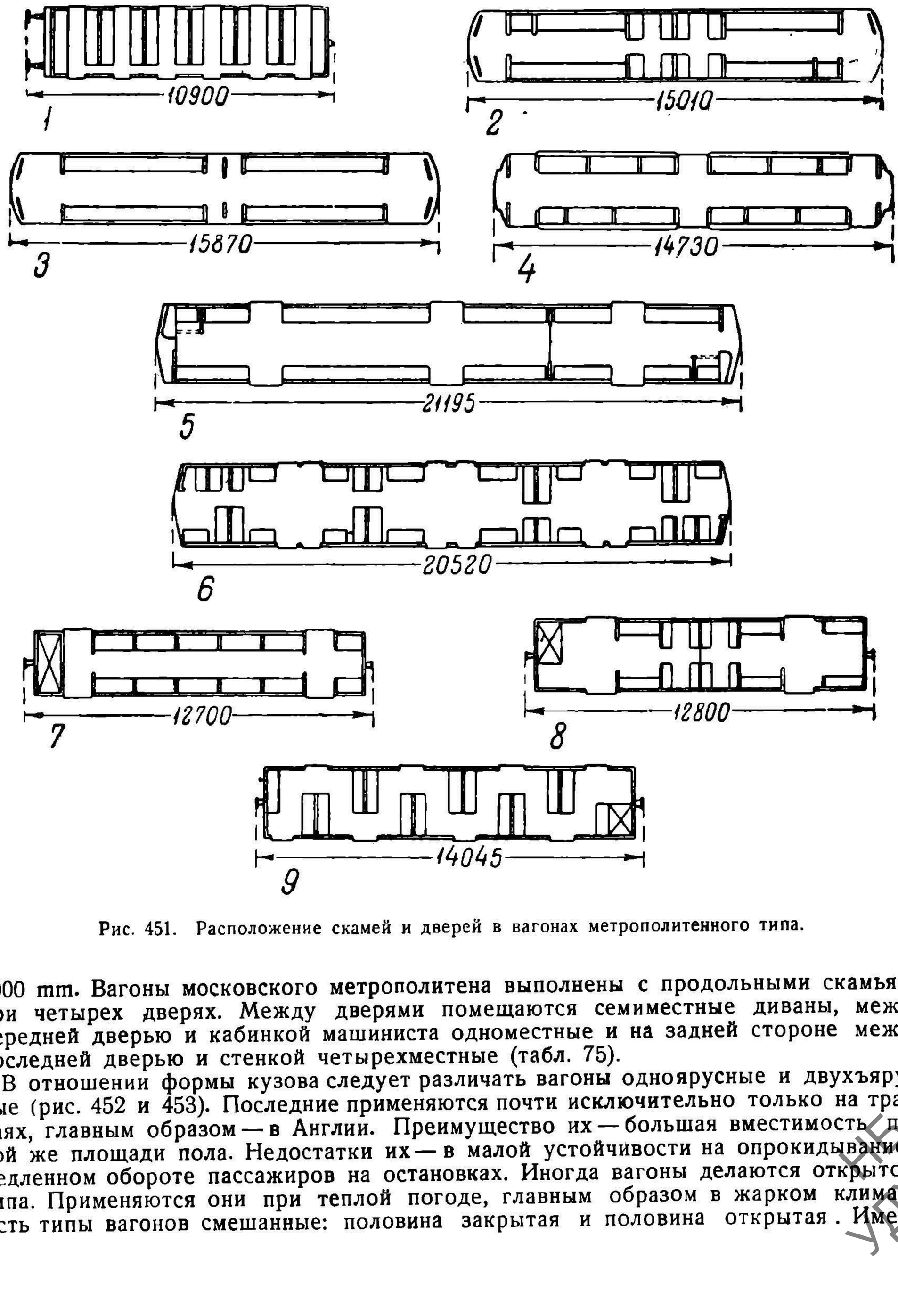


Рис. 451. Расположение скамей и дверей в вагонах метрополитенного типа.

3000 mm. Вагоны московского метрополитена выполнены с продольными скамьями при четырех дверях. Между дверями помещаются семиместные диваны, между передней дверью и кабинкой машиниста одноместные и на задней стороне между последней дверью и стенкой четырехместные (табл. 75).

В отношении формы кузова следует различать вагоны одноярусные и двухъярусные (рис. 452 и 453). Последние применяются почти исключительно только на трамваях, главным образом — в Англии. Преимущество их — большая вместимость при той же площади пола. Недостатки их — в малой устойчивости на опрокидывание и медленном обороте пассажиров на остановках. Иногда вагоны делаются открытого типа. Применяются они при теплой погоде, главным образом в жарком климате. Есть типы вагонов смешанные: половина закрытая и половина открытая. Имеют

НБ УДУНТ (ДІІТ)

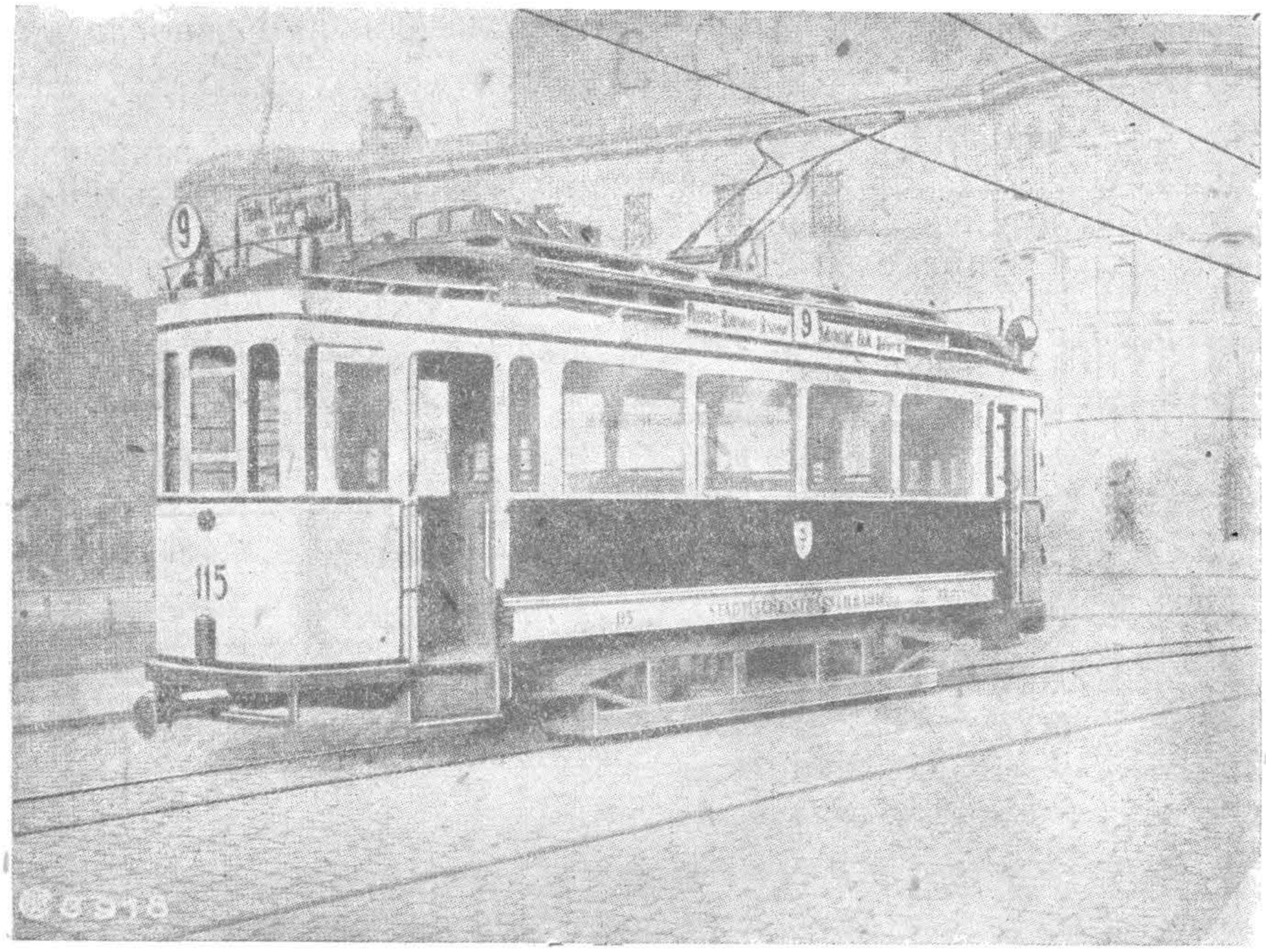


Рис. 452. Общий вид нормального вагона трамвайного типа с фонарем.

место попытки выполнять вагоны сезонного типа. Зимой стенки вагона закрываются, а на лето их убирают.

Входные и выходные двери в вагонах электрических железных дорог устраиваются различно. Наибольшее распространение имеют конструкции с дверями по концам вагона, причем входят пассажиры в трамвайных условиях движения с задней площадки, а выходят с передней. Реже выход и вход имеют место с одной и той же площадки. Довольно большое распространение начинают получать вагоны с расположением дверей и посредине, и по концам вагона. Средние двери нормально служат для входа, а расположенные по концам—для выхода. При такой комбинации скорость оборота пассажиров значительно возрастает. Применяется указанная конструкция только при вагонах значительной длины. Следует отметить, что в последнее время появились вагоны с дверями, расположенными посредине и с одного конца. Примером могут служить различные типы вагонов, построенных по весьма распространенному американскому принципу, известному под названием принципа Peter Witt'a (рис. 454). Входят пассажиры здесь через передние двери, а выходят через средние. Поток пассажиров распределяется на две волны. Пассажиры, едущие на близкое расстояние, задерживаются в первом проходе, где имеются продольные скамьи; пассажиры же, едущие на далекие расстояния, проходят в задний конец, где и располагаются с большими удобствами. Кон-

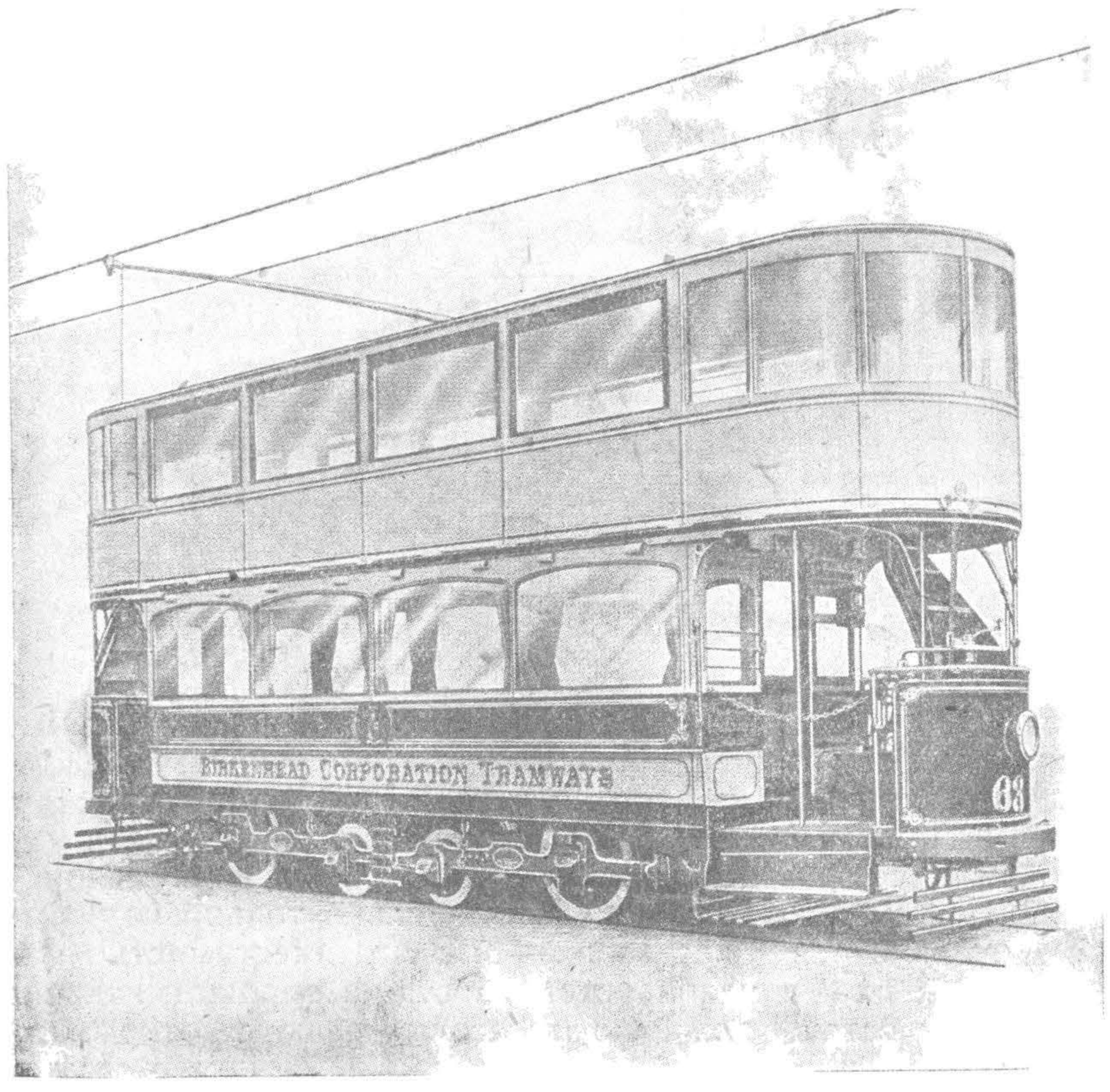


Рис. 453. Двухярусный трамвайный вагон.

НТБ УНУНТ (ДІІТ)

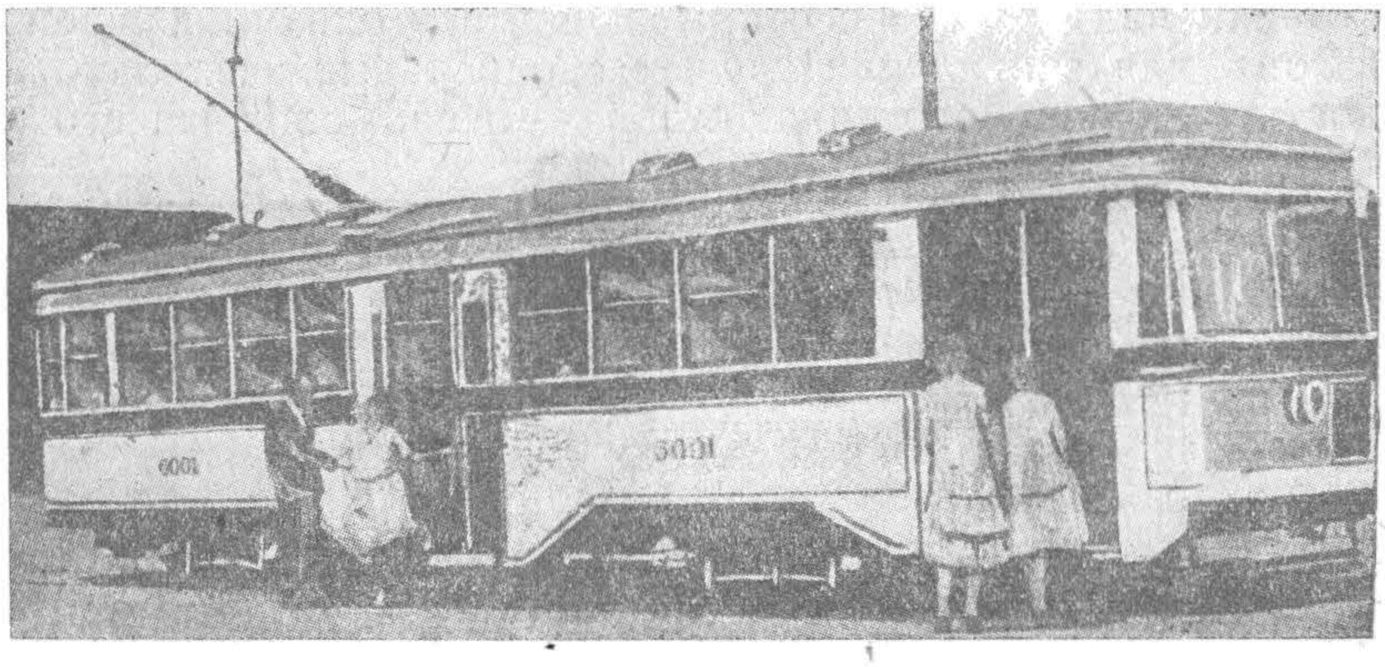


Рис. 454. Вагон типа Peter Witt'a.

дуктор помещается в специально отведенном месте. В отношении типа дверей преобладают системы дверей, вдвигающихся в стенки. В вагонах метрополитенов, а иногда и в вагонах пригородного сообщения число дверей делается больше, чтобы по возможности ускорить оборот пассажиров. Ширина дверей колеблется в очень широких пределах. Двери трамвайных вагонов чаще всего имеют ширину от 660 до 920 mm. Однако, в последнее время есть тенденция в сторону их уширения. Теперь встречаются нередко двухстворчатые двери, доходящие до 1360 и даже в отдельных случаях, как, например в Штеттине, до 1634 mm. В метрополитенах и пригородных вагонах ширина дверей колеблется нормально в пределах 1350—1800 mm; чаще всего она берется около 1500 mm.

В большинстве случаев по концам вагона имеются площадки, отделенные дверями от основной части вагона. Площадки бывают открытые, полуоткрытые и закрытые. Первый тип теперь почти не применяется совсем. В старых типах трамвайных вагонов преобладает полузакрытый тип площадок, но в новых конструкциях, а в Америке уже много лет, применяются почти исключительно площадки закрытого типа, дающие значительные преимущества в отношении отепления вагона. В железнодорожных вагонах применяется исключительно тип закрытый. Для перехода с площадки в вагон замечается стремление делать уровень пола в вагоне и на площадке одинаковым. В некоторых конструкциях между площадкой и внутренней частью вагона нет стенок и дверей. Такой тип особенно распространен в Америке.

При конструировании подножек имеется тенденция делать их с одной ступенькой, дабы выход и вход пассажиров происходили как можно быстрее. В железнодорожных и метрополитенных вагонах стараются располагать площадки и платформы на одном уровне. Иногда ступеньки переносятся частично с подножки на площадку вагона. Высоту ступенек трамвайных вагонов рационально выбирать порядка 350—400 mm.

В отношении общей конструкции кузова нужно различать вагоны с фонарем (рис. 452) и с простой арочной крышей (рис. 455). Фонарь выполняется в виде над-

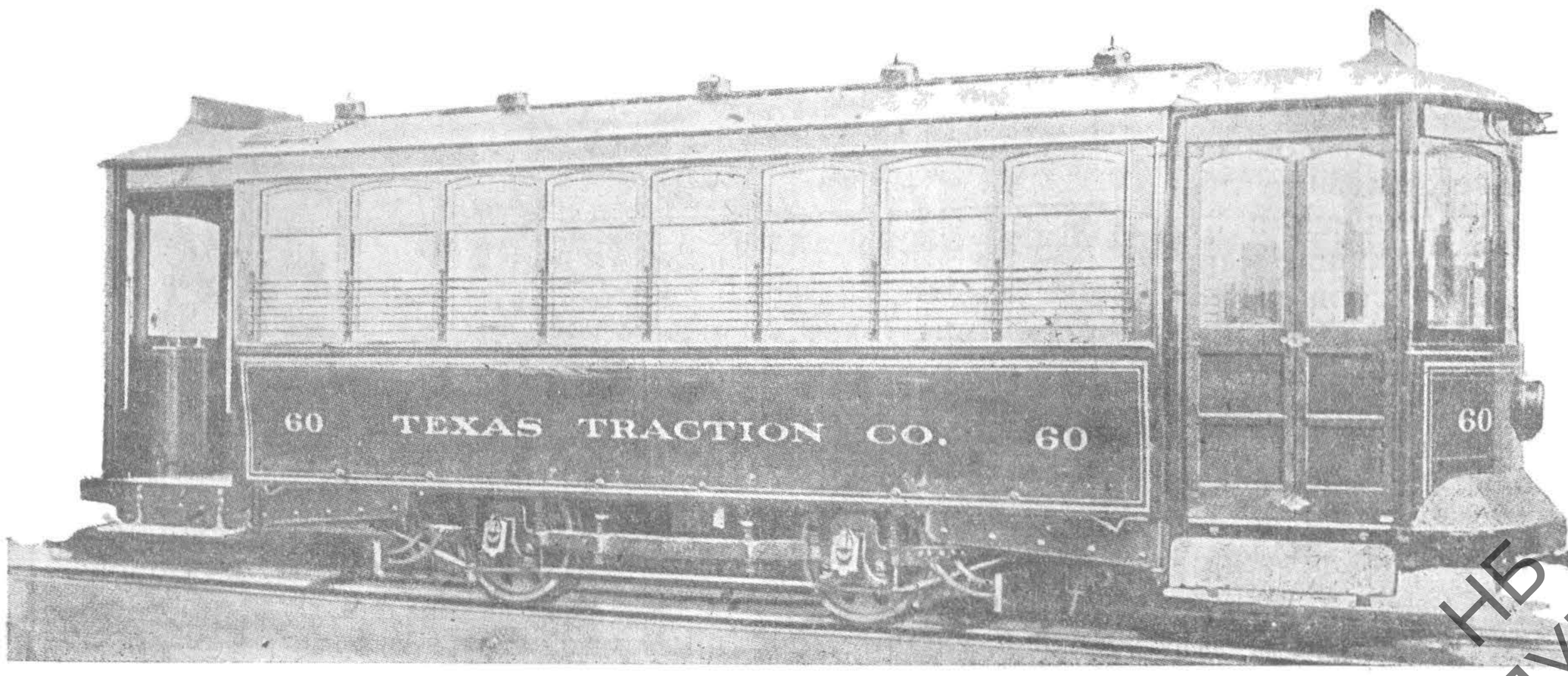


Рис. 455- Общий вид вагона с арочной крышей

НБ УДУНТ (ДІІТ)

стройки над крышей с открывающимися окнами для вентиляции. При арочном типе вагона для вентиляции служат специальные вентиляторы, вделанные в крышу. Недостаток фонарного типа кузова — очень сложная его конструкция и увеличение его веса. Новые вагоны теперь выполняются почти исключительно по типу арочных систем.

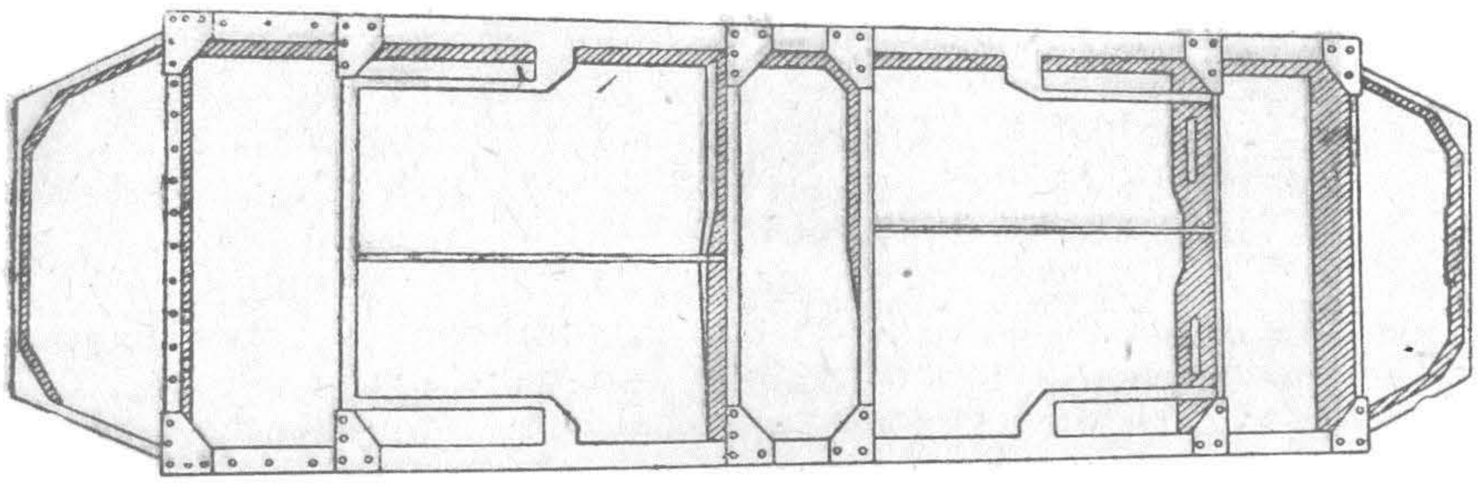


Рис. 456. Рама вагона берлинского трамвая с карданной передачей.

В отношении материала современные вагоны разделяются на вагоны с деревянной и металлической конструкцией. В основе деревянных конструкций лежит специальная рама, состоящая из продольных и поперечных балок, склепанных между собою. Балки, выполняемые нормально из коробчатого железа, берут на себя всю статическую и динамическую нагрузку вагона, а также воспринимают нагрузку от буферных ударов, являясь очень часто, например, в трамвайных вагонах, и передатчиками тягового усилия от одного вагона к следующему. Для усиления боковых швеллеров иногда применяются натяжные шпренгеля (рис. 484).

Самый остов вагона, базируясь на данной раме, состоит из солидных деревянных стоек, располагаемых в вертикальном направлении. Снизу стойки крепятся к раме, сверху они являются основой для крыши. Для придания всей системе устойчивости, стойки схватываются продольными брусьями. Снаружи и внутри кузов обшивается деревом. Крыша выполняется обязательно в основе из дерева, покрываемого сверху просмоленной парусиной или специальным типом толя, часто с прокладкой пробкового слоя. В моторных вагонах крыша должна иметь хорошую изоляцию от земли. Пол вагона делается также деревянным с открывающимися люками для осмотра двигателей сверху.

В металлических конструкциях все деревянные стойки и брусья устраняются. Вместо продольных швеллеров, встречающихся в металлических вагонах относительно редко, применяются или клепаная система, или ферма. Клепаная рама представляет собою в основе железные листы толщиною в 3—4,5 mm, идущие чаще всего до уровня нижней линии окон. Для усиления листов к ним приклепываются по краям и посредине уголки или небольшие коробки. Для поперечной жесткости рамы схватываются снизу поперечинами (рис. 456), а для продольной часто применяются шпренгеля. В железнодорожных вагонах, где приходится через раму передавать большие тяговые и буферные усилия, особенно если тяговые и буферные приборы объединены в одном механизме, применяются специальные хребтовые балки, идущие по центральной линии нижнего основания рамы (рис. 457).

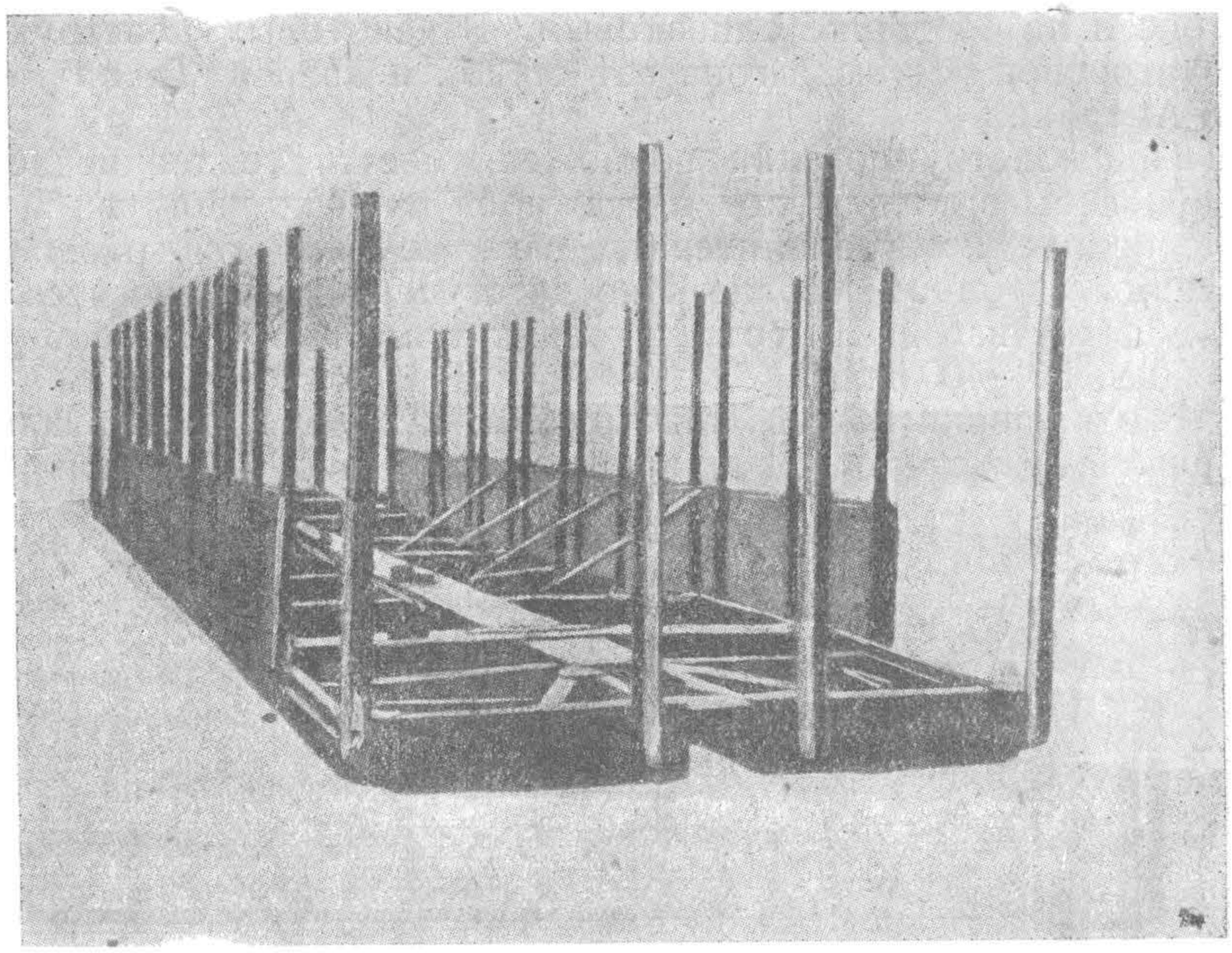


Рис. 457. Рама с хребтовой балкой вагона пригородных ж. д. СССР.

ПВ УДУНТ (ДІІТ)

В системах рам с фермой вместо клепаной балки берется ферма из уголкового железа, которая снабжена сверху тонкостенной железной обшивкой. Все вертикальные стойки как в клепаной, так и в ферменной системе, приклепываются непосредственно к основным рамным поясам. Все системы металлических вагонов

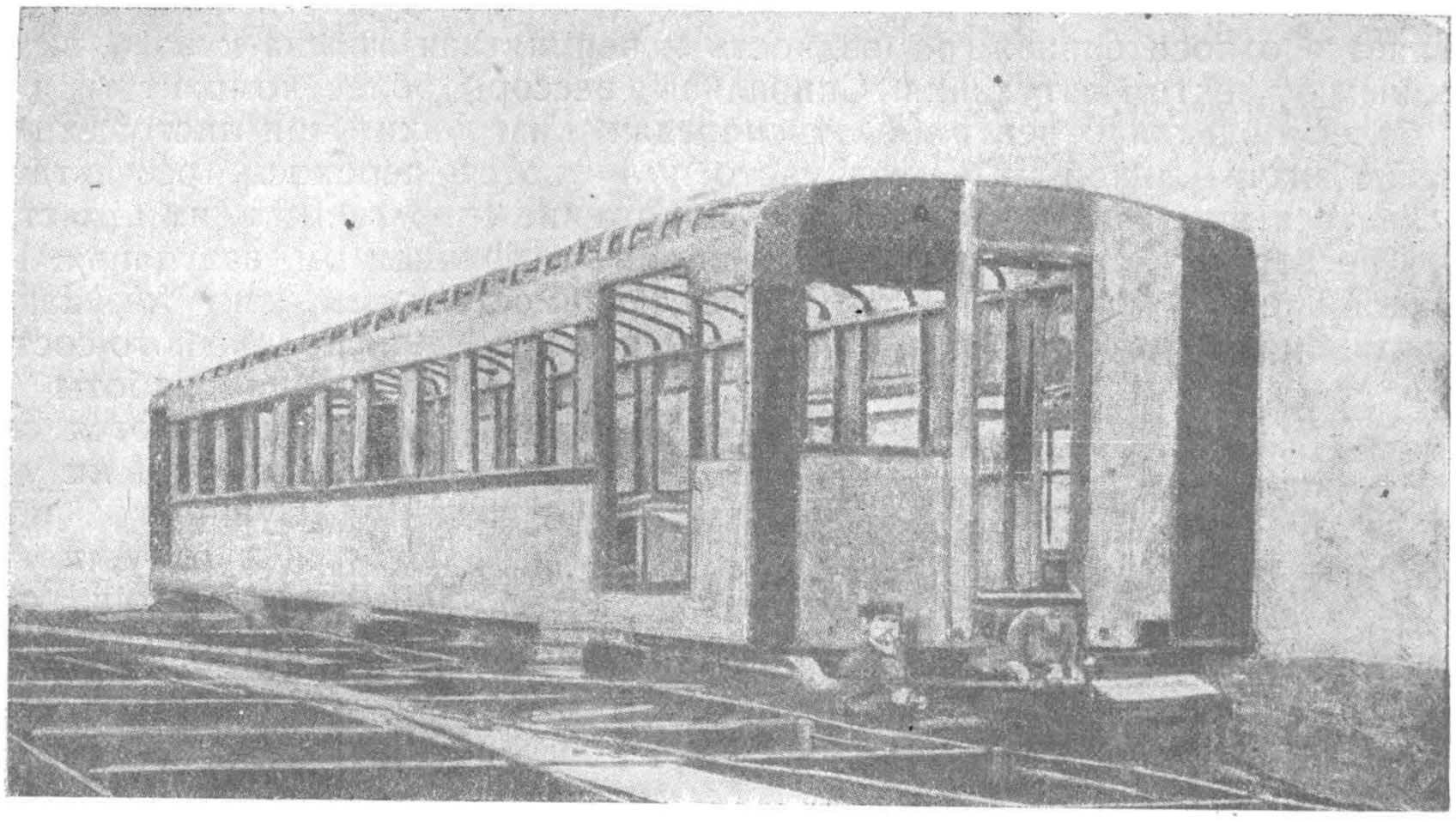


Рис 458. Общий вид металлической конструкции вагона пригородных ж. д. СССР.

с швеллерами, клепаной системой и фермой в отношении веса мало отличаются друг от друга. Наибольшее распространение, однако, имеют клепаные системы. Общий вид металлической конструкции вагона Мытищенского завода (рис. 450) виден из рис. 458.

В трамвайных двухосных вагонах, имеющих относительно небольшую колесную базу, главная рама ограничивается площадками. Для поддержания последних приходится иметь добавочную консольную конструкцию, прикрепляемую к главной раме (рис. 452). Данное место является слабым местом вагона. Существует ряд вариантов его выполнения. Рис. 459 дает конструкцию американского типа, рис. 460—Мытищенского завода. Буфера крепятся в точках *A* и *ab*. Балки, несущие площадки, берутся или коробчатого типа, или клепаные.

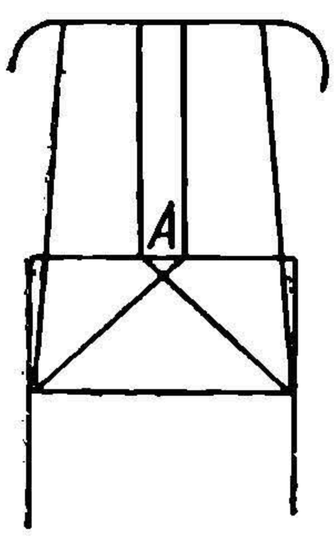


Рис. 459. Схема консольной части трамвайных вагонов американского типа.

В металлических конструкциях вагоны изнутри обшиваются деревом или высокосортной папкой. Необходимо, чтобы обшивка достаточно гарантировала отепление вагона.

При сооружении кузовов вагона следует считаться с тем, что отдельные части их, если не принять надлежащих мер при сборке, могут быстро разболтаться и давать резкий шум при движении. Следует также обращать внимание на качество дерева для вагонов. Дерево должно быть безусловно хорошо просушено. Особенно большую опасность в отношении гниения представляют оконные рамы, подвергающиеся действию дождевой воды, которая скопляется вокруг них.

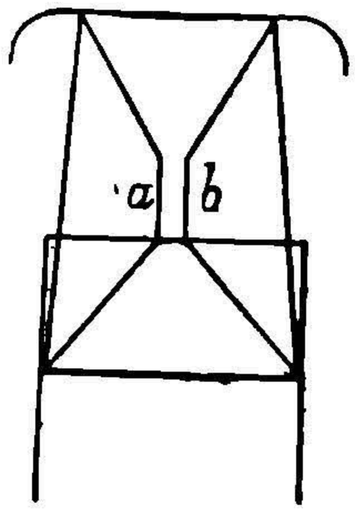


Рис. 460. Схема консольной части трамвайного вагона Мытищенского завода

Системы рессор вагонов. Все существующие вагоны можно разбить на два класса. К первому относятся системы, у которых нагрузка от кузова передается на оси непосредственно только с помощью промежуточных рессор. Ко второй системе относятся вагоны, тяжесть кузова которых сначала передается на промежуточную раму, называемую тележкой, которая в свою очередь передает все получаемые ею усилия на оси.

РЕПОЗИТОРИЙ УДУНТ (ДІІТ)

При всех системах вагонов обязательным звеном являются рессоры. В зависимости от числа рядов рессор, отделяющих кузов от осей, системы рессорного подвешивания разделяются на одиночные, двойные и тройные. Рессоры применяются листового и спирального типа. Листовые рессоры, как уже было выше отмечено, обладают большим коэфициентом затухания. Они более интенсивно гасят всякого рода паразитные колебания надрессорного строения. Существенным их недостатком является относительная громоздкость и неприятная тряска кузова, вызываемая чрезмерным эффектом затухания. Спиральные рессоры более компактны, и при них можно более правильно центрировать передачу нагрузки. При листовых рессорах, вследствие значительной их длины, часто получаются перекосы, результатом чего может явиться неправильное взаимное положение сопрягаемых ими частей. Спиральные рессоры обладают очень небольшим коэфициентом затухания. При них неприятной мелкой тряски не получается, но вместе с тем, как уже указывалось, при них становятся особенно опасными паразитные колебания подвижного состава. Для улучшения работы рессоры иногда снабжаются специальными демпферными устройствами. Сущность последних сводится к тому, что при колебательных процессах производится искусственно создаваемый эффект трения, тормозящий перемещения надрессорного строения. В современной практике строительства вагонов очень часто встречается комбинация листовых и спиральных рессор. Такое сочетание по большей части дает достаточный эффект затухания и вместе с тем уменьшает опасность от жесткой тряски. Путем рассмотрения приводимых ниже типов ходовых частей можно проследить главнейшие типы современных систем рессорного подвешивания.

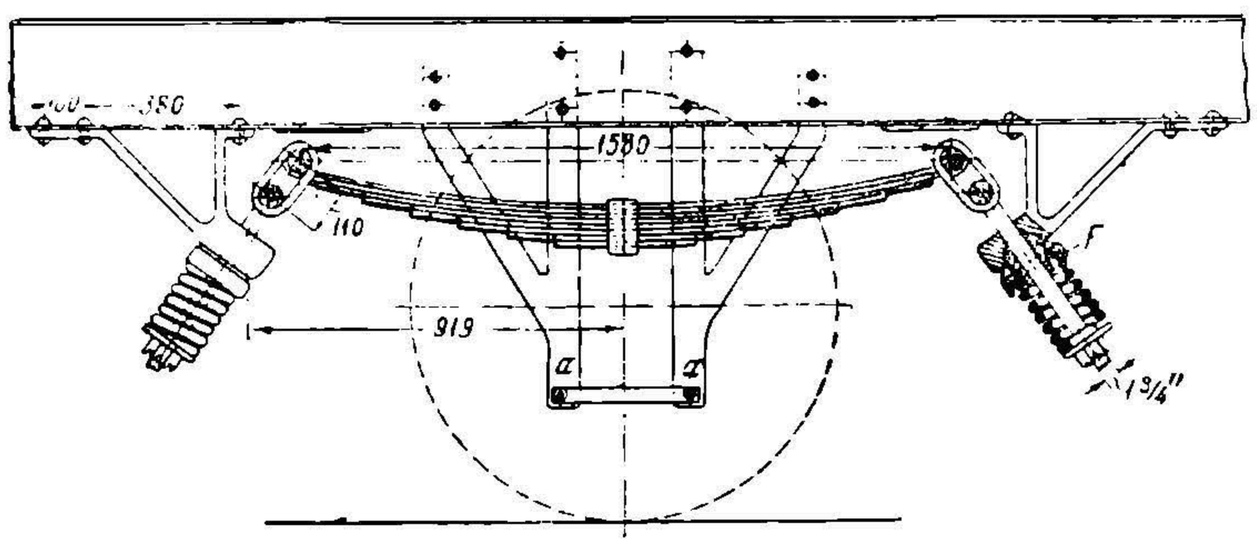


Рис. 461. Система рессорного подвешивания при свободных осях.

Вагоны без тележек на свободных осях. В большинстве случаев подобные системы выполняются на так называемых свободных осях, которые под действием усилий, получаемых при прохождении кривых со стороны рельсов, могут перемещаться по отношению к кузову и тем самым облегчать проход по кривым. Свободные оси чаще всего выполняются по типу ренгоферской подвески (рис. 461). Усилия от кузова и от осей здесь передаются свободно только через рессоры и сережки. Букса свободно лежит между направляющими *aa*, прикрепленными к раме вагона. Назначение этих направляющих, называемых лирами, ограничивать движение осей только при повороте их сверх определенной нормы. На прямой правильное поперечное положение осей достигается уравновешенным давлением кузова на оба конца рессорной подвески. При движении на кривой, как уже было отмечено, под действием последней на колеса, оси поворачиваются, преодолевая сопротивления уравновешивающего эффекта кузова, причем рессора занимает наклонное положение. При вступлении снова на прямую тот же балансирующий эффект кузова выправляет рессоры, и они устанавливаются правильно по отношению к кузову. В некоторых случаях, для придания большей эластичности рессорной подвеске, последнюю снабжают, кроме листовых рессор, еще и рессорами спиральными (рис. 461). Длина базы вагона на свободных осях доводится в трамвайных вагонах до 3—4 m. На железных дорогах, где радиусы кривых значительно больше, база может быть еще увеличена.

Преимущество свободных осей — в отсутствии специальных тележек, благодаря чему вес вагонов получается относительно невысоким. Недостаток их — в том, что конструкция не так надежна и не так устойчива, как при тележках. При движении на прямой вагона на свободных осях замечается вихляние осей, а на кривой оси не всегда устанавливаются правильно по отношению к кузову. В настоящее время главная область применения свободных осей — прицепные трамвайные вагоны. В значительном количестве встречаются они также в вагонах железнодорожного типа.

Кроме свободных осей, действующих независимо друг от друга, на железных дорогах иногда применяются оси связанные. Идея их заключается в том, что по-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ворот одной оси вызывает соответствующие движения и второй. Координация действий осей достигается соединением смежных концов рессор посредством балансирного рычага, вращающегося около шарнира, закрепленного в раме. При вступлении на кривую передняя рессора устанавливается наклонно, и через балансир этот наклон вызывает соответствующий поворот соседней рессоры и оси.

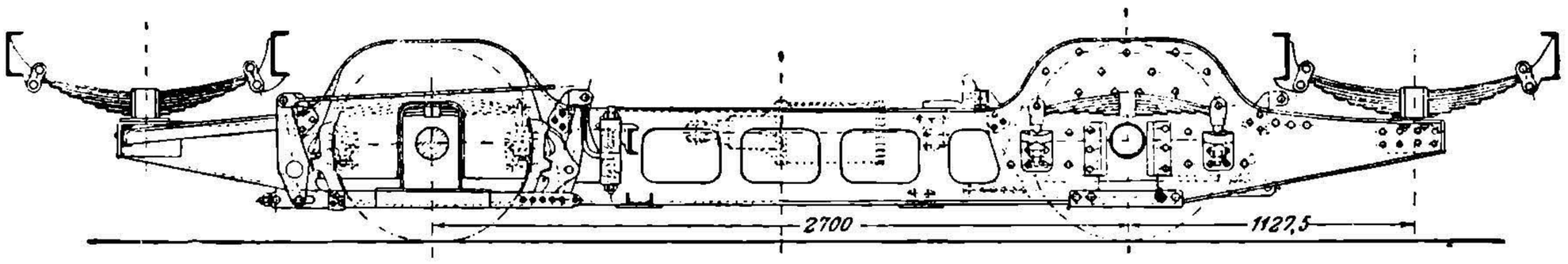


Рис. 462. Тележка ленинградского трамвая.

Вагоны на двухосных тележках с жесткой базой. Очень разнообразны по конструкции вагоны на тележках. В вагонах двухосного типа применяются тележки неповоротные и одноосные поворотные. В свою очередь, тележки неповоротные разделяются на типы с жесткой базой, у которых оси практически остаются параллельными друг другу, и типы с осями, имеющими возможность тем или другим способом перемещаться по отношению к тележке. Тележки одноосные поворотные разделяются на типы с независимым передвижением одной тележки по отношению к другой и типы со связанным взаимным перемещением. Вагоны четырехосного типа на электрических железных дорогах применяются почти исключительно с двумя двухосными поворотными тележками.

В качестве образца двухосной тележки с жесткой базой может служить тележка ленинградского трамвайного вагона (рис. 462). Нагрузка от кузова здесь передается на раму листовыми рессорами. Иногда в подобных конструкциях к листовым рессорам присоединяются еще и спиральные. В таком случае последние чаще исполняют только вспомогательную роль, беря на себя более или менее значительную нагрузку только при чрезмерной перегрузке основных рессор. База при таких тележках берется длиною от 1,8—3 m в зависимости от радиусов кривых. Иногда при сборке между буксой и направляющими рамы оставляют небольшую игру порядка 2—3 mm с каждой стороны. Назначение этой игры — несколько облегчить вагону прохождение по кривым. Практически значение этой игры невелико.

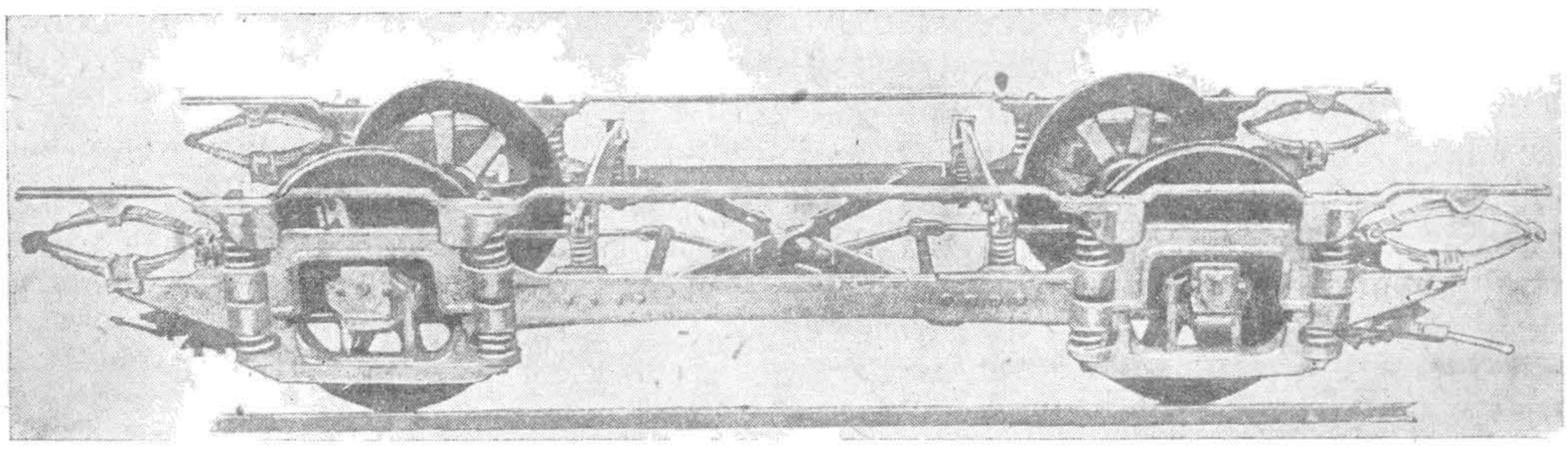


Рис. 463. Тележка завода Peckham с поворотными осями.

Вагоны на тележках с поворотными осями. Примером тележек с поворотными осями может служить тележка завода Peckham (рис. 463). Буксы у нее имеют приливы, концы которых с помощью пружинных шарообразных опор поддерживают главную раму тележки. При прохождении кривой буксы с приливами принимают наклонное положение, поворачиваясь на шарообразных опорах. На прямой вес кузова выправляет буксы, и они занимают свое центральное положение. Подобный тип тележек находит себе большое применение в Англии. В большом количестве вариантов тележки с подвижными осями строит также известный американский завод Brill.

Одноосные поворотные тележки. Переходя теперь к одноосным поворотным тележкам, следует прежде всего рассмотреть тележки Беккера, применяемые в очень большом количестве на московском трамвае (рис. 464). При данной

НБ УИУНТ (ДІТ)

конструкции кузов вагона опирается на четыре грибообразные опоры *A*. Каждая данная опора, представленная схематически на рис. 465, состоит из двух входящих друг в друга грибов, разделенных спиральной пружиной. При повороте грибообразные опоры наклоняются, причем кузов по отношению к тележке изменяет свое положение. Одновременно с этим сама тележка поворачивается около шарообразного шкворня *B*, наглухо прикрепленного к раме кузова. Шаровая же обойма, которая охватывает шкворень, скреплена при помощи промежуточной спиральной пружины с рамой тележки. Шкворень исполняет функцию передачи тягового усилия кузову, а также является поддерживающим пунктом для одноосной тележки. База в таких вагонах может быть достаточно большая. В Москве она берется равной 3,3—3,6 m, но можно ее еще и несколько удлинить.

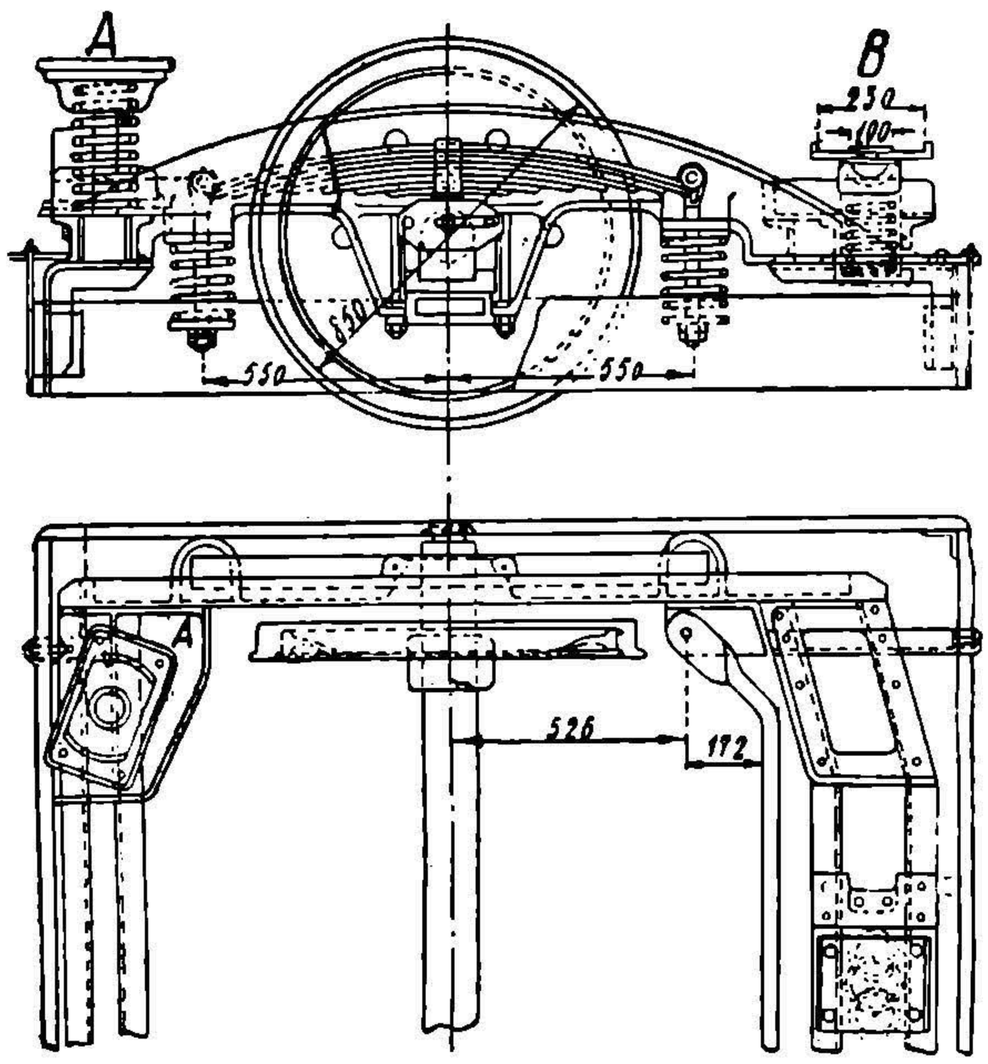


Рис. 464. Одноосная поворотная тележка системы Беккера.

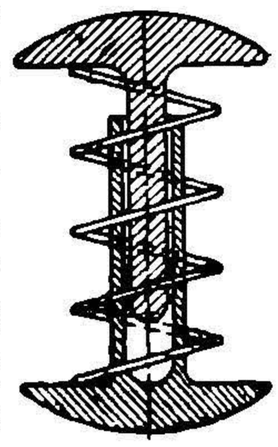


Рис. 465. Грибообразная опора тележки Беккера.

Вагоны на беккеровских тележках имеют при хорошей сборке достаточно плавный ход, но при плохом состоянии они склонны к сильной качке. Недостатками беккеровских тележек являются значительная тяжесть вагона и сложность механизма.

Разобранный тип вагона представляет собою тип с несвязанными одноосными тележками. Представителем типов со связанными тележками является система Нюренбергского завода, схема которой приведена на рис. 466. В данной системе две тележки связываются между собою штангой *A*, которая, с помощью качающегося механизма *E* и подшипников *DD*, подвешивается к кузову. При повороте механизм *E* принимает наклонное положение, преодолевая действие пружин *kk*. На прямой эти пружины ставят все части механизма в их центральное положение. Передача тягового усилия производится в этой системе посредством шкворней *BB*, которые перемещаются в направляющих тележек.

Система тележек Нюренбергского завода на практике себя не оправдала. Опыт показал, что на кривой они поворачиваются очень тяжело, а на прямой плохо выправляются. Кроме того, механизм вагона получается сложным и громоздким. В настоящее время система тележек Нюренбергского завода почти совсем не применяется. В частности, ленинградский трамвай, имевший большое количество таких загонов, от этой системы совершенно отказался.

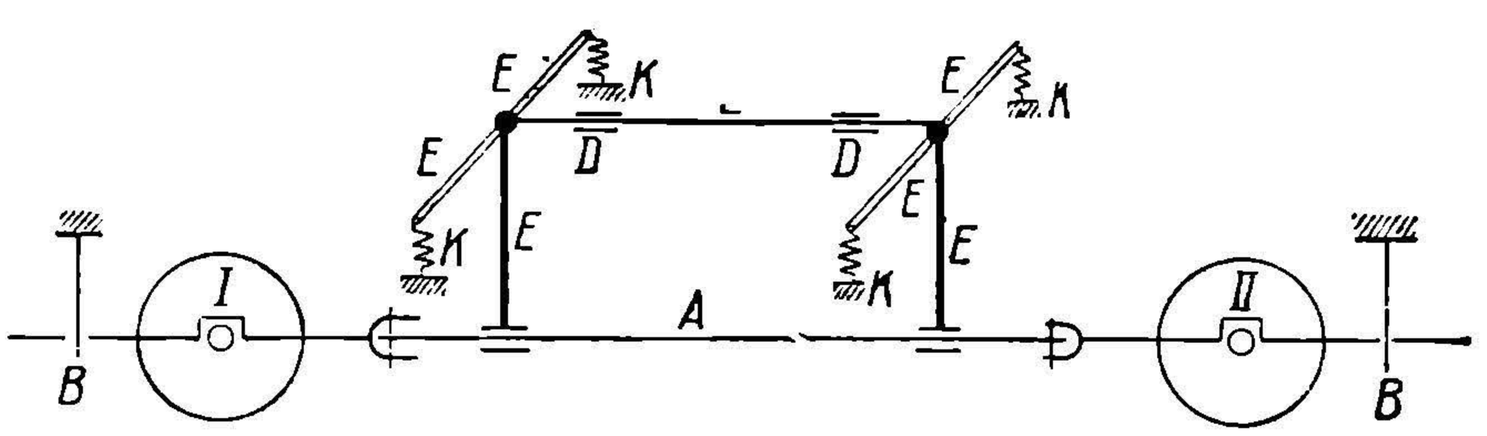


Рис. 466. Схема нюренбергской одноосной тележки.

Двухосные поворотные тележки. Исключительно широким распространением теперь пользуются двухосные поворотные тележки. При наличии двух таких тележек получается четырехосный вагон, длину которого, удаляя тележки друг от друга, можно доводить до 20—23 m. Несмотря на такую длину и большое расстояние между тележками, четырехосные вагоны обладают спокойным ходом и легко берут кривые относительно малого радиуса. Применяются они особенно широко для вагонов железно-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

дорожного типа и метрополитенов. Однако, и в трамвайной практике, особенно в Америке, они имеют большое применение.

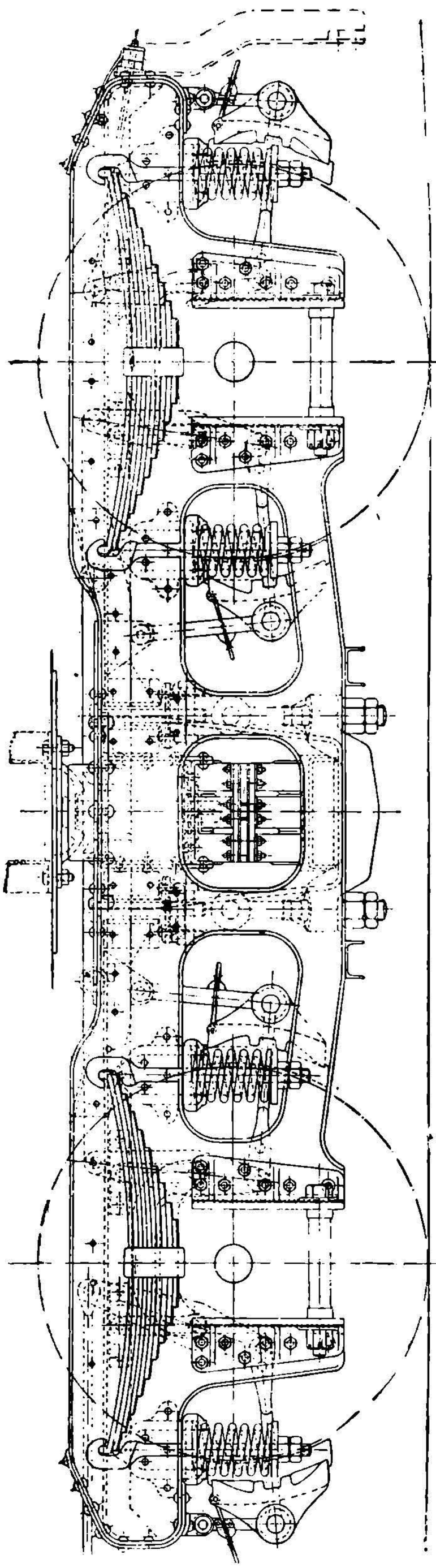


Рис. 467. Тележка вагона пригородных ж. д. СССР.

Основные принципы конструкции двухосных тележек видны из рис. 467 и 468, представляющего тележку Мытищенского завода для пригородных железных дорог. Кузов вагона, с помощью шкворневой чашки, опирается на чашку подпятника, прикрепленного к так называемому надрессорному брусу *d*. Чашки рамы кузова и рамы тележки соединены помощью шкворня. Надрессорный брус *d* посредством эллиптических рессор *c* опирается на нижний подрессорный брус *b*. Связь между последним и основной рамой тележки осуществляется здесь по принципу люлечной подвески, состоящей из подвесных тяг *aa*, которые свободно качаются около точек подвеса, закрепленных в раме тележки. Связь же рамы тележки с буксами осуществляется с помощью листовых и спиральных рессор.

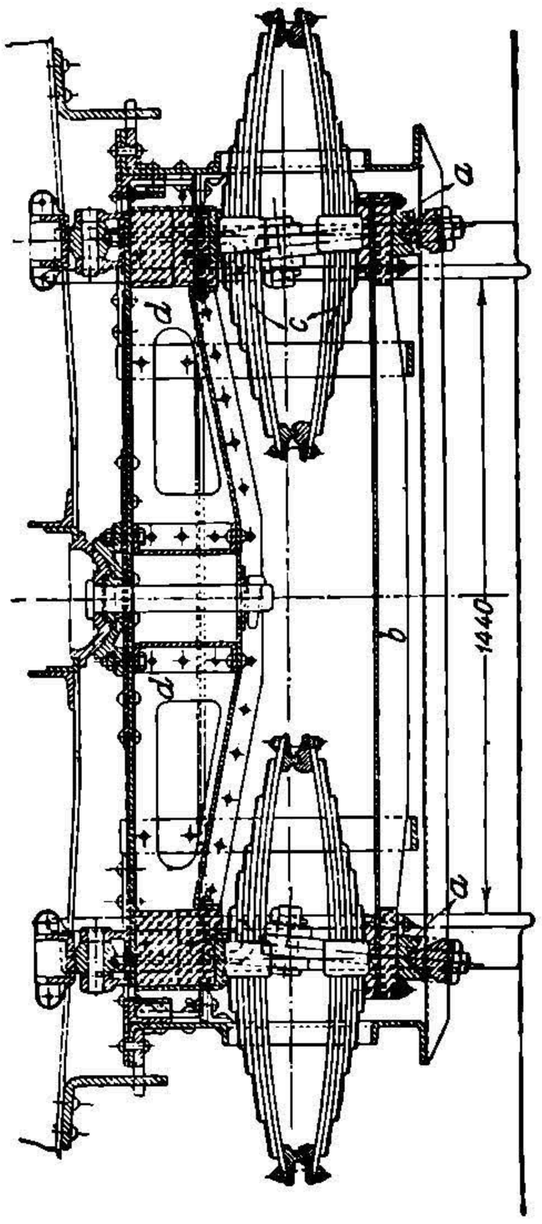


Рис. 468. Поперечный разрез тележки вагона пригородных ж. д. СССР.

Рассматриваемый тип тележки принадлежит к системе тележек с тройным рядом рессор и люлечной подвеской поперечных брусьев. В большинстве конструкций двухосных тележек тяжесть кузова передается через шкворневые чашки, но для большей устойчивости системы по бокам надрессорного поперечного бруса делают еще особые опорные подушки или ролики, носящие общее название скользунов, которые принимают на себя часть веса кузова и обеспечивают большую надежность в отношении его устойчивости.

Большим распространением в железнодорожном деле пользуются тележки с балансирным подвешиванием (рис. 469), из коих особенно хорошо известны тележки Пульмана. В этих тележках, как и в предыдущих, для более эластичной передачи усилий поперечные брусья имеют люлечную подвеску. Характерной особенностью этой конструкции является то, что рама тележки передает свой вес не сразу на буксу, а сначала с помощью спиральных рессор на балансиры, которые уже опираются на буксы. Назначение балансиров — передавать давления на оси центрально, что уменьшает напряжения в рамах тележек по сравнению с нормальной подвеской, при которой листовые буксовые рессоры вызывают большой распор рамы.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Вариантом тележек Пульмана является система Фетте. В ней вместо двух балансиров и четырех спиральных рессор применяется четыре балансира, по одному на каждую буксу. Каждый такой балансир опирается на свою пару спиральных рессор, число которых на каждую тележку равно восьми (Л. 224).

Тележки с балансирами, при известных преимуществах в отношении легкости конструкции рамы, удобства ремонта и осмотра, имеют вместе с тем и значитель-

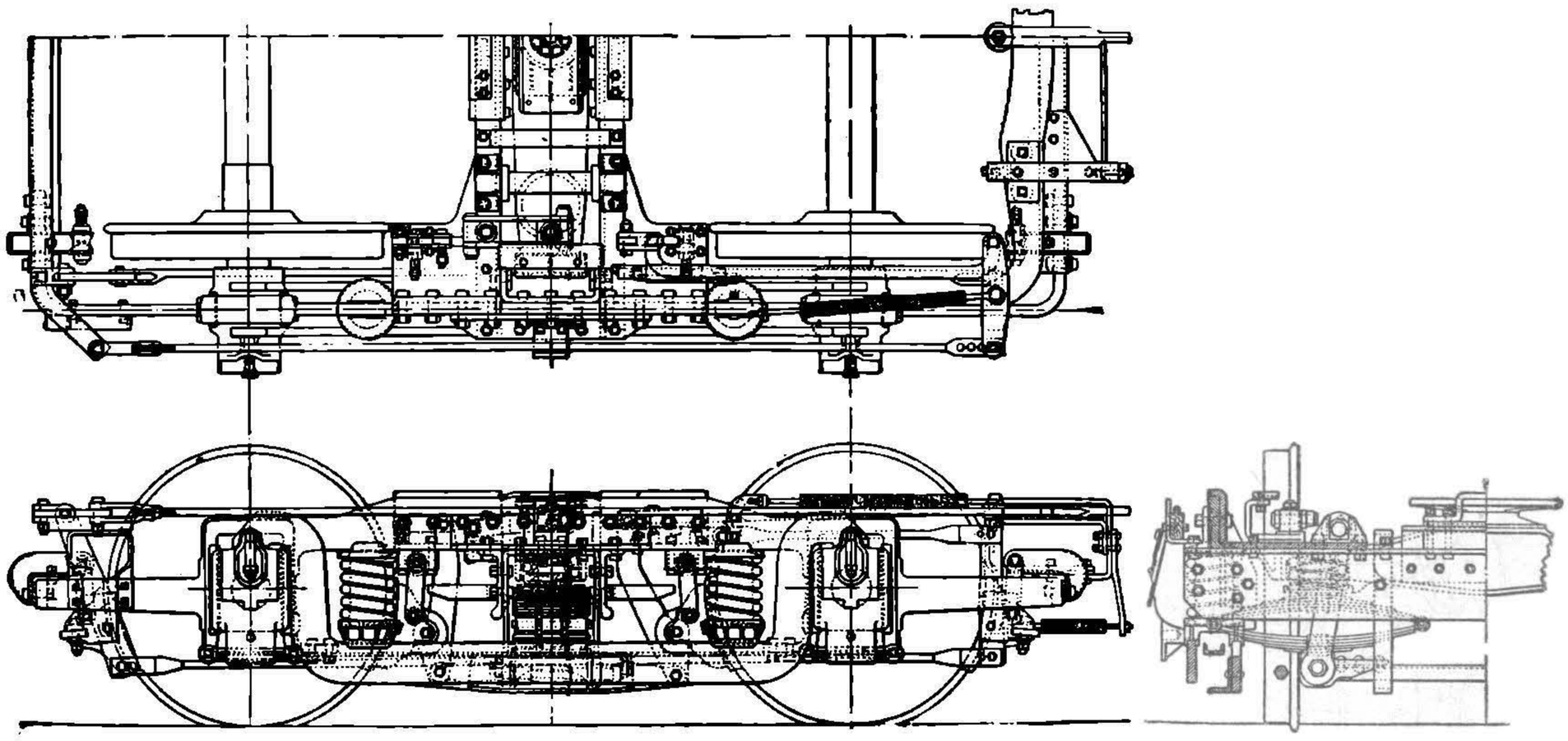


Рис. 469. Двухосная поворотная тележка типа Пульмана.

ные недостатки. При них получается значительная высота тележки, для понижения которой приходится иногда сильно облегчать конструкцию, до известной степени в ущерб ее прочности.

Первый из рассмотренных типов тележки, как было отмечено, представляет систему с тройным рядом рессор. Балансирные системы Пульмана и Фетте имеют двойную рессорную подвеску. Следует указать, что рассмотренные типы двухосных поворотных тележек, хотя они и весьма распространены, являются, однако, далеко не единственными. В частности, тележки с тройной рессорной подвеской довольно часто выполняются по типу, представленному на рис. 470. Особенно много различных типов тележек с двойной подвеской. Они комбинируются в различных вариантах из систем тройной подвески, представленных на рис. 467, 468, 469 и 470, путем устранения какого-либо одного ряда рессор.

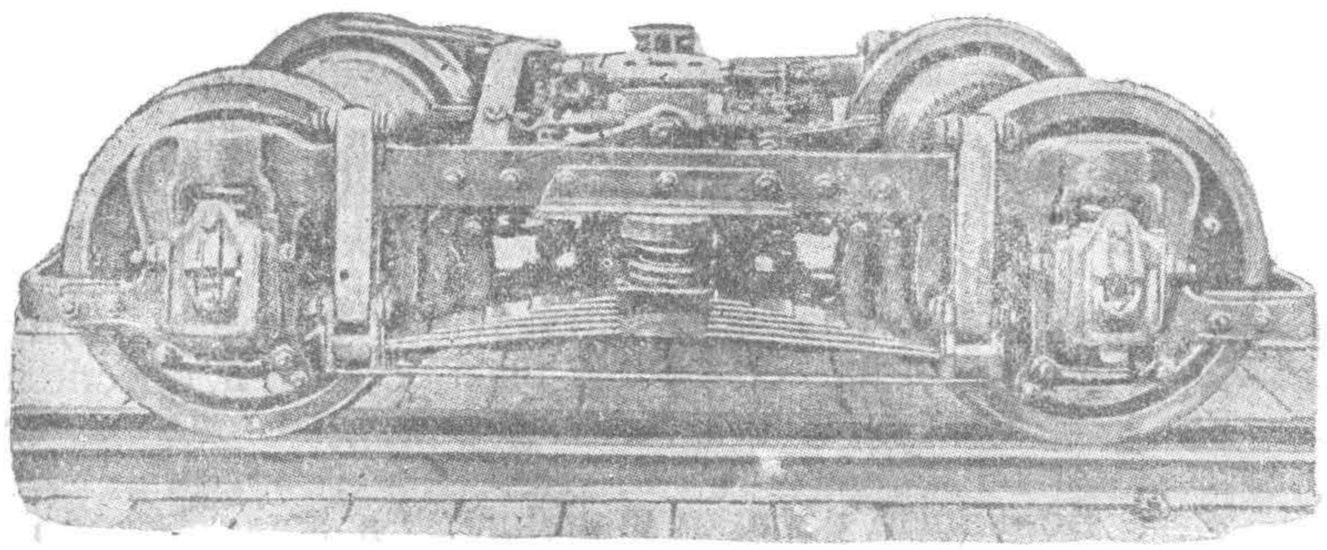


Рис. 470. Двухосная поворотная тележка с тройным рядом рессор.

Значительно реже применяются двухосные поворотные тележки с ординарной рессорной подвеской. Ввиду относительной жесткости их хода, главная область их применения — товарное движение. По местоположению рессор они могут быть разделены на два типа. В первом рессоры размещаются под буксами и кузов жестко опирается на тележку. Рессоры могут быть или листовыми, или спиральными; эти последние, например, применены в товарных вагонах Токс-Арбеля. Тип тележек с одним рядом надбуксовых рессор на практике себя не оправдал и теперь встречается очень редко.

Значительно большим распространением пользуется система, в которой рессоры сосредоточены в поперечной конструкции тележки. Из подобных типов наибольшим распространением пользуется система Даймонда (рис. 471). Характерной в ней

НВ УДУНТ (ДІІТ)

особенностью является жесткое крепление букс к раме. Имеются даже такие варианты, при которых буксы отливаются вместе с боковинами. Достоинствами тележек типа Даймонда являются простота, легкость, малое количество трущихся частей и значительная гарантия в отношении предотвращения перекосов в буксовых подшипниках.

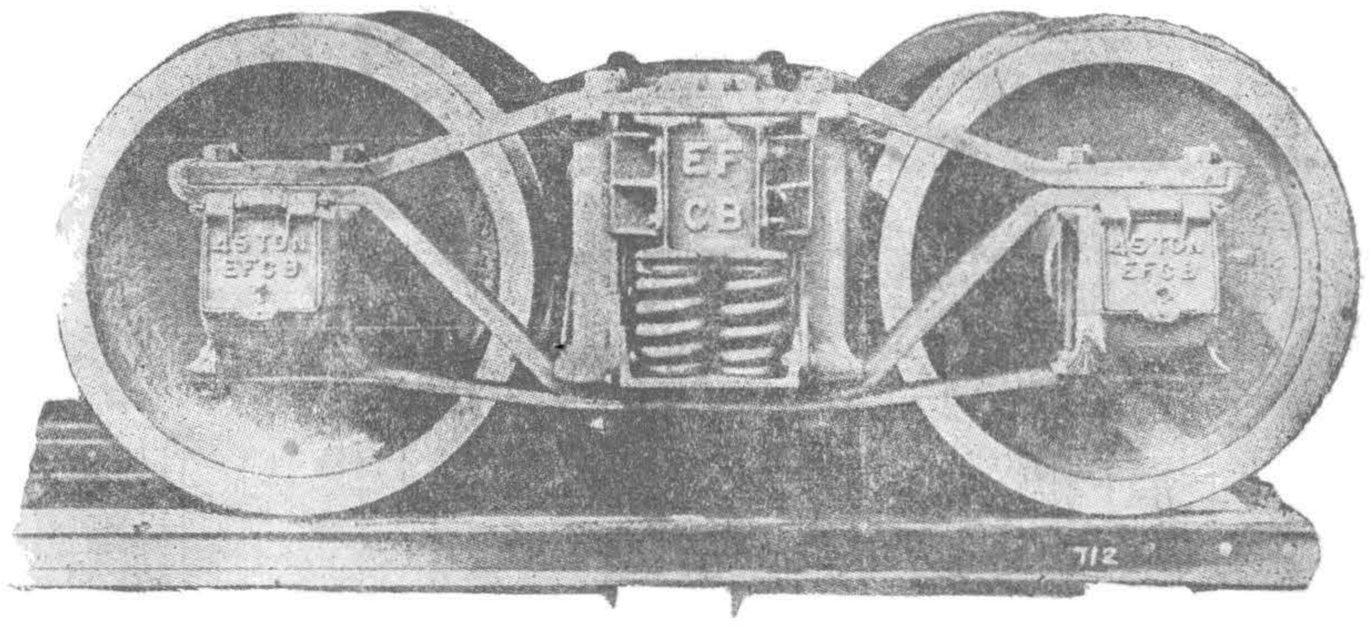


Рис. 471. Общий вид тележки Даймонда

Выбор того или другого типа двухосных поворотных тележек в значительной степени определяется типом движения. Для тяжелых железнодорожных пассажирских вагонов, движущихся с большими скоростями, преимущественно применяются тележки или с тройной рессорной подвеской, или с двойной, главным образом — с балансирами типа Пульмана.

Для городских трамваев и метрополитенов наибольшее распространение имеют вагоны с двойной подвеской без балансиров. Однако, имеются типы и с балансирами. Следует отметить американские конструкции трамвайных тележек с одиночной подвеской. На рис. 472 изображена оригинальная конструкция такой тележки с внутренними буксами. В товарных четырехосных вагонах преимущественно применяется система одиночной подвески. В товарных вагонах не применяют люлечных систем. Нужно сказать, что и в пассажирских вагонах они не являются обязательной частью и много имеется типов вагонов без них. Заметим что, кроме двухосных поворотных тележек, встречаются иногда тележки трехосные. Однако, применение их ограничивается единичными случаями. Например, они применены в одном из типов приводимого ниже вагона швейцарских железных дорог. Для товарных вагонов трехосные тележки применяются довольно часто.

Тележки максимальной тяги. Особый тип двухосных поворотных тележек составляют тележки „максимальной тяги“ (рис. 473). В них одна ось — ведущая, на которую действует двигатель, а вторая — бегунковая, поддерживающая. Кузов свободно опирается на пружинные подушки *aa* и соединен с тележкой шкворнем, перемещающимся при поворотах по направляющей *b*. Характерною особенностью этих тележек является передача большей части веса на ведущие оси. Из теории тяги известно, что чем больше вес, приходящийся на ведущие оси, тем большую силу тяги можно развивать, не опасаясь боксования колес. Этим обстоятельством и объясняется название данной системы — тележка максимальной тяги.

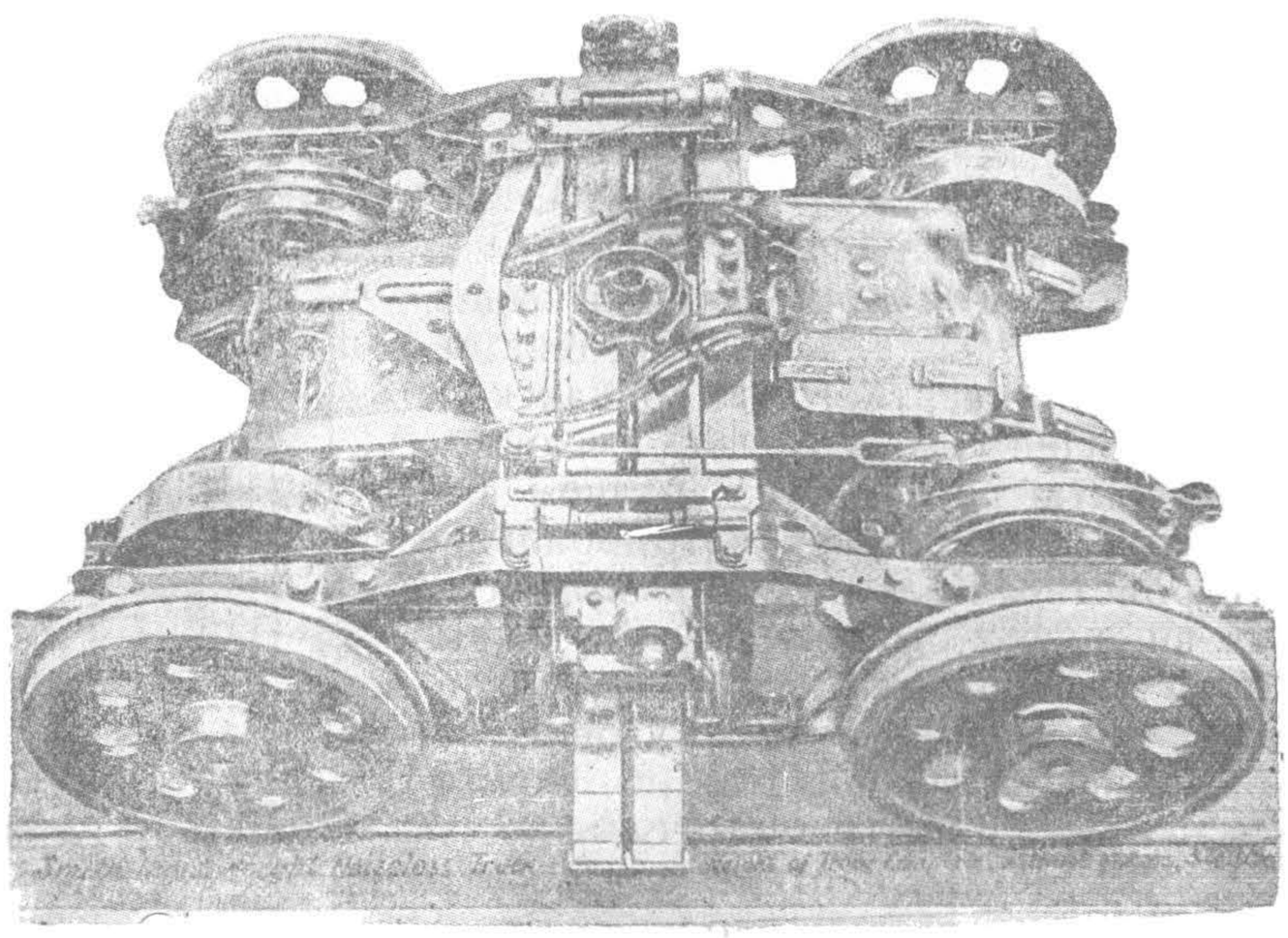


Рис 472. Американская двухосная поворотная тележка с внутренними буксами.

Применение подобных конструкций, получивших значительное распространение в трамваях, объясняется желанием иметь на вагон два двигателя, чтобы не особенно дробить общую мощность. В нормальных четырехосных вагонах при двух

НВ УДУНТ (ДІІТ)

двигателях так называемый сцепной вес, т. е. вес, приходящийся на ведущие оси, равен половине общего веса вагона, а при тележках максимальной тяги его можно поднять до трех четвертей.

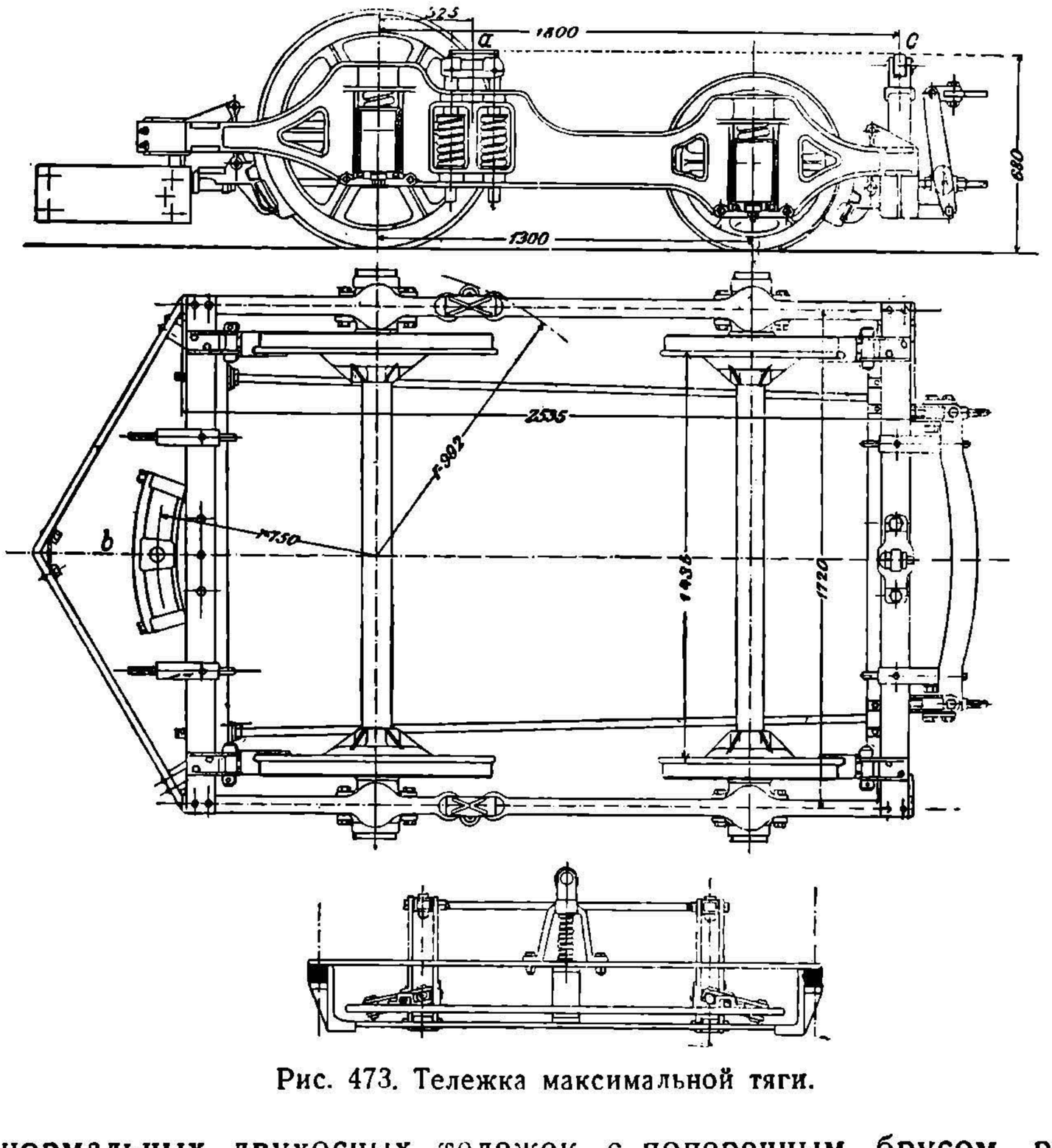


Рис. 473. Тележка максимальной тяги.

Недостатком тележек максимальной тяги является частое соскакивание бегунков с рельсов, объясняющееся относительно малой их нагрузкой. Для того, чтобы уменьшить данную опасность, в некоторых случаях над бегунковой осью ставят особый кулачок *c*, входящий в прорезь кузова. Пока вагон находится на прямой, кулачок не касается кузова. На кривой же при перемещении кузова по отношению к тележке он начинает упираться в кузов и, таким образом, нагрузка, приходящаяся на него, возрастает.

Кроме разобранной конструкции, тележки максимальной тяги устраиваются и по типу нормальных двухосных тележек с поперечным брусом, рессорно соединенным с рамой. Примером может служить система Brill, отличающаяся оригинальной подвеской поперечных брусьев, с расположением листовой рессоры вдоль оси тележки.

Специальные типы тележек с карданными передачами. Оригинальную конструкцию представляют собою тележки при карданных передачах, с коническими и червячными зацеплениями. На рис. 474 приведена тележка стандартного американского вагона Gen. Car a Coach, имеющего червячную передачу с карданом. Тип тележки напоминает автомобильное устройство. Колеса здесь вынесены на внешнюю сторону рамы и закрыты специальными кожухами, предохраняющими тележки и кузов от забрызгивания грязью и водою. Оси тележки заключены в пустотелые кожуха, называемые картерами. Последние схватываются продольными и поперечными металлическими частями, представляя собою в совокупности достаточно жесткую и прочную тележку. Передача веса кузова на тележку производится с помощью длинных листовых рессор, представляющих собою эластичную рессорную систему. Двигатели подвешиваются к тележке эластичным способом. Оригинально устроен воздушный тормоз с вынесенными на внешнюю

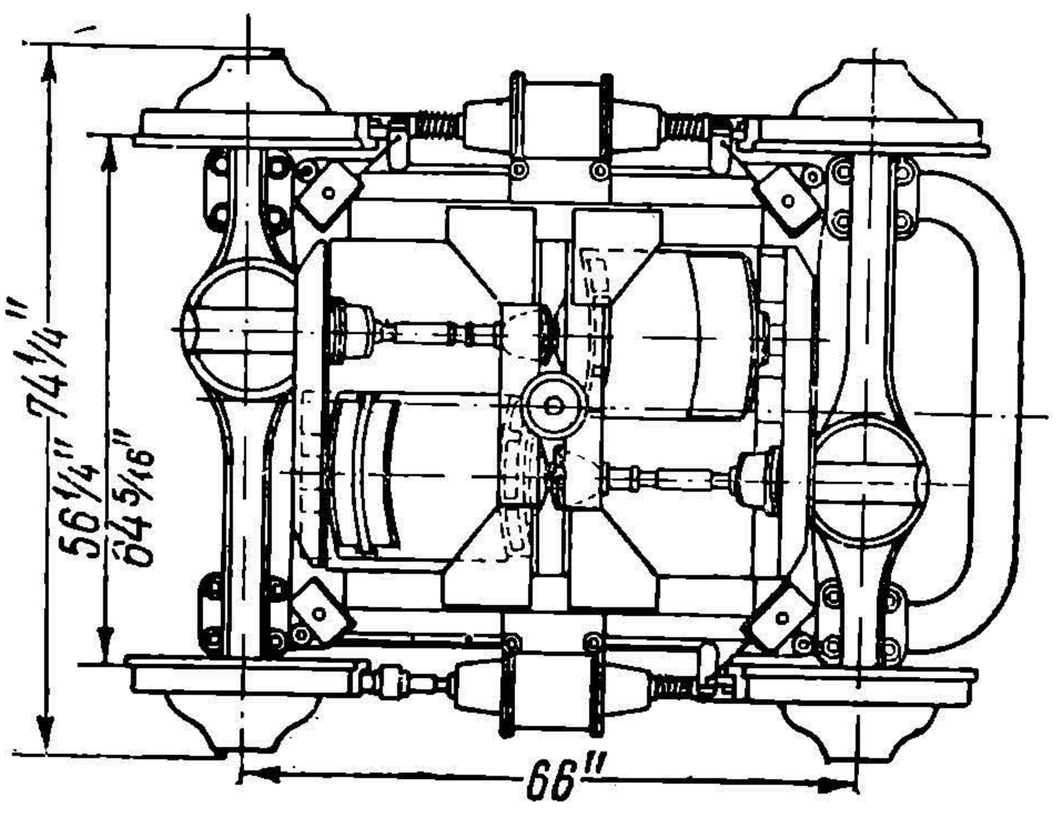


Рис. 474. Тележка американского типа с карданной передачей.

НБ УЛУНТ (ДІІТ)

сторону тележки тормозными цилиндрами непосредственно действующими на колодки.

Рамы тележек. При конструировании ходовых частей подвижного состава приходится применять как можно более стойкие и прочные материалы. Если обратиться к рамам тележек, то здесь наиболее ответственною частью являются основные продольные балки, которые при относительно большой их длине должны выдерживать тяжелые нагрузки. Для них материал должен быть особенно прочен. У трамвайных двухосных тележек материалом для этих частей в большинстве случаев служат штампованные балки. Однако, встречаются и клепаные системы, а также и литые. Для двухосных поворотных тележек применяются те же материалы, причем здесь преобладают штампованные балки или балки из котельного железа с наклепкой углового железа для усиления сечений. Поперечные и диагональные балки чаще всего выполняются или из коробчатого железа, или из уголкового. Надрессорные и подрессорные брусья люлек берутся из штампованных профилей или из коробчатого железа. Довольно часто в железнодорожных вагонах встречаются брусья из дубового дерева с усилением его железными хомутами. Скрепление отдельных частей тележек наиболее часто производится с помощью заклепок. Соединений винтами следует избегать, как менее надежных. В настоящее время практически разрешен вопрос о применении в широком масштабе электросварки.

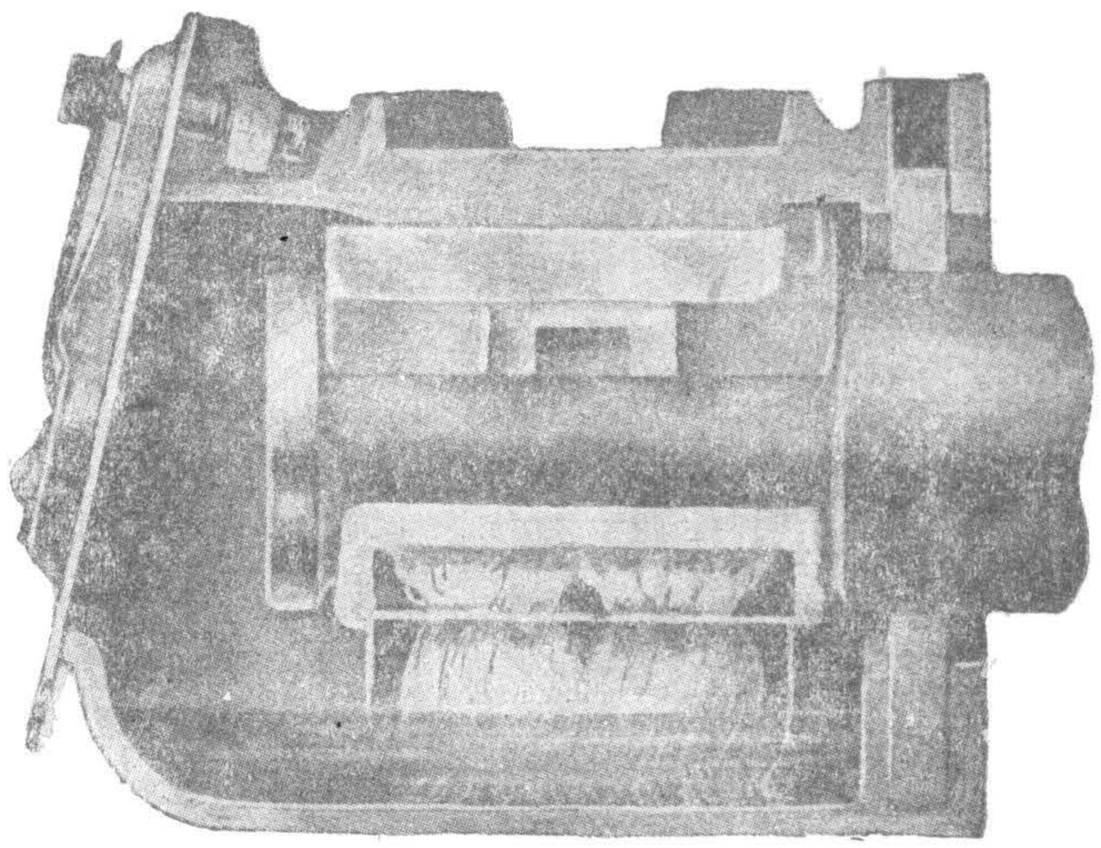


Рис. 475. Общий вид нормальной буксы.

Буксы. Важную часть ходовых частей составляют буксовые подшипники, разделяющиеся на подшипники скольжения и подшипники качения. Пока доминирующее применение имеет первый тип (рис. 475). Букса представляет собою коробку с пружинным затвором. Подшипники в вагонах имеют нормально только один верхний вкладыш. Снизу делается подбивка из шерсти, конопли или подкладывается специальная подушка, и все это заливается маслом. Подобный тип буксовых подшипников требует тщательного за собою ухода и осмотра. Несмотря на подбивку, масло очень часто вытекает и сильно загрязняется. Имеются попытки применять самосмазывающиеся буксы с автоматической подачей масла, но пока этот тип, из-за своей сложности, не получил большого распространения. Вкладыши подшипников делаются из бронзы, редко из чугуна. Заливаются они баббитом, представляющим собою различные комбинации смеси металлов: олова, сурьмы, свинца, меди и пр. Наиболее известный тип баббита, Шарпи, содержит 83% олова и 17% сурьмы. При хороших своих качествах, баббит Шарпи дорог, и в настоящее время имеется целый ряд более дешевых комбинаций, его заменяющих. Нужно указать на кальциус-металл, лурги-металл и бан-металл (Л 224).

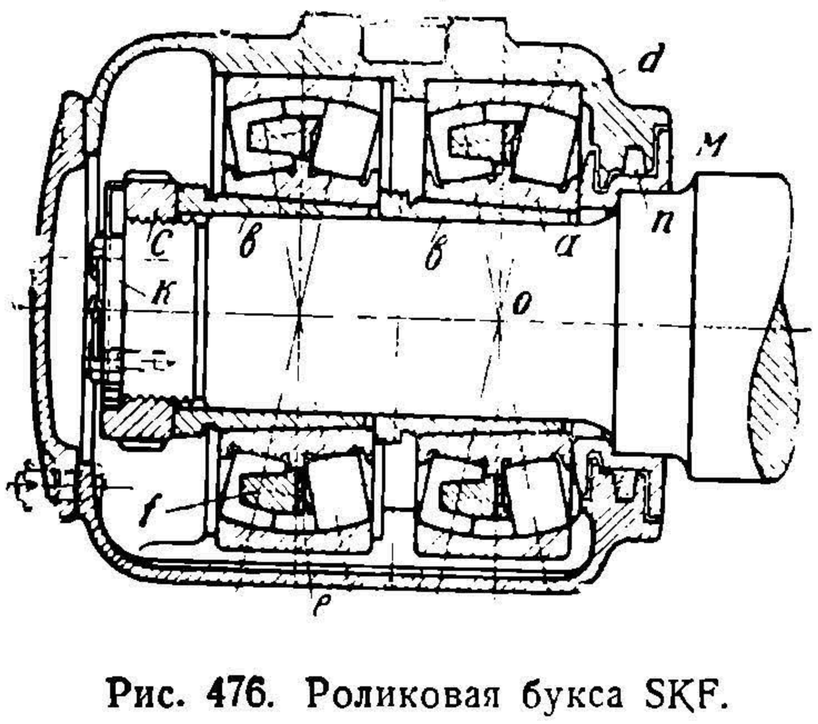


Рис. 476. Роликовая букса SKF.

Большими достоинствами отличаются подшипники, основанные на трении качения. Из этих подшипников наиболее пригодными оказались подшипники роликовые. Примером может служить двухрядный роликовый подшипник завода SKF (рис. 476). В основе этой конструкции лежат закаленные обоймы *a* и *d*, между которыми помещаются ролики бочкообразного типа. Для фиксации роликов в строго определенных положениях по отношению друг к другу между ними помещается кольцо *e* с боковыми отростками *f*, охватывающими ролики с боковых сторон. Внутренняя

НВ УПУНТ (ДІТ)

обойма плотно насаживается на втулки *bb*, которые скрепляются с осью помощью корончатой гайки *C*. Сама букса состоит из двух разъемных частей, соединяемых болтами. Для предохранения буксы от пыли и вытекания смазки применяется лабиринтная защита, в основе которой лежит кольцо *M*, насаживаемое в горячем состоянии на ось. В один из каналов лабиринта вставляется кожаная или войлочная прокладка *n*.

При умеренных нагрузках на ось и относительно небольших скоростях, например, для трамваев, может применяться роликовая букса с одним двухрядным подшипником, имеющим, вместо четырех рядов роликов, всего только два. Смазываются роликовые подшипники чаще густой смазкой, которая может держаться в буксе без замены при пробеге вагона до 6000—10 000 km. Роликовые подшипники имеют большие преимущества как в смысле понижения потерь на трение, так и в отношении надежности работы, требуя вместе с тем очень небольшого за собою ухода. Широкому их распространению пока препятствует высокая стоимость.

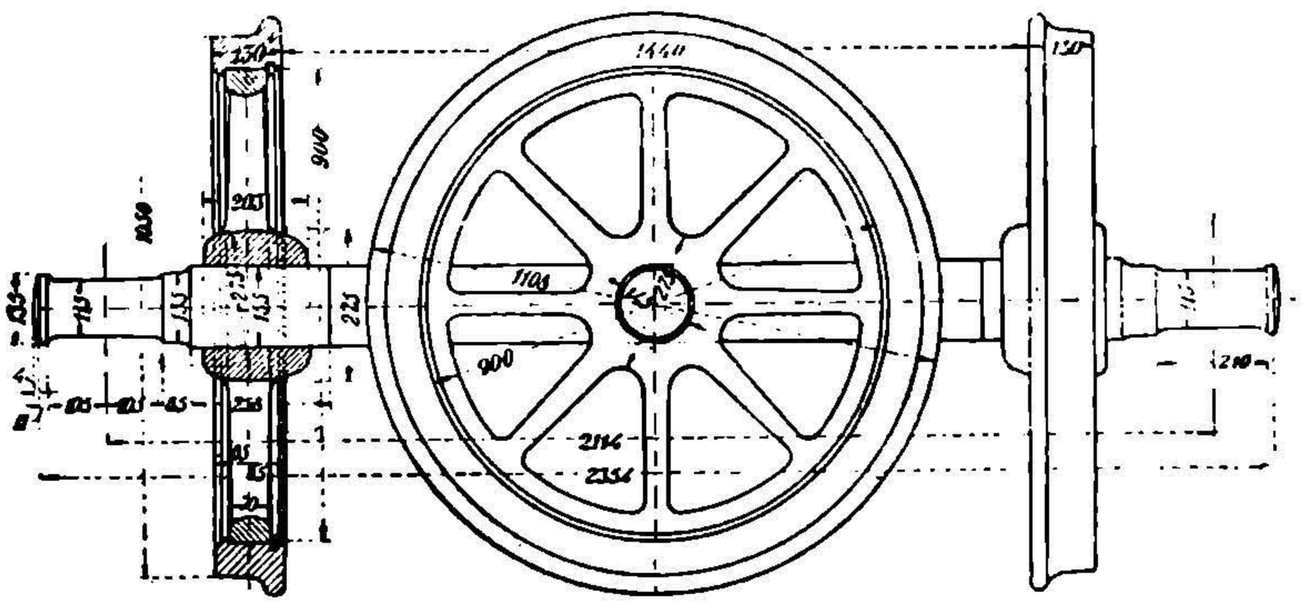


Рис. 477. Колесная пара.

К о л е с н ы е п а р ы. Одною из самых ответственных деталей вагона являются полускаты или колесные пары. Прежде всего возникает вопрос о диаметре качения колес. Преимущество больших диаметров колес в том, что они дают большую прочность колес, меньшее сопротивление движению и большую свободу в размещении оборудования, особенно электродвигателей. Преимущество малых диаметров — в более легком прохождении кривых, в меньшем весе колес, что особенно важно ввиду бесподрессорности этого веса, а также в возможности понижения высоты вагона. Последнее обстоятельство дает возможность уменьшить высоту подножки, что очень облегчает вход и выход пассажиров.

Уменьшение диаметра колес особенно важно для трамваев. В Европе для трамваев наиболее ходовые диаметры от 680 до 850 mm. В Америке они снижаются очень часто до 610—660 mm. В СССР рекомендуются диаметры 850, 780, 760 и 680 mm. В железнодорожных вагонах СССР нормальный диаметр колеса — 1050 mm.

Полускат или колесная пара состоит из оси и двух колесных центров, каждый колесный центр — из ступицы или втулки, спиц и обода (рис. 477). Колесные центры нужно разделить на безбандажные и бандажные. У первых обод колеса одновременно является и бандажом, у вторых бандаж надевается на обод и крепится на нем тем или другим способом. Связь между ступицей и ободом колеса осуществляется или с помощью спиц, или с помощью диска. Безбандажные колеса чаще всего выполняются литыми из чугуна со специальной добавочной закалкой обода. Наиболее известным типом подобных колес являются колеса Гриффина, имеющие большое распространение в Америке благодаря своей дешевизне. Кроме чугунных безбандажных колес, теперь делаются такие же колеса из литой стали. Несмотря на свою дешевизну, безбандажные колеса при ответственной работе недостаточно удовлетворительны. Даже при очень тщательной закалке обод у них довольно быстро приходиг в негодность. В этом отношении колеса с отдельными бандажами имеют существенное преимущество, так как после полного использования бандажа колесный центр не выбрасывается в лом, а остается в работе.

Бандажные колесные центры делаются или из кованого железа, или чаще из литой стали. Кованые колеса собираются из отдельных железных частей: обода, спиц и ступицы, причем последние свариваются под действием гидравлического пресса. Литые стальные колеса нормально делаются из мартеновской стали.

Насадка бандажей производится в горячем состоянии, причем нагревание нужно производить очень тщательно, оберегая бандажи от продуктов горения. Очень рационально применять электрическое нагревание бандажа, производимое образующимися в нем токами Фуко. Температура нагрева составляет около 450° С. После того, как бандаж надет на обод, для большей безопасности он закрепляется еще

НБ УБУНТ (ДІТ)

бортиком и нажимным кольцом (рис. 477). Имеется и целый ряд других вариантов этого крепления. Бандажи выполняются из высокосортной вязкой стали, чаще всего мартеновской или бессемеровской, реже тигельной. Хотя по своим качествам последняя является наиболее подходящей, но производство ее очень дорого. Согласно техническим требованиям бандажи должны изготовляться из стали с временным разрывным усилием не меньше 65—75 kg/mm² при удлинении от 14 до 16% (Л. 224).

Оси для полускатов изготовляются из кованой мартеновской или бессемеровской стали. Вместо ковки применяется нередко и прокатка. Временное сопротивление осевой стали на разрыв должно быть не меньше 50—65 kg/mm² при удлинении не меньше 16%. Оси являются чрезвычайно ответственной частью подвижного состава. Сильные ударные эффекты, приходящиеся на них, особенно при усталости материала, влекут за собою нередко их поломку, что представляет большую опасность для поезда.

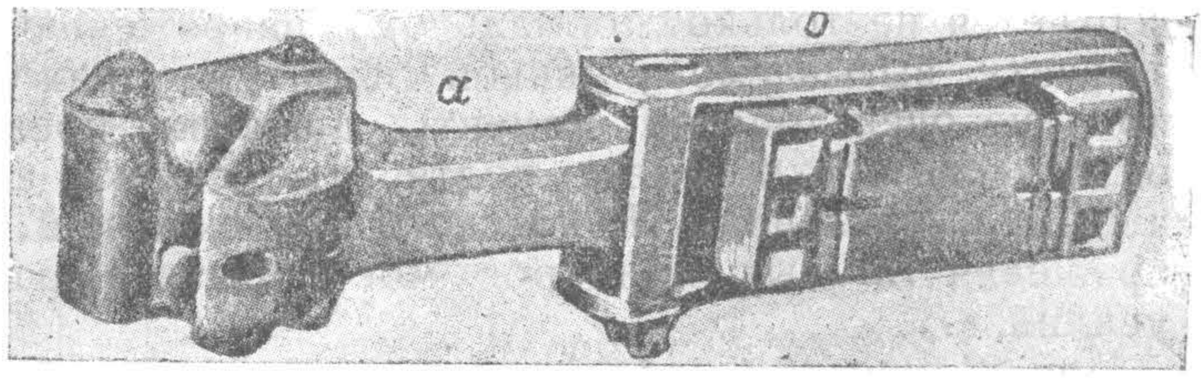


Рис. 478 Общий вид американской автоматической сцепки.

В целях облегчения веса вагонов в американской практике трамваев имеются попытки применять полые оси, пока, однако, особенно широкого распространения не нашедшие. В отношении диаметров осей наблюдаются значительные колебания. У трамваев оси имеют посредине диаметр 105—120 mm, а на шейках около 75—90 mm. У железнодорожных вагонов эти размеры колеблются, в зависимости от типа вагона, от 136 до 165 mm и от 100 до 140 mm. Для моторных вагонов рационально брать пределы более высокие. В наших пригородных вагонах диаметр оси посредине взят в 175 mm.

Упряжь вагонов. Как уже было указано, упряжные приборы современного подвижного состава разделяются на сквозные и несквозные. При сквозной упряжи сцепным прибором является винтовая стяжка. На дорогах СССР применяется теперь так называемая объединенная сцепка.

При несквозной упряжи наиболее совершенным упряжным механизмом следует считать автоматическую сцепку, американская система которой представлена на рис. 478. Данный вид сцепки объединяет тяговый и буферный приборы. Передача усилий от одного вагона к другому производится с помощью сильных промежуточных спиральных пружин, растягиваемых или сжимаемых тяговым стержнем *a*. Весь пружинный механизм помещается в закрытый кожух *o*, прикрепляемый к продольной хребтовой балке вагона или заменяющему ее брусу.

Самый процесс автоматического сцепления виден на рис. 479. В основе сцепляющихся головок сцепки лежат когти *aa*, вращающиеся около своих осей. В своем нормальном положении эти когти располагаются свободно и могут при соприкосновении легко поворачиваться. Такое положение на рис. 479 занимает правый коготь схемы *I*. При повороте когтя из его нормального положения на угол 90° выскакивает из гнезда, находящегося в боковой стенке, щеколда *b*, которая заклинивает коготь в данном его положении. Пока коготь не повернулся на 90°, его тело не позволяет щеколде выйти из ее гнезда. Положение щеколды в головке сцепки таково, что движение ее для замыкания производится автоматически, как только поднявшийся коготь освободит ей место в главной коробке. Размыкание же замка производится отводом щеколды с помощью особого рычажного размыкателя.

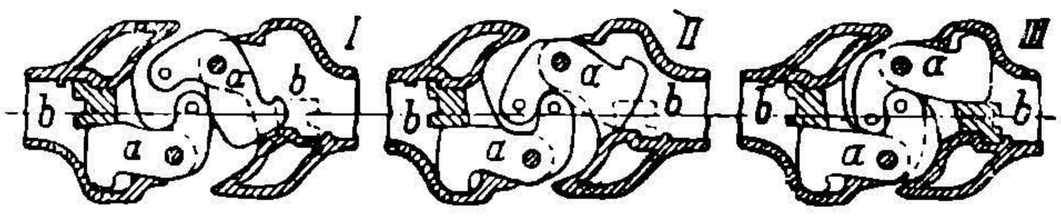


Рис. 479. Схема сцепления американской автоматической сцепки.

На рис. 479 показана последовательная картина сцепления вагонов, для которого необходимо, чтобы один вагон набежал на другой. Следует указать, что сцепление может производиться как при одном открытом когте, так и при обоих открытых. Американская автоматическая сцепка может выдерживать очень большие напряжения, порядка 60 000—100 000 t.

В отношении напряжений, возникающих в тяговых приборах, сквозная и несквоз-

НВ УДУНТ (ДІІТ)

ная упряжь сильно отличаются друг от друга. Характерной особенностью сквозной упряжи является недостаточная эластичность тяговых механизмов. Ввиду этого напряжения в них получаются чрезвычайно большими. Особенно опасны эти усилия при трогании поезда с места, когда сцепные приборы недостаточно натянуты. При этом может оказаться, что электровоз и передняя часть вагона будут находиться в движении, а задняя еще будет стоять на месте. При таких условиях сцепка подвергнется не только нормальному напряжению тяги, но и добавочному ударному эффекту, вызываемому живой силой уже движущейся части поезда. По той же причине очень опасны моменты движения поезда на переломах профиля, когда одна часть поезда имеет подтянутые сцепки, а вторая ослабленные. По теоретическим вычислениям Жуковского при сквозной стяжке наибольшие возможные напряжения тяговых приборов могут быть в два раза выше нормальных тяговых усилий.

При несквозной упряжи ускорения головной и хвостовой части поезда также могут разниться, но в значительно меньшей мере, чем при сквозной, и, кроме того, сильные пружины сцепки снижают опасность от ударных разрывных эффектов (Л. 228). Ввиду большого преимущества автоматической сцепки у нас, в СССР, принципиально решено перевести на нее весь подвижной состав наших дорог. В настоящее время уже часть вагонов оборудована такой сцепкой конструкции НКПС.

Наибольшие осложнения в работе буферных механизмов проявляются в моменты отдачи пружины. Накопленная в момент сжатия пружины энергия резко разряжается в процессе ударной отдачи. Для ослабления чрезмерных ударных эффектов в настоящее время начинают входить в практику так называемые фрикционные буферные приспособления. Основная их идея заключается в том, что при отдаче накопленной за счет упругости пружин энергии часть этой энергии поглощается работой трения. Величина поглощенной энергии колеблется в широких пределах, доходя иногда до 90—97%.

Работа трения производится чаще всего с помощью клиновидных поверхностей, входящих друг в друга; при распирании их производится очень большая работа трения. Примером может служить буфер германских железных дорог. Клиновидные поверхности здесь находятся в передней части буфера (Л. 220).

В трамвайных вагонах сцепка применяется в виде центрального механизма, объединяющего тяговой и буферный приборы. Ввиду относительно невысоких нагрузок трамвайный сцепной механизм имеет простую конструкцию, состоя в основе из поворачивающегося тягового стержня и пружинного механизма (рис. 480). Сцепка производится вручную. Тяговый стержень одного вагона входит в головку другого. Соединение их производится клином, пропускаемым через сквозные отверстия обеих тяг.

Нужно отметить, что и в условиях трамвайного движения буферные механизмы простейшего типа вызывают очень неприятные удары и толчки. Ввиду этого начинают и здесь применять фрикционные приспособления.

Отопление и освещение вагонов. Как общее правило, вагоны электрических железных дорог отопляются. В железнодорожных электрических поездах применяются различные системы отопления: паровые, паро водяные и электрические. Для производства пара в электрических поездах приходится ставить в электровозе или в специальном вагоне, иногда в багажном, паровые котлы. На электрических железных дорогах имеются попытки применить котлы электродного типа, с нагревом воды и получением пара за счет электрической энергии.

Значительно более удобно электрическое отопление, которое при дешевой энергии может быть выгодней парового, не говоря уже о его технических преимуществах. Особенно удобно электрическое отопление при переменном токе, когда в вагоне или электровозе имеется секционированный трансформатор, причем для отопления нормально используется главный трансформатор, с выводом от него соответствующих секций. На немецких железных дорогах для электрического отопления нормально отводятся напряжения в 1000, 800 и 500 V, причем из них берется то или другое в зависимости от состояния погоды. Отопление трамвайных вагонов применяется не всегда, хотя в некоторых странах, например в Америке, электрическое отопление применяется, как общее правило.

Расход энергии на отопление сильно колеблется в зависимости от типа поезда. У трамвайных вагонов, где двери очень часто открываются и где отопление ва-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

гона далеко не всегда удовлетворительно, расход энергии на отопление значительно выше, чем у железнодорожных. По данным немецких дорог, мощность, потребная для нагрева, определяется в 170—250 W/m³. Если нагревательные приборы выполняются с аккумулированием тепла, то эта цифра несколько повышается, но зато расход энергии несколько снижается. Расход энергии для поддержания превышения температуры над окружающей средой в 1° С определяется для железных дорог в 3,5—4,5 Wh/m³. Для трамваев эта цифра поднимается до 6—8 Wh/m³. Для иллюстрации расхода энергии на отопление приведена табл. 71, дающая результаты опытов Бруклинских железных дорог.

ТАБЛИЦА 71.

Данные об отоплении трамвайных вагонов.

Тип вагона			Температура в °С		Расход энергии в Wh	Удельный расход энергии на 1°С/m³ в Wh
Дверей	Окон	Кубатура m³	Внешняя	Внутр.		
2	12	24,2	— 2,22	12,7	2 295	6,35
2	12	24,2	—13,9	3,9	2 325	5,4
2	12	22,9	— 2,22	9,45	2 180	8,15
2	12	25,8	1,67	11,2	2 745	11,2
4	16	28,7	—13,9	7,76	3 038	4,87
4	16	28,7	— 2,22	12,2	3 160	7,6

Освещенность вагонов электрических железных дорог колеблется в довольно больших пределах. В среднем, число ламп-свечей на 1 m² площади пола вагона определяется в 8—30. Яркость освещения сильно зависит от окраски вагона. Наиболее благоприятная окраска — светложелтая. Электрические лампы для поездов должны иметь прочную нить, нечувствительную к толчкам и тряске.

Освещение электрических железных дорог производится или непосредственно от сети, или от специальных агрегатов. В первом случае, встречающемся преимущественно на трамваях, приходится мириться с большими колебаниями освещенности, как следствием падения напряжения в контактной линии. При применении же специальных динамо, несмотря на то, что они работают нормально от двигателей, приключенных к сети, напряжение удается поддерживать более или менее постоянным при помощи специальных регуляторов осветительного напряжения. Последние действуют в большинстве случаев с помощью реле напряжения, включающих или выключающих сопротивления в цепи возбуждения или главной цепи осветительной динамо (рис. 233).

Современное состояние строительства вагонов электрических железных дорог. Вопрос об установлении каких-либо широких стандартных норм для вагонов электрических железных дорог до сего времени остается нерешенным. Одним из существенных недостатков современных вагонов следует считать большой вес их тары. Судить об этих весах можно на основании табл. 72, дающей средние данные для трамвайных вагонов европейского типа.

ТАБЛИЦА 72.

Весовые соотношения нормальных трамвайных вагонов.

Части вагонов	Вес в kg		
	Вагон с жесткой базой	Вагон с одноосной поворотной тележкой	Вагон четырехосный
Кузов . .	4 640	5 000	5 200— 6 000
Тележка	2 600	3 500	4 000— 4 500
Электр. оборудование	2 700	3 300	3 300— 3 500
Тормоз . .	500	500	500
Итого .	10 440	12 300	13 000—14 500

На одно место для сидения приходится от 420 до 550 kg тары. Для прицепных вагонов та же величина равна 250—360 kg. Учитывая, что средний вес пассажира не выше 65—70 kg, мы видим из приведенных данных, какой большой мертвый груз приходится возить в поезде.

Табл. 73 дает представление об основных показателях ряда существующих трамвайных вагонов СССР.

Представление об общем виде и внутреннем устройстве нормального трамвайного вагона европейского образца может дать вагон кельнского трамвая (рис. 048).

НБ УНУНТ (ДІТ)

ТАБЛИЦА 73.

Параметры трамвайных вагонов СССР.

Типы вагонов	Вес тары в t	Площадь пола в m²	Вес на 1 m² площади пола	Число мест для сидения	Вес на 1 место для сидения	Диаметры бандажей в mm	База в mm
Вагон лентрамвая Коломенского завода, деревянный	13,6	21,15	640	24	567	850	3 000
Вагон на тележках Беккера МГЖД, деревянный . . .	16,5	22	750	26	636	885	3 600
Металлический вагон Мытищенского завода	12,2	23	530	24	509	760	2 700
То же Кировского завода .	12,15	21,15	580	24	506	760	2 700

Для характеристики американских трамвайных вагонов двухосного типа приводится табл. 74.

ТАБЛИЦА 74.

Данные об американских трамвайных вагонах.

Тип вагона	Длина кузова	Общая длина	Ширина в уровне пола	Число мест для сидения	Вес в t	
					Кузов	Тележка
Нормальный, закрытый завода Brill .	15′10″	25′6″	6′2″	22	4 500	4 800
То же	17′	26′8″	6′2″	24	4 800	4 800
„ „	18′	27′8″	6′2″	24	5 100	4 800
„ „	21′0″	29′8″	6′2″	28	5 250	4 800
Сезонный вагон .	25′6″	35′2″	7′	40	6 250	5 250

Как было уже отмечено, в американской и отчасти в европейской практике имеются определенные тенденции в пользу четырехосных вагонов. Нужно указать, что постройка двухосных вагонов с числом сидений выше 24—36 представляет чрезвычайно трудно разрешимую задачу. Ввиду этого для больших емкостей возникает необходимость в четырехосных вагонах. Относительно широкое распространение в Европе вагонов максимальной тяги объясняется приведенными соображениями. С точки зрения весовых соотношений вагоны максимальной тяги, давая около 400 kg на место для сидения, являются вполне приемлемыми. Однако, в эксплоатации они, оказываются не особенно удовлетворительными, так как нередко бегунок соскакивает с рельсов. Ввиду этого начинают в настоящее время отдавать предпочтение нормальным четырехосным вагонам с четырьмя двигателями. При современном состоянии строительства легких двигателей, дробление общей мощности вагона на четыре единицы мало отзывается на весовых соотношениях общего оборудования. Преимущества большей устойчивости хода и лучшее использование сцепного веса объясняют, почему четырехосные трамвайные вагоны начинают широко применяться.

Следует отметить появление в Германии оригинальных типов сочлененных вагонов. Идея их заключается в том, что вагон разбивается на ряд элементов, соединяемых шарнирными связями. Элементы могут состоять из двухосных вагонов или комбинации четырехосных и двухосных. Объединение производится с помощью эластичных гармоник. Отдельных элементов бывает два или три. Примером может служить схема рис. 481. Появление таких вагонов объясняется стремлением сделать относительно длинный вагон способным проходить по узким улицам и кривым с малым радиусом кривизны.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Обращаясь теперь к вагонам метрополитенов и железных дорог, приходится констатировать, что их весовые показатели резко колеблются в пределах от 400 до 900 kg на место для сидения. Особенно большие веса получаются у тяжелых вагонов, предназначенных для больших расстояний и имеющих комфортабельное устройство. Рис. 482 и 483 дают представление о вагоне желез-

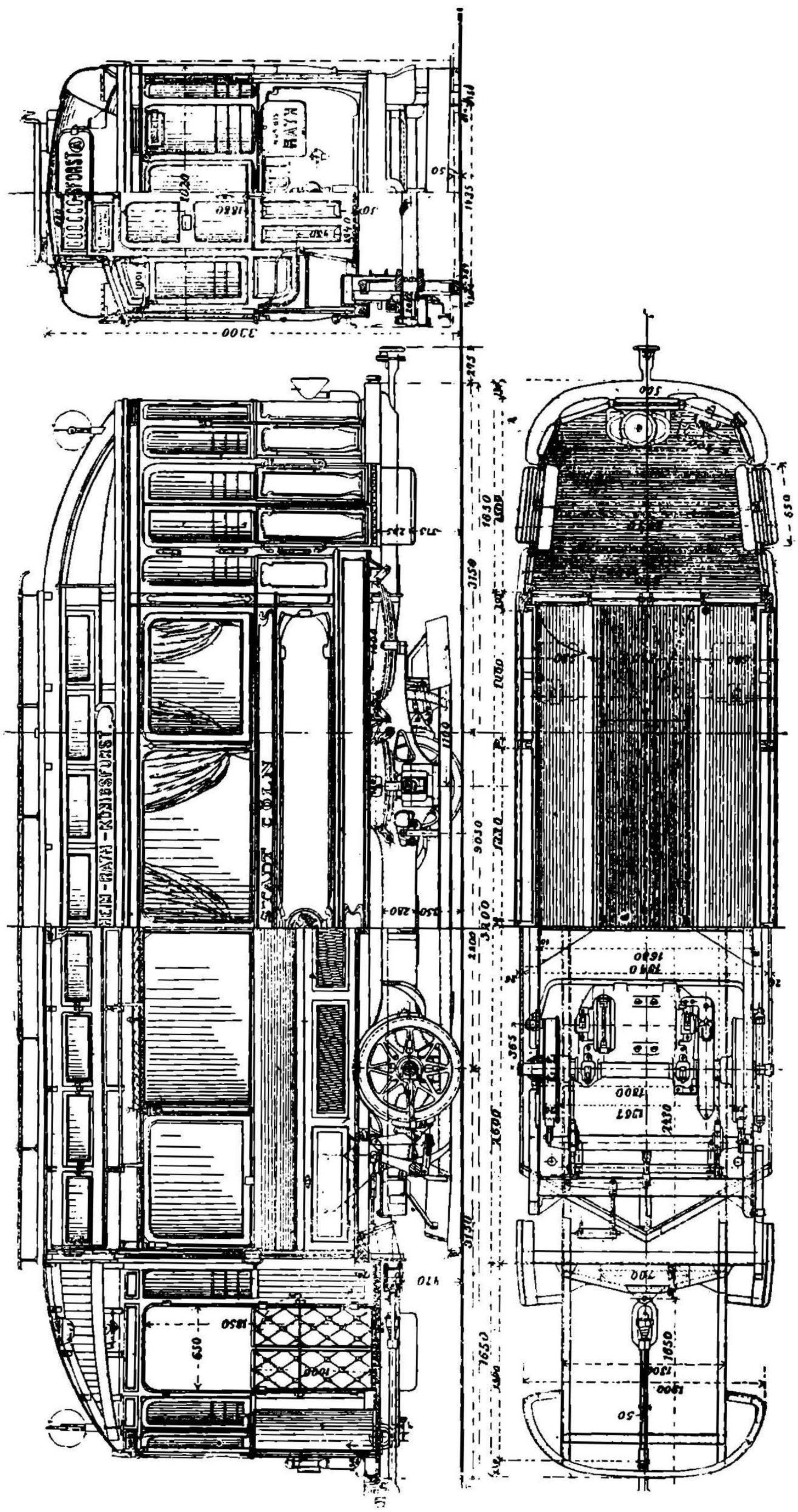


Рис 180. Вагон кельнского трамвая.

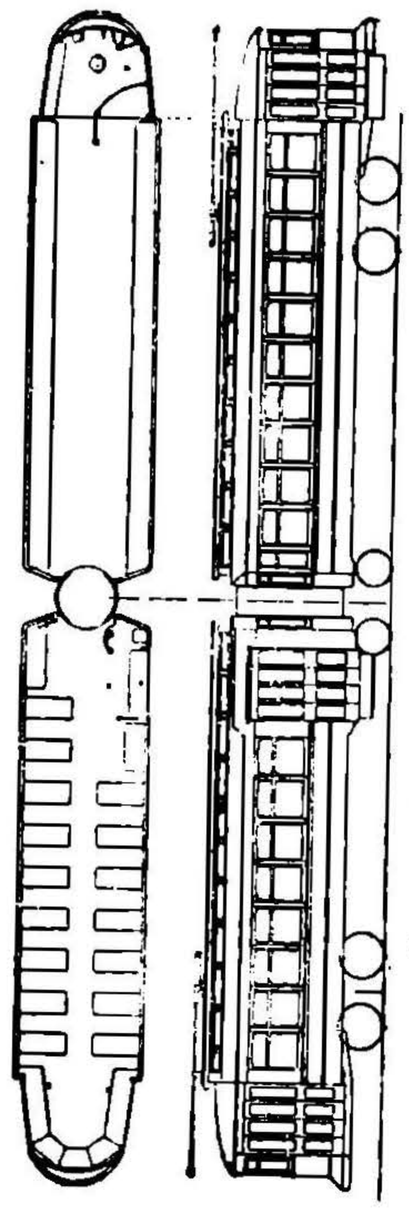


Рис. 481. Схема сочлененного вагона.

ной дороги Paris-Orléans, где вес тар около 800 kg на место для сидения. Вагоны Мытищенского завода пригородных железных дорог СССР дают на одно место для сидения около 500 kg. В табл. 75 приводятся характерные параметры четырехосных вагонов метрополитенного типа железных дорог, взятые из книги Seefehlner'a.

Образец моторного вагона, примененного швейцарскими железными дорогами для однофазного тока, дан на рис. 484. Вагон этот имеет мощность в 1440 PS_h и

НБ УДУНТ (ДІІТ)

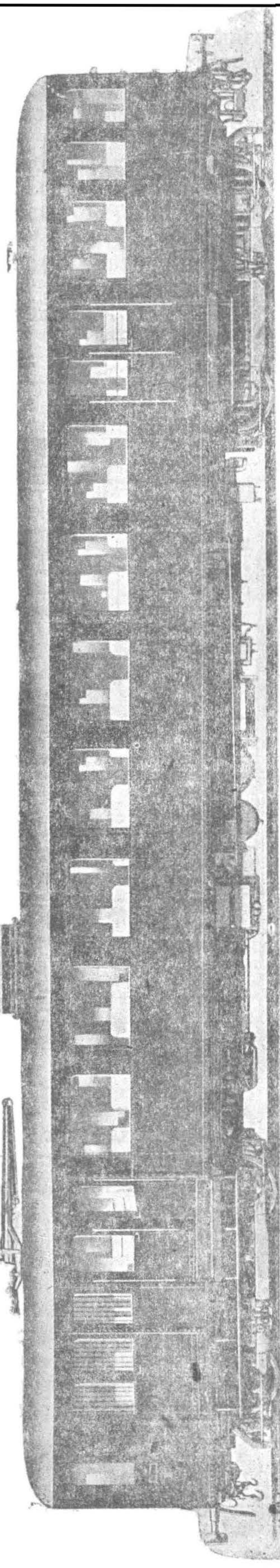


Рис. 482. Общий вид вагона пригородных ж. д. Paris-Orléans.

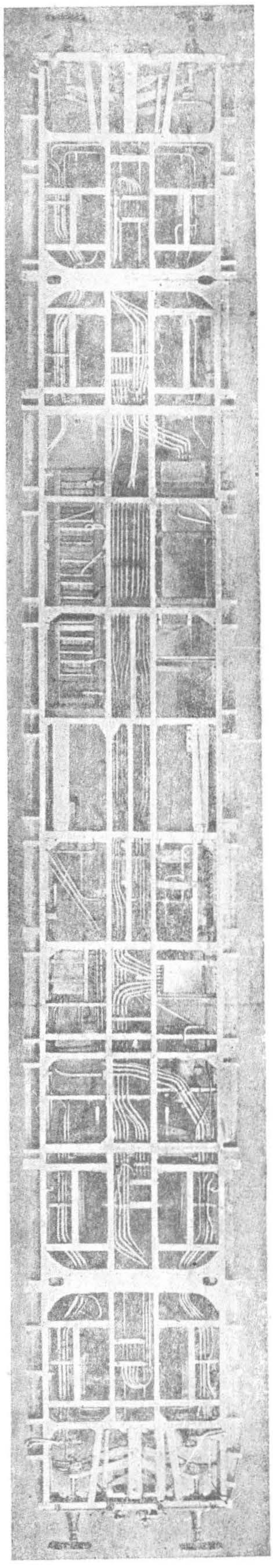


Рис. 483. Вид снизу на вагон рис. 482.

имеет одну тележку двухосную и другую трехосную с двумя двигателями на каждой.

Чтобы дать представление о весовых соотношениях электрического и механического оборудования у вагона четырехосного типа, можно указать, что у вагонов Мытищенского завода, при общей мощности в 680 kW_h, вес механических частей составляет 37 t, вес двигателей—10,5 t и вес прочего электрического оборудования—9,5 t. У приведенного на рис. 484 вагона однофазного тока вес механических частей составляет 45 t и вес электрических—28,6 t. Для иллюстрации современных вагонов пригородных дорог приводится табл. 76 (Л. 28).

Приведенные весовые соотношения показывают, что вес тары современных вагонов, являющейся „мертвым“ весом поезда, достигает очень больших величин. Это обстоятельство привело к попыткам радикально снизить вес вагонов, главным образом на трамваях, где относительно невысокие скорости движения дают возможность значительно облегчить вагоны.

С этой целью американцы стали применять легкие штампованные части, легкие материалы, полые оси и ультрабыстроходные двигатели. Особенно большим распространением в Америке начинает теперь пользоваться алюминий и различные его сплавы. Последние при надлежащей термической обработке обладают большой прочностью до 44 kg/mm^2 при пределе упругости

НВ УДУНТ (ДІІТ)

до 28 kg/mm² и удлинении до 25%. Алюминиевые сплавы в настоящее время применяются в Америке для самых ответственных частей, не исключая клепаных рам, тележек и кузовов.

В результате указанных мероприятий американцам удалось достигнуть исключительных успехов в снижении весов вагонов, что видно из приводимого весового соотношения для двухосного вагона на 41 место для сидения при общей мощности двигателей 2×25 PS$_h$.

Вес частей вагона в kg:

Кузов	4105
Тележка . .	1905
Электрическое оборудование	907
Воздушный тормоз .	340
Итого	7257

Это дает на 1 место для сидения только 177 kg. Второй пример можно привести для четырехосных вагонов, где тоже, хотя и не так резко, но все-таки очень значительно снижен вес (табл. 77). Одновременно с уменьшением веса вагона, приводящим к соответственной экономии энергии на движение, американцы стали широко практиковать обслуживание вагона одним человеком. При таком условии вожатый должен исполнять свои собственные функции по управлению вагоном и следить за пассажирами. При обслуживании вагона одним человеком часто применяются автоматические кассы, открывающие проход в вагон только пассажиру, опустившему в них соответствующую монету. При бескондукторном вагоне пассажиры выходят и входят чаще всего через одну площадку, имеющую две двери, одну—для входа, другую—для выхода. Для облегчения работы вожатого иногда перед ним устанавливается зеркало, чтобы он мог, не поворачивая головы, наблюдать за порядком в вагоне.

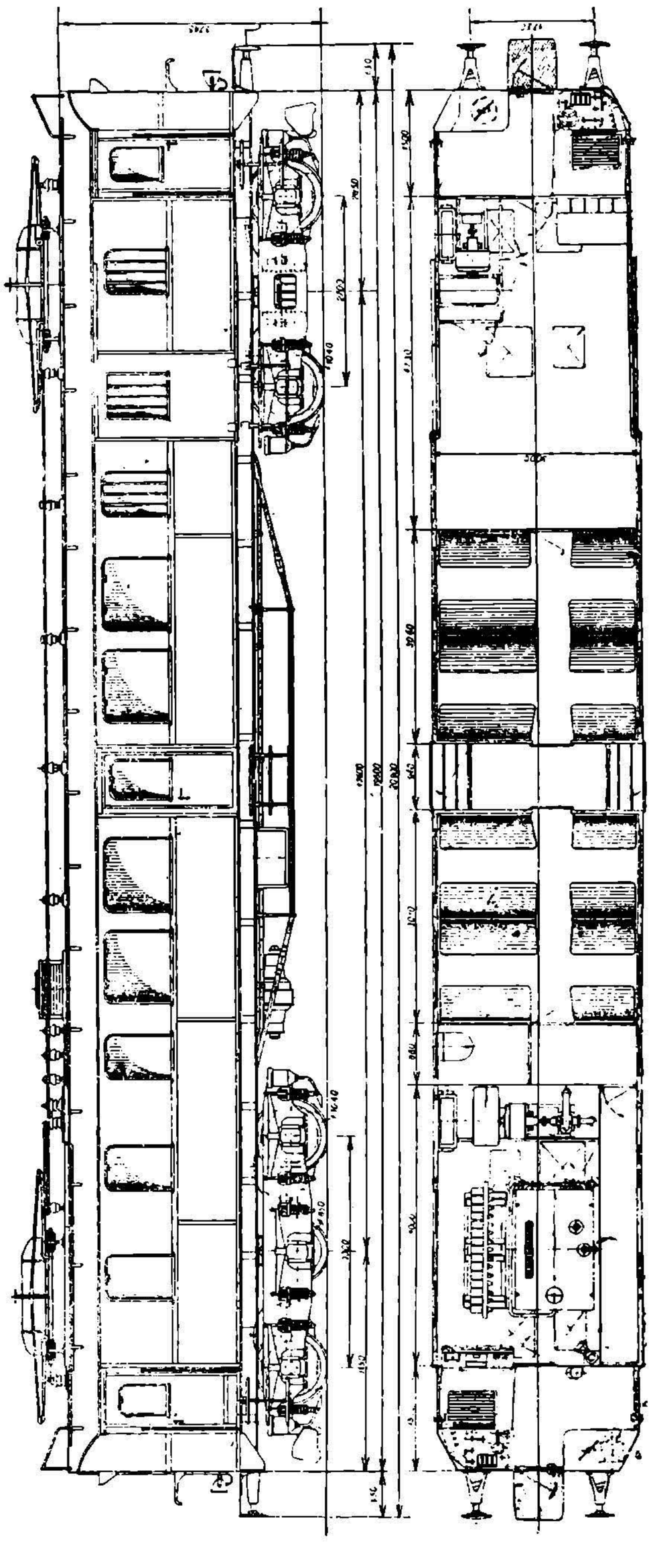


Рис. 484. Вагон государственных швейцарских ж. д.

Большое внимание в Америке обращают на безопасность движения.

Очень распространены там автоматически закрывающиеся двери и поднимающиеся подножки. Пока вагон находится в движении, двери закрыты, подножка поднята. Как только вагон остановился, вожатый, с помощью электромагнитного или электропневматического привода, нажав на кнопку или ручку, опускает подножку и одновременно отворяет дверь. Когда пассажиры вышли и вошли, вожатый таким же образом запирает дверь и поднимает подножку. Нередко к этому прибавляется еще и такое устройство, что только после указанных манипуляций вожатый может включить ток. Благодаря таким приспособлениям значительно понижается число несчастных случаев, большой процент которых приходится на случаи из-за вскакивания и соскакивания на ходу.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ТАБЛИЦА 75.

Параметры вагонов метрополитенов.

Название дорог	Параметры вагонов			Емкость вагона		Вес вагона в t		Порожнего на 1 m длины	Общая мощность на поезд в PS_h	Мощность в PS_h на тонну поезда (удельная мощность)	Отношение сцепного веса ко всему весу при полной нагрузке
	Длина в m	Ширина в m	Площадь пола в m^2	Максимальное число пассажиров	Максимальное число пассажиров на m^2 пола	Порожнего	С пассажирами				
Берлинский метрополитен .	12,7	2,36	29,2	100	3,59	18,0	25,0	1,42	4 × 75= 300	6,3	53,0
Берлинская Северо-Южная	13,6	2,50	33,9	126	3,72	31,2	40,3	2,18	2 × 150= 300	7,5	57,0
Берлин—Шенеберг	12,8	2,36	30,2	100	3,32	20,0	27,0	1,56	2 × 80= 160	6,0	57,0
Бруклинская быстроходная	15,0	2,62	39,2	151	4,00	32,5	44,3	2,16	6 × 200=1 200	6,8	41,6
Буэнос-Айрес	16,0		—	—	—	30,0	—	—	2 × 115= 230	—	—
Гамбургский метрополитен	12,8	2,56	32,8	100	3,30	24,0	31,0	1,87	2 × 100= 200	6,45	57,0
Гудзон—Мангаттан	14,8	2,49	37,0	158	4,30	33,6	43,7	2,27	2 × 160= 320	7,4	54,9
Нью-Йорк подземн. быстрох.	16,2	2,60	41,6	169	4,07	35,2	46,0	2,20	6 × 200=1 200	5,8	38,3
Лондон и Юго-Западная	16,1	2,45	39,5	170	4,30	36,6	48,0	3,00	4 × 275=1 100	8,3	—
Лондон и Северо-Западная	18,3	2,75		170	—	—	—	—	4 × 250=1 000	8,1	44,0
Лонг-Айленд .	15,7	—	—	154	—	36,0	46,0	2,30	2 × 200= 400	6,3	42,2
Лонг-Айленд, подземная .	19,6		—	186	—	47,5	59,3	2,42	2 × 235= 470	7,0	56,4
Мельбурнская .	—	—	—	—	—	48,0	60,7	—	2 × 140=1 680	6,5	67,5
Нью-Йорк, метрополитен, только моторные вагоны .	20,4	2,76	53,5	270	5,00	38,6	55,8	1,89	2 × 140= 280	5,0	49,9
Нью-Йорк, метрополит. 1916	20,4	2,93	60,6	270	4,50	38,3	55,3	1,88	2 × 160= 320	5,8	57,0
Парижский метрополитен .	13,4	2,40	32,3	—	—	28,5	37,0	2,12	4 × 150= 600	4,1	39,0
Парижск. подз., Сев.-Южная	14,4	2,40	34,6	—	—	32,5	41,0	2,24	8 × 125=1 000	6,6	50,0
Филадельфийская . .	15,4	2,67	41,0	170	4,00	36,0	47,0	2,34	2 × 125= 250	7,0	50,0
Москва, метрополитен	18,8	2,7	37,8	170	4,5	50,5	62,5	2,68	12 × 205=2 760	7,9	59,2

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ТАБЛИЦА 76-а

Параметры вагонов пригородного типа.

Наименование дороги и го. изготовления вагонов	Род тока и напряжение	Тип поезда	Число моторов моторн. вагона	Часовая мощн. мотора в PS_h	Длина вагона в m		Шир. вагона в m		Высота вагона в m от головки рельс. до верха крыши		Диаметр колес в m	
					Моторн.	Прицепн.	Моторн.	Прицепн.	Моторн.	Прицепн.	Мот.	Приц.
Пригородные ж. д. Берлина (1924)	ПС 800	2 м.+3 п.	2	230	20,5	9,5	2,9	2,9	3,65	3,65	1,000	0,850
То же (1925) .	ПС 800	2 м.+2 п.	4	125	16,98	16,98	3,10	3,10	3,55	3,55	0,850	0,850
(1927) .	ПС 800	2 м.+2 п.	4	125	16,98	16,98	3,10	3,10	3,55	3,55	0,900	0,900
Пригородные ж. д. Парижа (гос.ж.д.) 1 серия (1912) .	ПС 600	1 м.	2	235	22,2	—	2,93	—	4,06	—	0,925	—
То же 2 серия (гос. ж. д.) (1914) .	ПС 600	1 м.	4	165	22,2	—	2,93	—	4,06	—	0,925	—
3 „ (1919)	ПС 600	1 м.+1 п.	4	165	18,66	18,66	2,95	2,95	4,02	4,02	1,100	1,100
(Париж—Орлеан) (1925) .	ПС 1 500	1 м +2 п.	4	235	19,9	19,9	3,00	3,00	3,88	3,88	1,100	1,100
Пригородные ж. д. Лондона, южная сеть (1928/29) .	ПС 600	2 м.+1 п.	2	275	16,03	16,03	2,44	2,44	—	—	1,080	1,080
То же (1926)	ПС 600	1 м.+2 п.	4	200	18,0	17,5	2,44	2,44	—	—	1,090	1,090
(1924) .	ПС 600	1 м.+2 п. 1 м.+3 п.	4	200	15,8	15,8	2,67	2,67	—	—	0,970	0,970
(1920/23)	ПС 600	1 м.+2 п.	4	198	17,10	17,10	2,9	2,90	3,65	3,65	0,970	0,910
„ (город. южн. Лондон) (1925)	ПС 600	1 м.+2 п.	2	240	15,8	15,8	2,70	2,70	2,91	2,91	1,180	0,760
Пригородные жел. дор. Ливерпуля (Ливерп. Южн. порт) (1909—1913)	ПС 600	2 м.+3 п.	4	250	19,4	19,4	3,05	3,05	3,84	3,84	1,120	1,120
Междугородная дорога Амстердам—Роттердам (1925)	ПС 1 500	2 м.+3 п.	4	210	20,0	20,0	3,00	3,00	—	—	1,100	1,100
Пригородные участки Мюнхенского узла (1924)	Одн. 15 000	1 м.	2	250	18,15	—	2,90	—	3,95	—	0,990	—
То же (1927) .	Одн. 15 000	1 м.+1 п.	2	250	18,77	18,77	2,90	2,90	3,95	3,95	1,000	1,000
Пригородные Северные ж. д. Милана (1929) .	ПС 3 000	1 м.+2 п.	4	180	20,60	20,6	—	—	—	—	1,000	1,000
Пригородные СССР .	ПС 1 500	1 п.+1 м. +1 п.	4	230	19,30	19,3	3,48	3,48	4,06	4,06	1,050	1,050

НВ УДУХТ (ДІІТ)

ТАБЛИЦА 76-b.

Наименование дороги и год изготовления вагонов	Число пассажиров				Вес вагона без пассажир. в t		Вес вагона на одно место для сидения		Вес вагона на одного пассаж., включая стоящ. и сидящ.		Общий вес на одного пассаж. в t	Часовая мощн. на тонну веса поезда в PS_h		Общий вес на 1 m^2 площ. вагона	
	Мот. ваг.		Приц. ваг.												
	Сидеть	Стоять	Сидеть	Стоять	Мот.	Приц.	Мот.	Прицепного	Мот.	Прицепного		Без пассаж.	С пассажирами	Мот.	Приц.
Пригородные ж. д. Берлина (1924) .	79	137	44	68	41,0	14,5	0,520	0,730	0,190	0,130	0,162	7,30	5,12	0,915	0,525
То же (1925) . .	54	154	59	150	40,0	32,0	0,740	0,552	0,192	0,154	0,173	6,95	5,00	0,840	0,510
» (1927) .	54	154	58	150	35,0	25,8	0,650	0,446	0,168	0,124	0,146	8,25	5,55	0,670	0,490
Пригородн. ж д. Парижа (гос. ж. д.) 1 серия (1912)	50	54	—	—	59,0	—	1,48	—	0,628	—	0,628	7,98	7,50	0,900	—
То же 2 серия (гос. ж. д.) (1914) .	62	54	—	—	—	—	1,20	—	0,638	—	0,638	8,92	8,50	1,125	—
3 (1919) .	82	100	90	97	57,0	37,5	0,690	0,418	0,313	0,200	0,256	7,00	5,50	1,030	0,680
(Париж—Орлеан) (1925) . .	82	61	86	63	65,1	37,7/36,2	0,795	0,430/0,362	0,455	0,253/0,203	0,290	7,12	5,40	1,060	0,625/0,605
Пригородные ж. д. Лондона, южная сеть (1928/29) .	60	—	60	—	36,8	23,8	0,614	0,396	—	—	0,814	11,30	8,75	0,930	0,602
То же (1926) .	84	20	100	20	56,0	28/30	0,665	0,280/0, 12	0,538	0,234/0,254	0,335	9,80	8,12	0,890	0,700
(1924) . .	48	48	56	56	39,2	22,9	0,819	0,398	0,407	0,200	0,267 0,250	9,40/7,40	7,38/5,75	0,930	0,538
(1920/23) .	40	80	44	88	44,1	25,2/24,1	1,100	0,525/0,550	0,368	0,175/0,183	0,241	8,50	5,95	0,890	0,506
(город. южн. Лондон) (1025) .	28	56	44	88	31,5	17,75	1,120	0,400	0,376	0,135	0,311	7,16	4,73	0,740 1,05	0,416
Пригородные жел. дер. Ливерпуля (Ливерп. Южн. порт) (1909—1913)	69	—	103	—	68,0	48,0	0,985	0,466/0,630	—	—	0,668	7,13	6,60	1,165	0,815
Междугородная дорога Амстердам—Роттердам (1925)	88	12	88	12	66,0	44,0	0,750	0,500	0,660	0,440	0,528	6,35	5,40	1,100	0,730
Пригородные участки Мюнхенского узла (1924)	73	—	—	—	56,0	—	0,768	—	0,768	—	—	8,90	—	1,210	—
То же (1927) . .	75	—	73	—	60,0	39,0	0,800	0,500	0,800	0,500	0,648	5,05	4,55	1,100	0,720
Пригородные Северные ж. д. Милана (1929) .	—	—	—	—	53,0	36,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Пригородные СССР	108	52	108/92	52/43	58	37,5	0,537	0,347/0,406	0,362	0,235	2,96	6,71	5,7	0,9	0,585

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Рассмотренные мероприятия американских трамваев обеспечивают значительную экономию в эксплоатационных расходах. Нужно, однако, заметить, что применение ультраоблегченных вагонов в Америке за последнее время значительно упало. Причина этого, повидимому, кроется в том, что механически такие вагоны недостаточно прочны. Ввиду этого американцы теперь предпочитают вагоны облегченного типа с весовым соотношением около 300—310 kg на место для сидения. Представление о современных американских вагонах дает табл. 77 (Л. 250).

ТАБЛИЦА 77.

Параметры американских вагонов.

Наименование трамвайных компаний	Колич. вагонов заказа 1930 г.	Количество мест для сидения	Общая длина в mm	Колич. тележек	Общий вес в t	Колич. моторов	Общ. мощность моторов в PS_n	Колич. агентов на вагон	Диаметр колес	Вес на 1 место для сидения	Мощн. на 1 t веса в PS_n
Mobile Lt. R. R. Co	7	33	9 075	1	8,6	2	36,8	1	660	260	4,3
Los-Angelos Ry	2	55	14 945	2	17,2	4	147,2	2	660	313	8,6
Market St. Ry	21	52	14 335	2	17,6	4	118,0	2	—	338	6,7
Pacific Electric Ry .	15	40	11 640	2	16,8	4	102,8	—	660	420	6,1
Delaware El. Pwr. Co .	12	44	12 760	2	16,6	4	102,8	1—2	660	378	6,2
Chicago Joliet El. Ry .	1	40	10 980	1	7,95	2	73,6	1	560	200	9,2
Northern Indiana Ry	10	44	12 910	2	14,1	4	102,8	1	660	320	7,3
Des Moines Ry	40	51	12 810	2	16,1	4	118,0	1	660	315	7,4
Monroe Municipal Ry	4	32	8 540	1	7,25	2	36,8	1	660	227	5,1
Unit. Rys El. Co. Baltimore .	150	52	14 030	2	17,6	4	102,8	1	660	338	5,8
Dept. of St. Rys. Detroit .	130	52	14 770	2	16,8	4	102,8	2	660	323	6,1
Brooklyn Queens Tr. Co .	100	54	13 880	2	11,8	4	102,8	1	660	311	6,1
Oklahoma Ry	20	32	11 410	2	11,7	4	73,6	1	660	365	6,3
Anegheny Va Rev St. Ry	12	48	14 410	2	14,6	4	102,8	1	560	304	7,1
Lehigh Va Rey Tr. Co . .	10	48	13 980	2	16,9	4	102,8	2	660	352	6,1
Jork Rys	3	50	13 190	2	15,3	4	73,6	1	660	305	4,8
Knox ville Pwr. Lt. Co . .	10	44	12 000	2	15,1	4	102,8	1	660	342	6,8
Edmonton Radlal Ry . .	5	51	14 030	2	17,6	4	118,0	1	660	344	6,7

В Европе начинания Америки прививаются слабо. Вагоны с одним агентом и с особыми мероприятиями по ограждению безопасности насчитываются единицами. Ультралегких вагонов Европа почти совершенно не имеет. Однако, стремление облегчить вагоны вполне определенно замечается и в Европе. Подтверждением сказанного может служить табл. 78. Нужно указать, что ряд принципов, заложенных в конструкцию американских вагонов, был применен при конструировании четырехосных вагонов постройки ленинградского трамвая.

Очень важное значение в настоящее время придают бесшумности хода вагонов. Особенно с этим приходится считаться в условиях трамвайного движения. В Америке на это теперь обращают исключительно большое внимание. Объясняется это прежде всего стремлением обеспечить как можно больше комфорт и удобства для пассажиров, способствующие успеху трамвайного транспорта в борьбе его с автомобильным. Кроме того, бесшумность хода имеет очень важное значение и с точки зрения общего уменьшения городского шума. Наконец, бесшумное движение поездов является показателем хорошего состояния подвижного состава, результатом чего должны быть и меньшая стоимость его ремонта, и меньший расход энергии на движение.

Шум при движении поездов вызывается самыми разнообразными обстоятельствами. Он зависит от расхлябанности отдельных частей вагона, от задевания реборды о рельсы, от проката бандажей, от плохого состояния рельсов и от многих других дефектов пути и подвижного состава. Особенно большие неприятности в этом отношении причиняют зубчатые передачи. Для уменьшения шума американцы делают для зубчатой передачи специальные кожуха с обивкой. Особенно бесшумно работают червячные передачи. В тех же целях борьбы с шумом

НВ УДУНТ (ДІІТ)

ТАБЛИЦА 78.

Сравнительные данные об американских и европейских вагонах.

Предприятия	Длина вагона без буферов m	Наиб. ширина вагона в m	Площ. основан. вагона в m^2	Вес вагона на 1 m^2 площади основания	Число мест для сидения	База в m	Диаметр колес в mm	Мощн. моторов в kW_h	Мощн. моторов в kW_h на 1 t веса вагона	Число осей	Вес вагона в t
Лондон, 2-этажн. 1927	10,9	2,23	40,0	0,31	71	—	700	2×37	6,0	4	12,25
Кливлэнд,(дюралюмин),1927	15,5	2,5	37,0	0,37	49	1,82	650	4×26	7,6	4	13,7
Филадельфия .	13,7	2,6	34,5	0,45	54	—	$\frac{700}{550}$	—	—	4	15,4
Берлин, 1924 .	10,44	2,2	21,1	0,52	24	2,8	720	2×34	6,2	2	11,0
Нюренберг (с 3 дверями)	10,38	2,15	21,0	0,55	22	2,8	732	2×43	7,4	2	11,65
Лейпциг, 1926 .	10,9	2,15	22,5	0,61	24	3,6	700	2×34	5,0	2	13,6
Париж (с кард. перед.)	11,29	2,0	21,0	0,61	30	3,6	820	2×43	6,7	2	12,8
Springfield (Америка)	12,3	2,43	28,5	0,38	45	--	650	—	—	4	10,65
Arnheim (Голландия) . .	12,62	2,2	25,8	0,70	37	1,6	680	4×25	5,55	4	18,0
Турин, 1929 .	9,54	2,28	18,5	0,54	25	2,8	660	2×31,5	6,3	2	10,0
Дрезден (4-осн.) .	14,6	2,15	26,2	0,73	36	1,8	650	4×45	9,5	4	19,0
Милан, 1928 . .	13,17	2,35	29,5	0,50	43	—	—	4×18,5	5,05	4	14,7
Вена (дерев. кузов) .	10,9	2,2	22,4	0,60	24	3,6	840	2×46	6,85	2	13,35
Берлин, 1927	11,2	2,2	23,5	0,51	31	3,5	650	2×40	6,65	2	12,0
Штеттин, 1930 . .	10,49	2,2	22,2	0,58	24	3,2	660	2×46	7,25	2	12,7

начинает входить в практику применение резиновых прокладок между бандажом и ободом колеса. Пол в вагонах делается часто с прослойкой из волосяного войлока. Стенки вагона обиваются папкой. Понижение веса вагона и особенно веса полускатов также сильно содействует уменьшению шума. В СССР образцом бесшумного подвижного состава может служить пробный поезд московского трамвая, при конструировании которого применено большинство последних достижений мировой техники вагоностроения.

В заключение рассмотрения современных вагонов электрических железных дорог необходимо отметить начавшееся сильное течение в пользу применения ультрабыстроходных вагонов. Пионером в этом направлении является Америка, где в настоящее время на ряде дорог, Cincinnati — Lake Erie, Philadelphia — Western и других, имеется уже значительное количество подобных вагонов. Имеются также ультрабыстроходные вагоны в Германии и Италии. В СССР также поставлен на очередь вопрос о введении ультрабыстроходных поездов. Скорости при подобного рода поездах в настоящее время доводятся до 140—160 km/h, и это не является пределом.

Основная характеристика ультрабыстроходных вагонов следующая. Вагоны выполняются по типу возможно легких конструкций. Главным материалом служит алюминий и сталь с преобладанием легких штампованных деталей. Благодаря легкости вагонов воздействия их на путь получаются относительно безболезненными. Ввиду этого, в них можно не бояться низкого положения центра тяжести, благодаря чему вагон получает устойчивый ход без особых колебательных процессов и вихляния. Вагоны, как общее правило, выполняются с обтекаемыми лобовыми частями и гладкими полированными боковыми поверхностями. В качестве двигателей применяются быстроходные двигатели облегченного типа с удельным весом порядка 16 kg/kW_h при мощности на 1 t веса поезда около 11—14 kW_h. Управление поездом обычно автоматизируется.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

3. Электровозы.

Основные типы электровозов. Электровоз так же, как и вагон, можно представлять состоящим из кузова и ходовых частей. Главное назначение кузова—использование его для размещения в нем оборудования электровоза. Только незначительная часть кузова используется для кабинок машиниста и является, таким образом, помещением для обслуживающего персонала. Кузов электровоза, как общее правило, выполняется из металла.

В отношении ходовых частей электровозы, как и вагоны, разделяются на типы без поворотных тележек,—как говорят, на общей раме—и типы с поворотными тележками, имеющими нормально две или три оси. В одних конструкциях тележки связываются друг с другом шарнирными соединениями, в других же они являются независимыми. Очень часто, особенно при больших скоростях, помимо ведущих осей, электровозы имеют бегунки, назначение которых—улучшить ходовые качества локомотива. При наличии бегунковых осей локомотив вызывает мень-

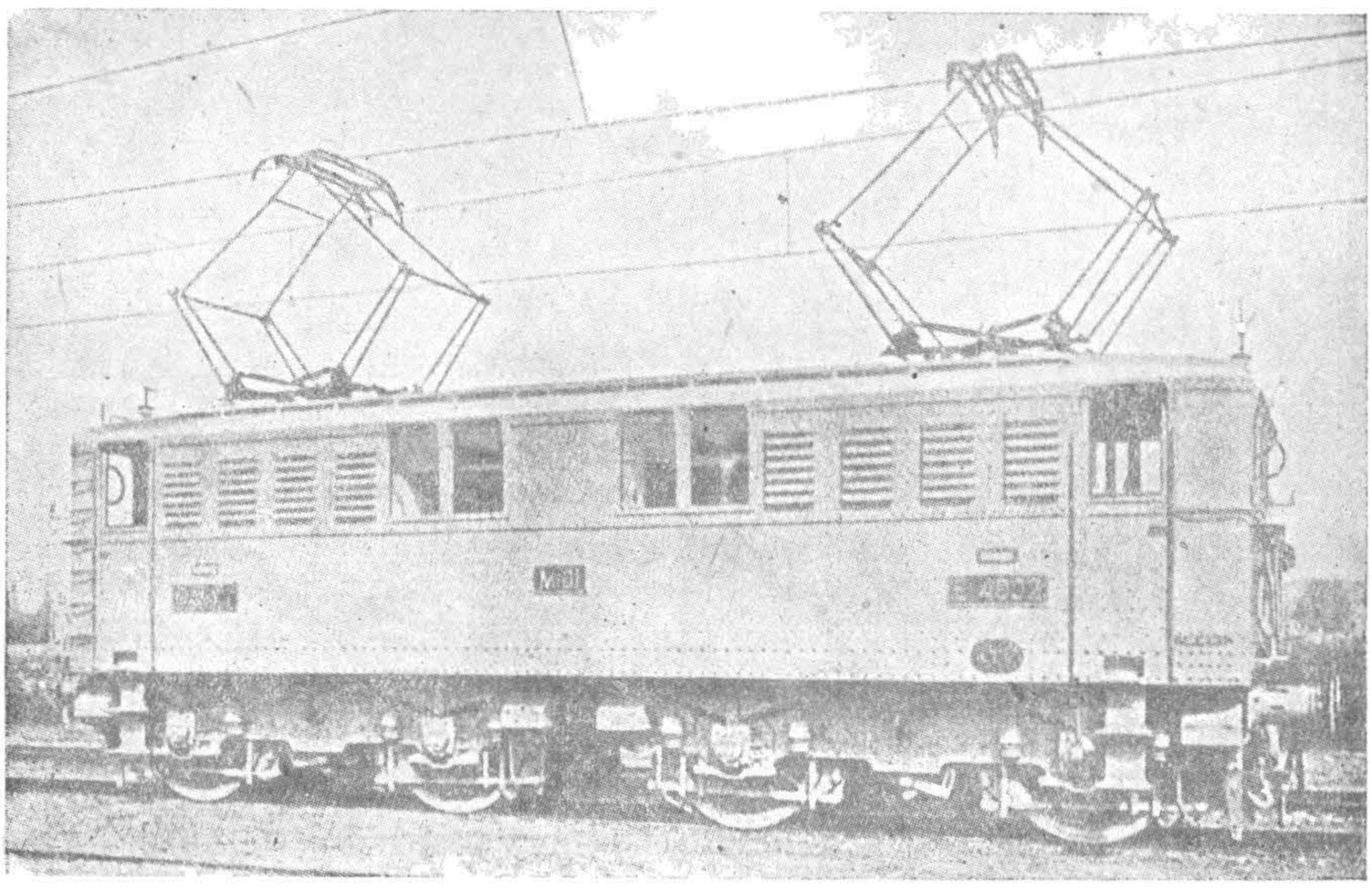


Рис. 485. Электровоз постоянного тока 1400 PS_h Южно-французской ж. д.

шие напряжения в рельсовом пути. Особенно важны бегунки при прохождении кривых, так как при них локомотив вписывается гораздо легче в кривые. Так, например, по опыту Митенвальденской железной дороги для электровоза с четырьмя спаренными осями на кривой с радиусом в 200 m удалось помощью бегунков понизить сопротивление движению больше чем в два раза.

Нужно иметь в виду, что иногда, особенно в однофазных и умформерных электровозах, бегунки приходится применять из-за условий размещения тяжести локомотива, не укладывающейся на ведущих осях. В отношении конструкции бегунки исполняются в виде или одноосных, или двухосных поворотных тележек.

Для характеристики типа локомотива принято его конструкцию характеризовать буквенными или числовыми выражениями. Наиболее распространенный метод—обозначать число ведущих осей буквами латинского алфавита. Если электровоз имеет четыре индивидуальные оси на одной раме, то формула его конструкции обозначается:

$$O — 4A — O.$$

В немецкой литературе, например, тот же тип электровоза принято характеризовать выражением:

$$O — D_o — O.$$

Если данный локомотив имеет четыре спаренные оси, то это выражение для характеристики его ходовых частей получает вид:

$$O — D — O.$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Локомотив с шестью ведущими осями, размещаемыми на двух трехосных тележках, и с индивидуальной передачей при наличии одного бегунка с одной стороны и двухосной бегунковой тележки с другой, получает формулу:

$$1 — 3A — 3A — 2.$$

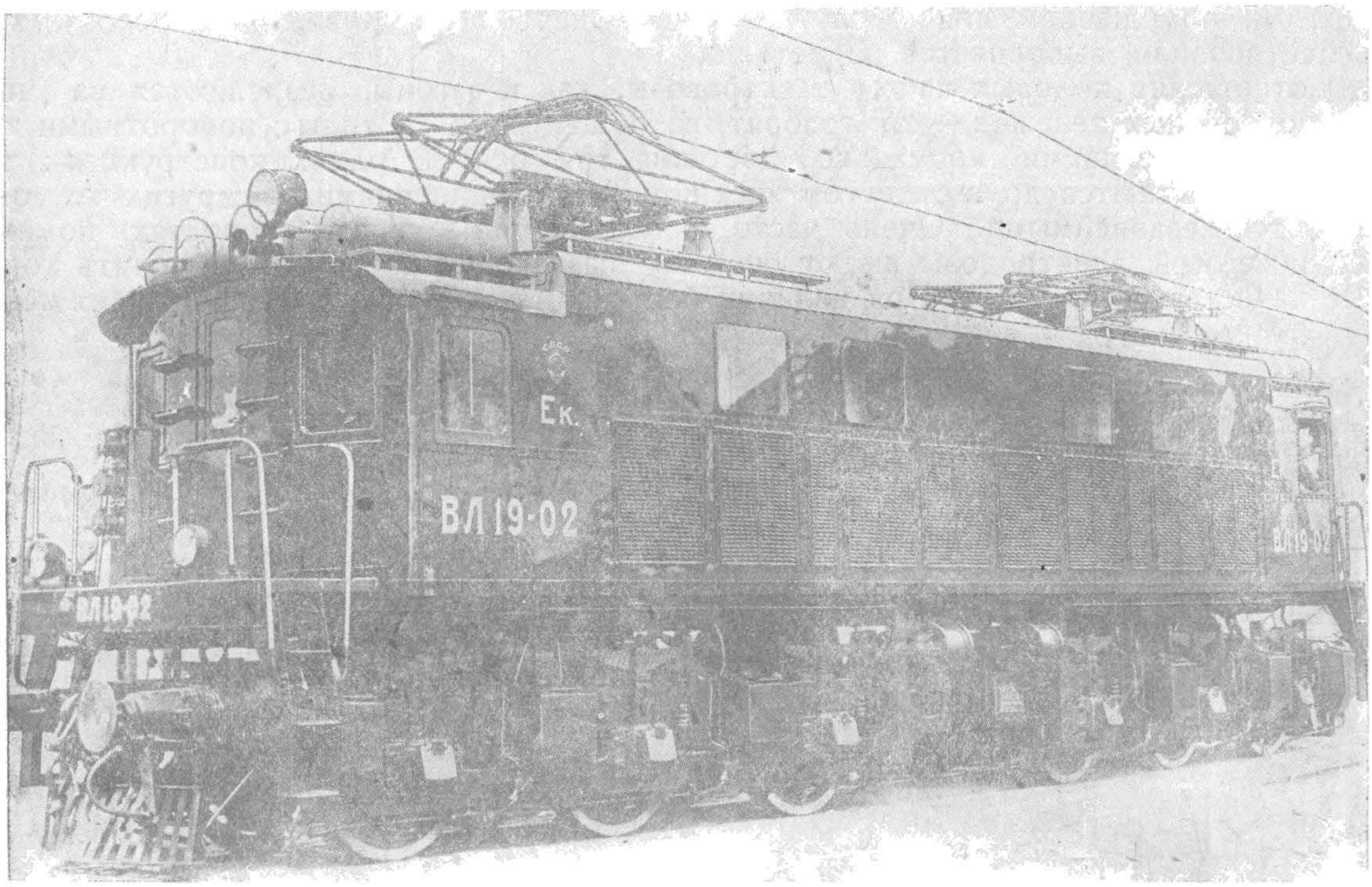


Рис. 486. Электровоз ж. д. СССР типа ВЛ 2 760 PS_h.

Если имеется локомотив, составленный из двух самостоятельных единиц, из коих каждая имеет по три спаренных оси и одному бегунку, то формула такого электровоза такова:

$$1 — C + C — 1.$$

В СССР очень часто число осей как ведущих, так и бегунковых, характеризуется соответствующими цифрами.

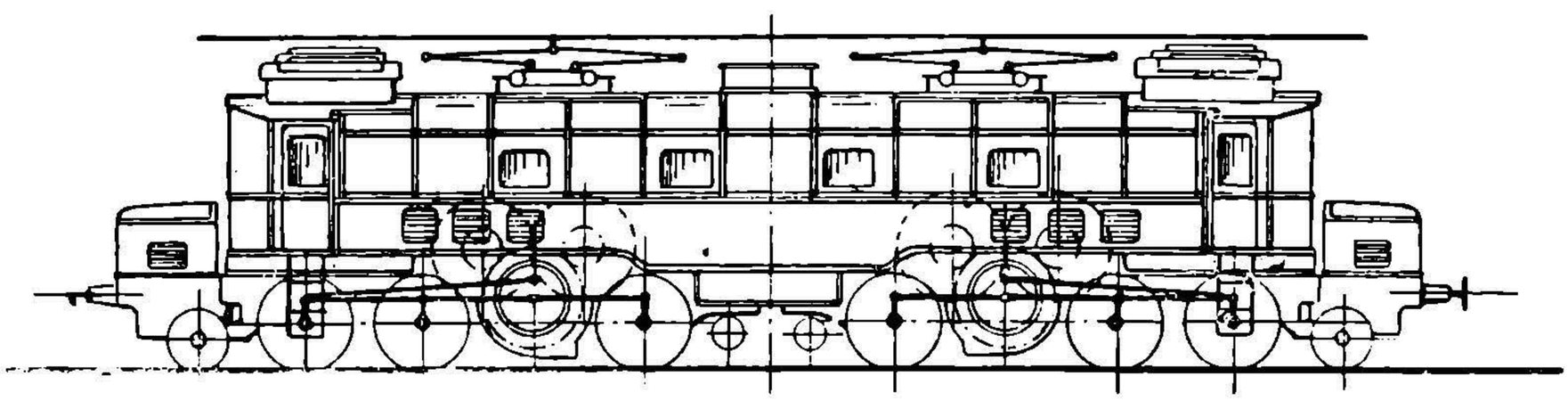


Рис. 487. Электровоз государственных швейцарских ж. д. 2 200 PS_h.

Чтобы дать представление о конструкции современных электровозов ниже приводятся основные их типы. На рис. 485 представлен электровоз товарного типа $O — 2A — 2A — O$ Южно-французских железных дорог мощностью в 1400 PS_h, при постоянном токе напряжения 1500 V.

На рис. 486 приведен локомотив дорог СССР отечественной постройки, товарного типа $O — 3A — 3A — O$, мощностью в 2760 PS_h при напряжении в 3000 V. В том и другом случае применены двигатели подвесноосевого типа.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Рис. 487 дает представление об одном из типов товарных электровозов 1—С—С—1 государственных швейцарских железных дорог с зубчато-рычажной передачей мощностью около 2000 PS_h однофазного тока на 15 000 V.

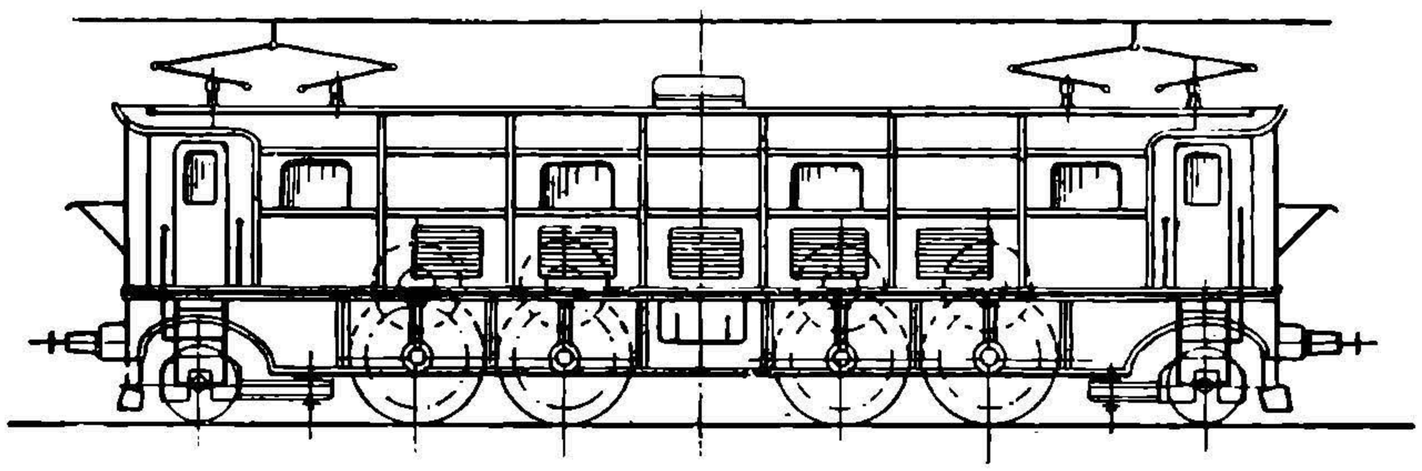


Рис. 488. Электровоз государственных германских ж. д. 3 100 PS_h.

Рис. 488 изображает пассажирский электровоз немецких железных дорог с полым валом типа 1—4А—1 мощностью в 3 100 PS_h для однофазного тока напряжением 16 000 V

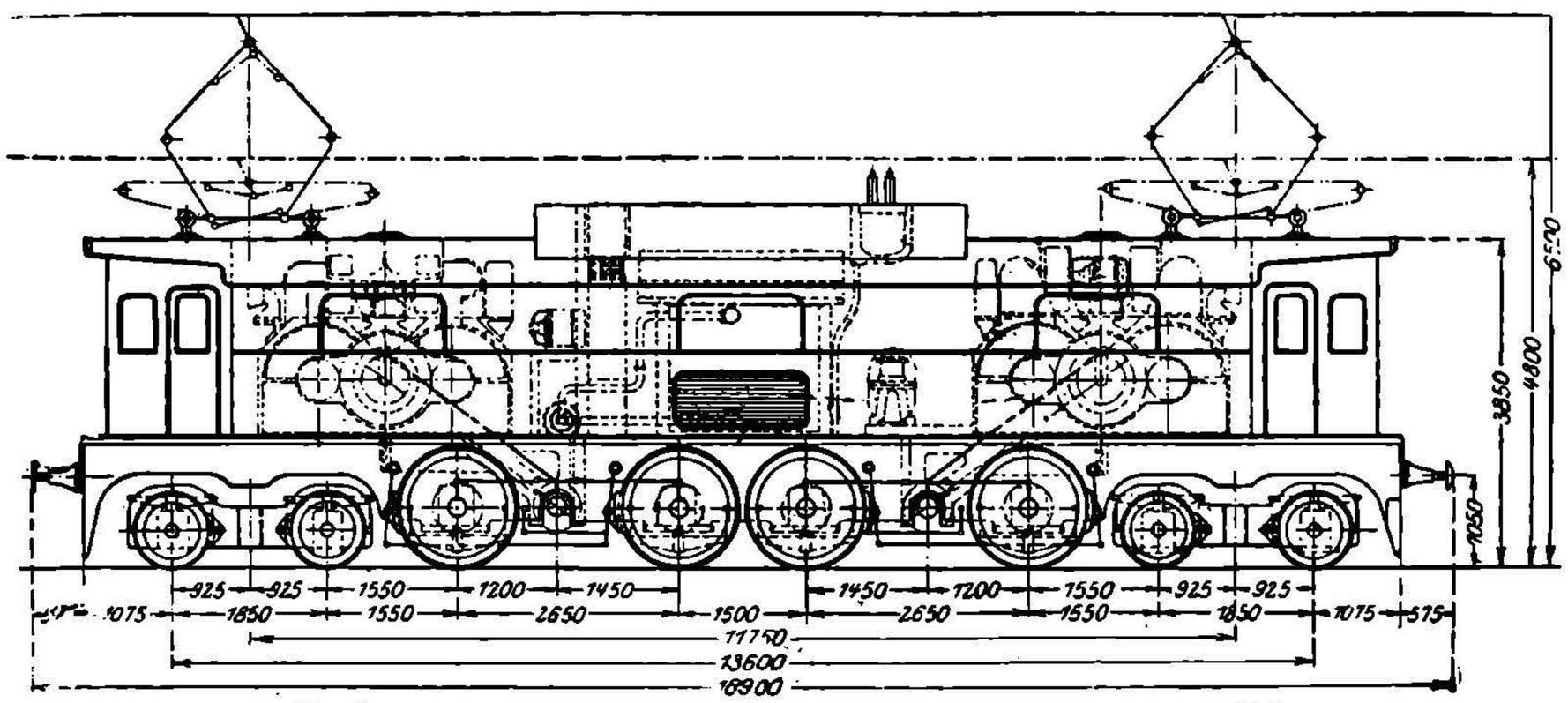


Рис. 489. Электровоз государственных германских ж. д. 2 550PS_h.

На рис. 489 представлен локомотив 2—В—В—2 однофазного тока германских железных дорог на 16 000 V с зубчато-рычажной передачей мощностью около

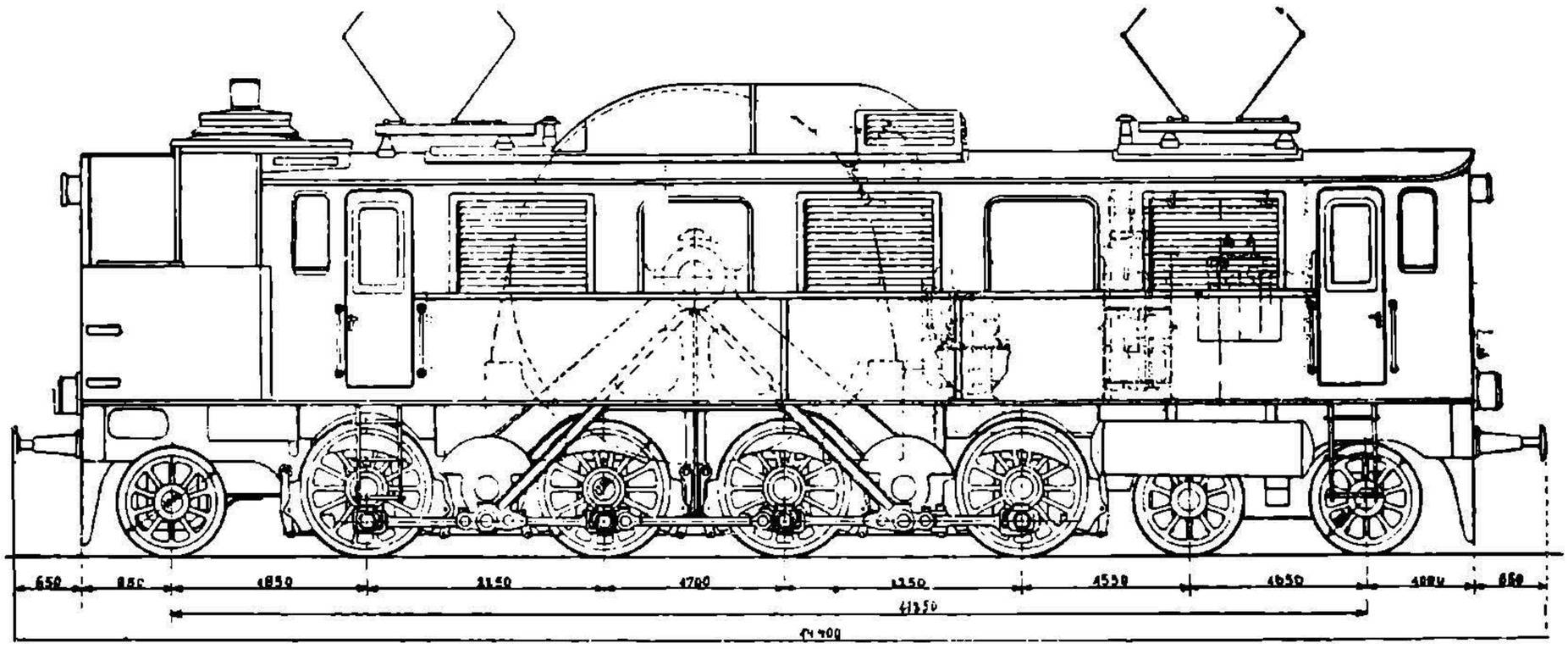


Рис. 490. Электровоз государственных германских ж. д. 3 000 PS_h завода Bergmann'a.

2550 PS_h для пассажирского движения горных дорог. Рис. 490 изображает локомотив 1—D—2 германских железных дорог однофазного тока на 16 000 V с рычажной передачей при рекордной мощности двигателя в 3000 PS_h. Электровоз предназначается для пассажирского движения

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Электровоз, изображенный на рис. 491, дает понятие о трехфазных локомотивах итальянских железных дорог. Локомотив—типа О—Е—О с рычажной передачей, общей мощностью в 2800 PS_h при напряжении в 3600 V.

Электровоз 1—С—С—1 швейцарских железных дорог (рис. 492) представляет оригинальную конструкцию в отношении кузова. Последний здесь состоит из трех частей. Боковые части кузова жестко связаны с рамами своих тележек, центральная же часть перекинута с одной тележки на другую и опирается на них свободно, давая возможность с помощью шкворней перемещаться кузову и тележкам по отношению друг к другу. Такой тип локомотива носит название арочного. Заслуживает здесь также внимания расположение кабинок для машинистов, помещенных не по концам локомотива, а в средней его части. Электровоз этот — однофазного тока с зубчато-рычажной передачей, мощностью в 2200 PS_h.

Общий вид электровозов спаренного типа может дать электровоз 1—В—В—1+1—В—В—1 американской железной дороги Norfolk-Western (рис. 493). Электровоз оборудован по принципу американской расщепленной фазы с напряжением в контактном проводе 11000 V, при мощности в 3600 PS_h. Следует ука-

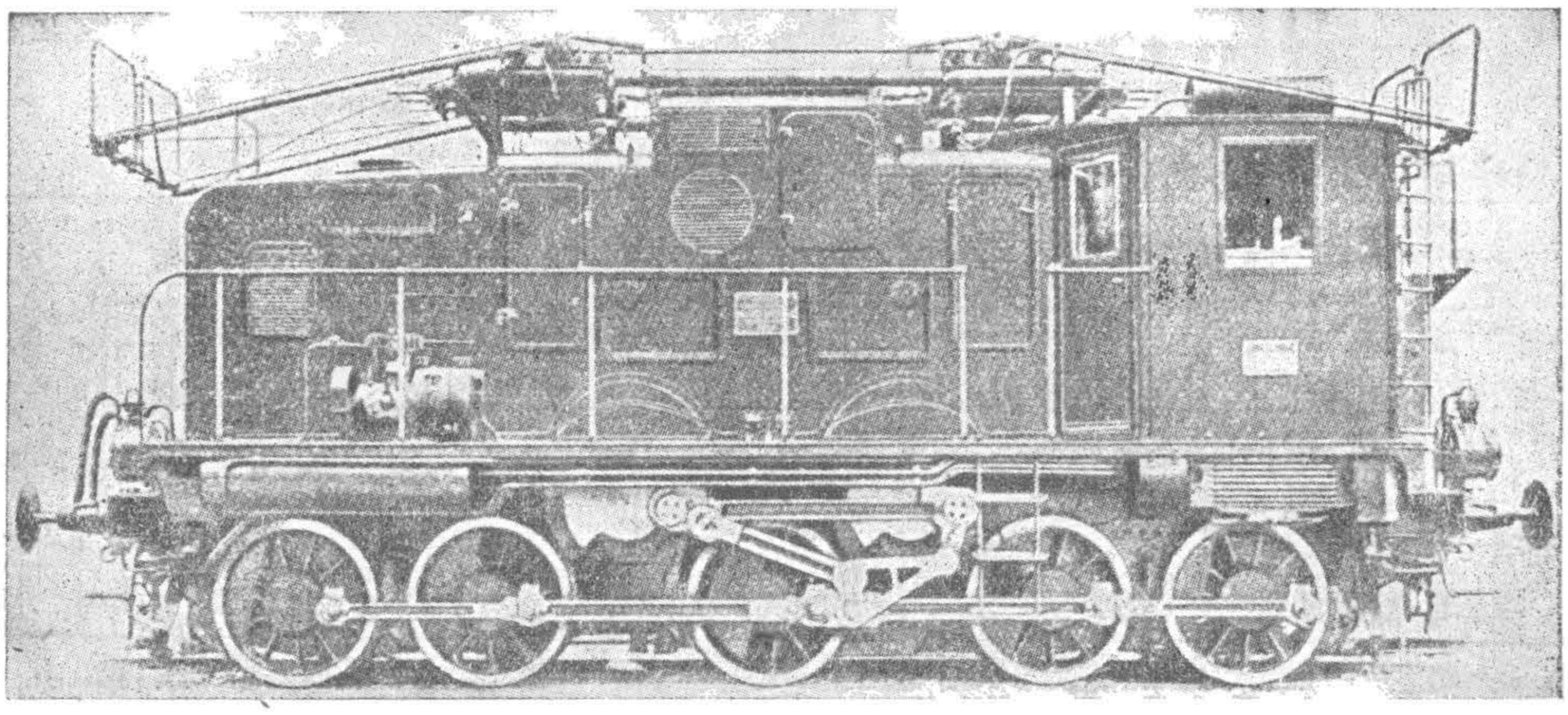


Рис. 491. Электровоз итальянских ж. д. 2800 PS_h.

зать, что принцип спаривания электровозов дает возможность пользоваться локомотивами не только в спаренном виде, но и по отдельности каждой единицей. Здесь можно применять, как и в моторвагонных поездах, управление по системе многих единиц.

На рис. 494 изображен сдвоенный восьмиосный локомотив 2—В—В+В—В—2 дороги Ch. M. St. P. R. мощностью в 3600 PS_h с напряжением постоянного тока 3000 V.

В некоторых случаях, при особенно тяжелой тяге, применяются строенные электровозы. Примером может служить американская железная дорога Virginia, где применяется строенный электровоз с расщепленной фазой, типа 1—В—В—1+1—В—В—1+1—В—В—1; общей мощностью в 7200 PS_h.

Оригинальную конструкцию имеют умформерные электровозы фордовской дороги Detroit—Toledo (рис. 495). Каждая электровозная единица состоит из двух частей, самостоятельных в ходовом отношении, но находящихся в постоянном соединении, причем одна половина электровоза несет умформер, а вторая — трансформатор, вентиляторы и компрессоры. Прочее оборудование частично размещается в той или другой части. В эксплоатации такой двухчленный электровоз спаривается с другим таким же, что дает шестнадцать ведущих осей при общей мощности в 4200 PS_h.

Понятие об умформерном электровозе типа Kando может дать электровоз венгерских железных дорог типа 1—D—1, предназначаемый для пассажирского движения, мощностью в 2500 PS_h (рис. 496).

На рис. 497 представлен маневровый электровоз дороги Ch. M. St. P. R., мощностью 600 PS_h, для постоянного тока напряжением 3000 V. В маневровых электровозах

НВ УДУНТ (ДІІТ)

характерно местоположение кабинки машиниста. Она находится в центре локомотива, так что машинист легко может маневрировать передним и задним ходом. Маневровые локомотивы чаще всего выполняются по типу О — 2А — 2А — О или О — — 3А — 3А — О. Характерною особенностью их является большая сила тяги при относительно небольших скоростях.

Особым типом электровозов являются электровозы промышленного назначения. Электрификация промышленного транспорта дает чрезвычайно большие преимущества, и потому электрическая тяга с каждым годом все сильнее и сильнее внедряется в самые разнообразные отрасли промышленности. На рис. 498 представлен электровоз для обслуживания заводской территории и связи с сортировочными станциями железных дорог, мощностью в 640 PS_h, при постоянном токе напря-

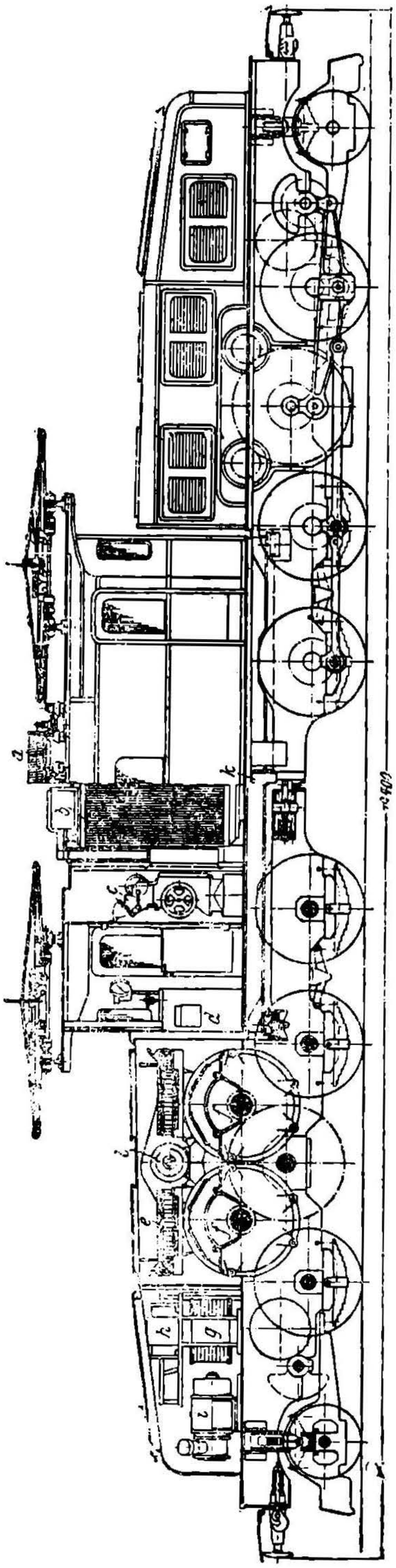


Рис. 492. Электровоз швейцарских ж. д. с расчлененным кузовом 2200 PS_h

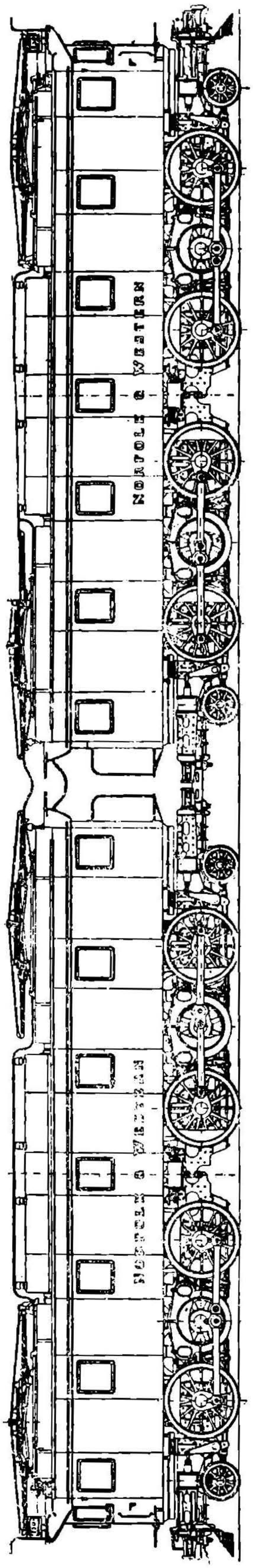
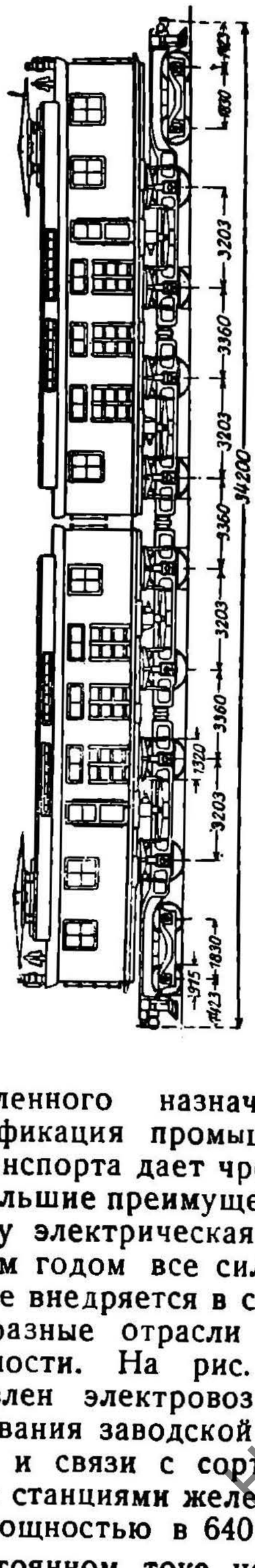


Рис. 493. Электровоз дороги Norfolk-Western 3600 PS_h.


1320
3203
3360
3203
3360
3203
3360

жения 2000 V. Локомотив по своим формам имеет много общего с маневровыми электровозами нормальных железных дорог. Такой же тип электровоза может служить и для надземных рудных разработок.

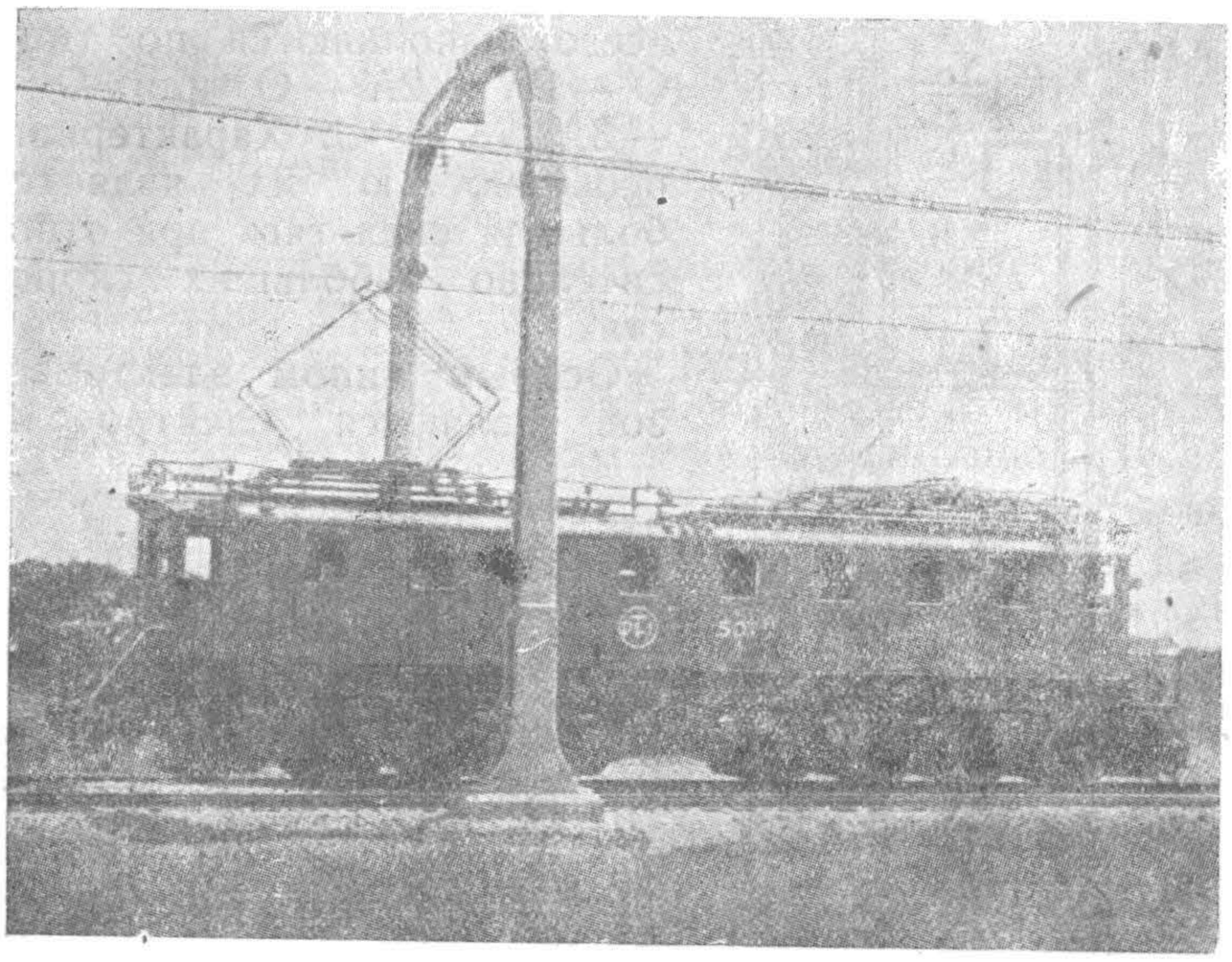


Рис. 495. Электровоз дороги D T. I. R. 2100 PS_h.

Для более мелких перевозок применяются двухосные электровозы или в редких случаях трехосные (рис. 499). В малых электровозах, выполняемых часто ввиду наличия кривых небольшого радиуса с очень небольшими осевыми базами, встречаются затруднения по размещению двигателей. В нормальных электровозах двигатели располагаются внутри тележки между осями. В промышленных же локомотивах приходится очень часто располагать их с внешней стороны или один с внешней, а другой с внутренней.

Большим разнообразием отличаются локомотивы для подземных разработок По условиям работы такие локомотивы должны быть преимущественно закрытого типа. На рис. 500 представлен локомотив для подземных разработок с верхним контактным проводом, а на рис. 501 — электровоз аккумуляторного типа, дающий в условиях шахтных работ наибольшие гарантии в отношении безопасности. Рис. 502 дает представление о сдвоенных подземных электровозах.

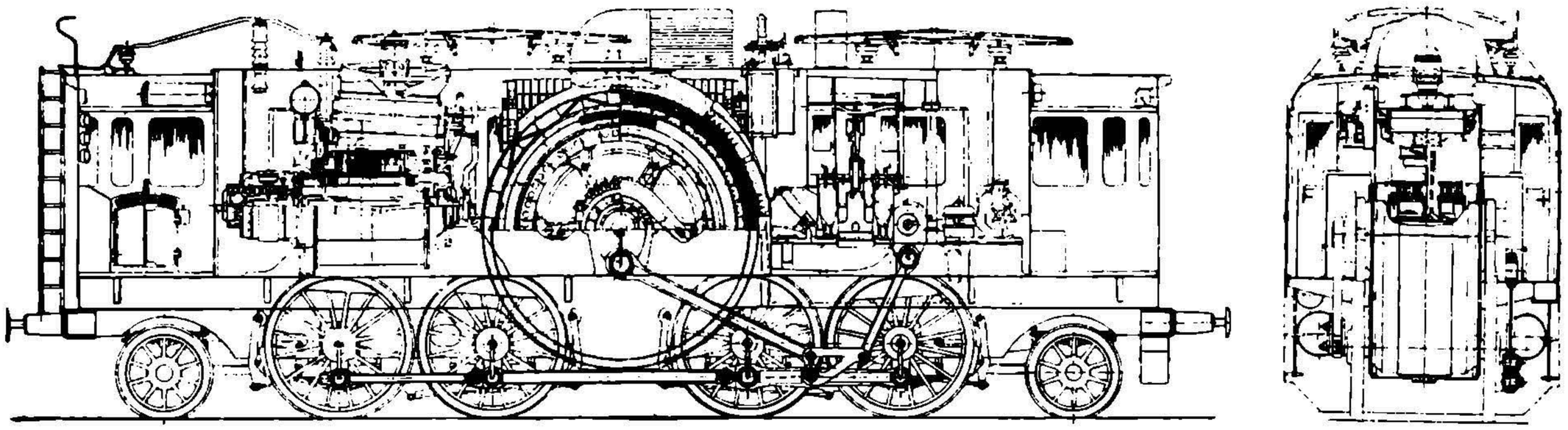


Рис. 496. Электровоз с фазным преобразователем Kando.

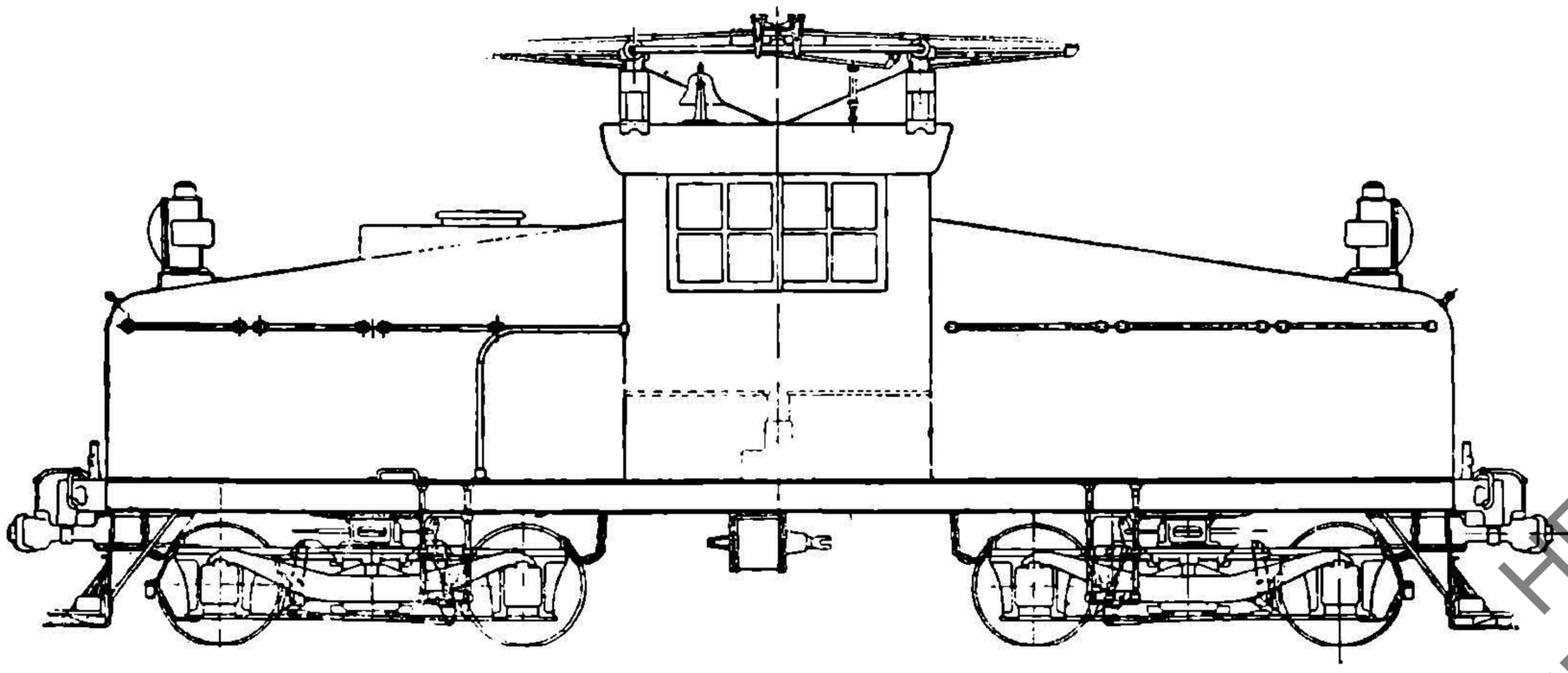


Рис. 497. Маневровый электровоз дороги Ch. M. St. P. R. 600 PS_h

НБ УДУНТ (ДІІТ)

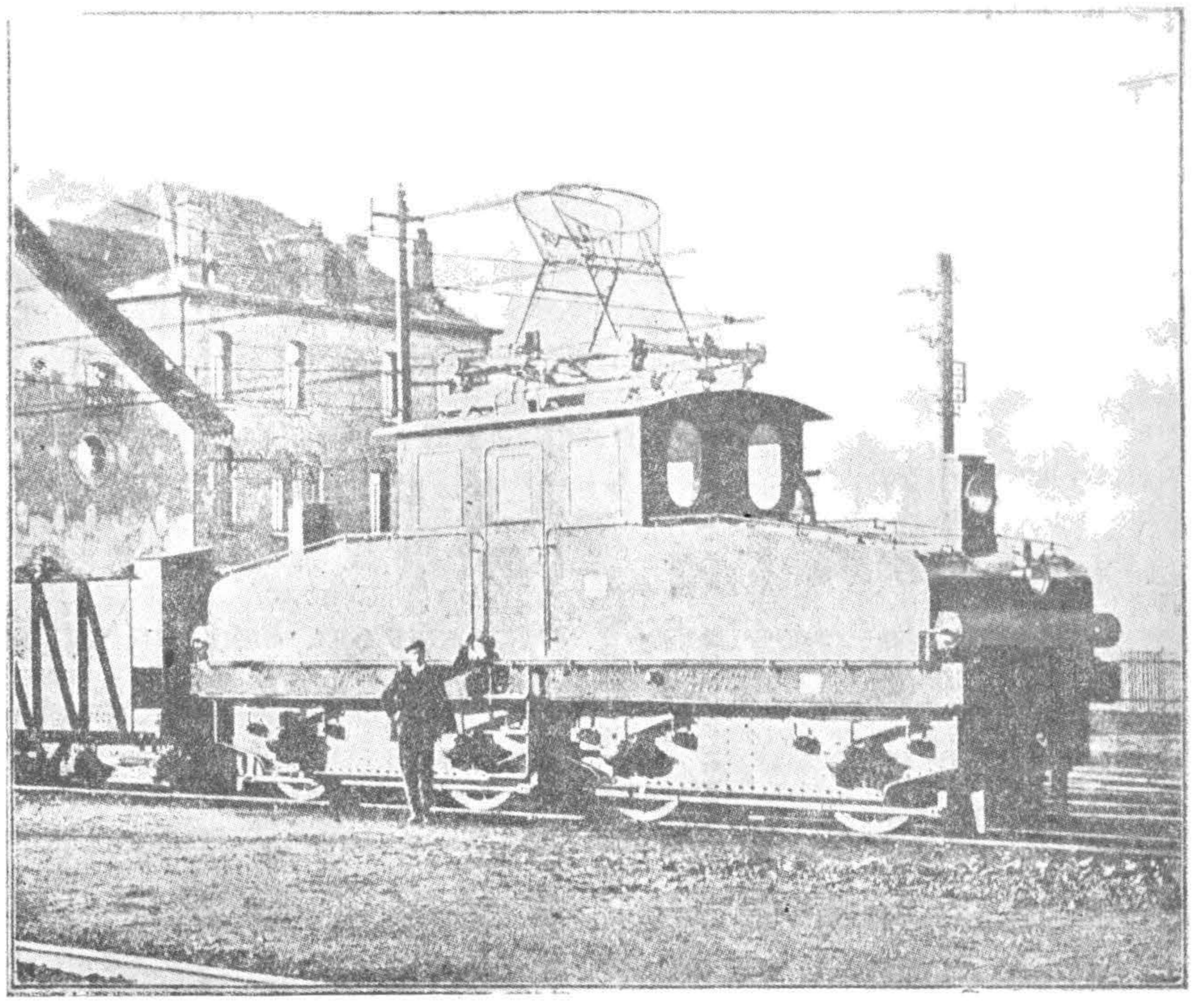


Рис. 498. Индустриальный электровоз 640 PS_h четырехосного типа.

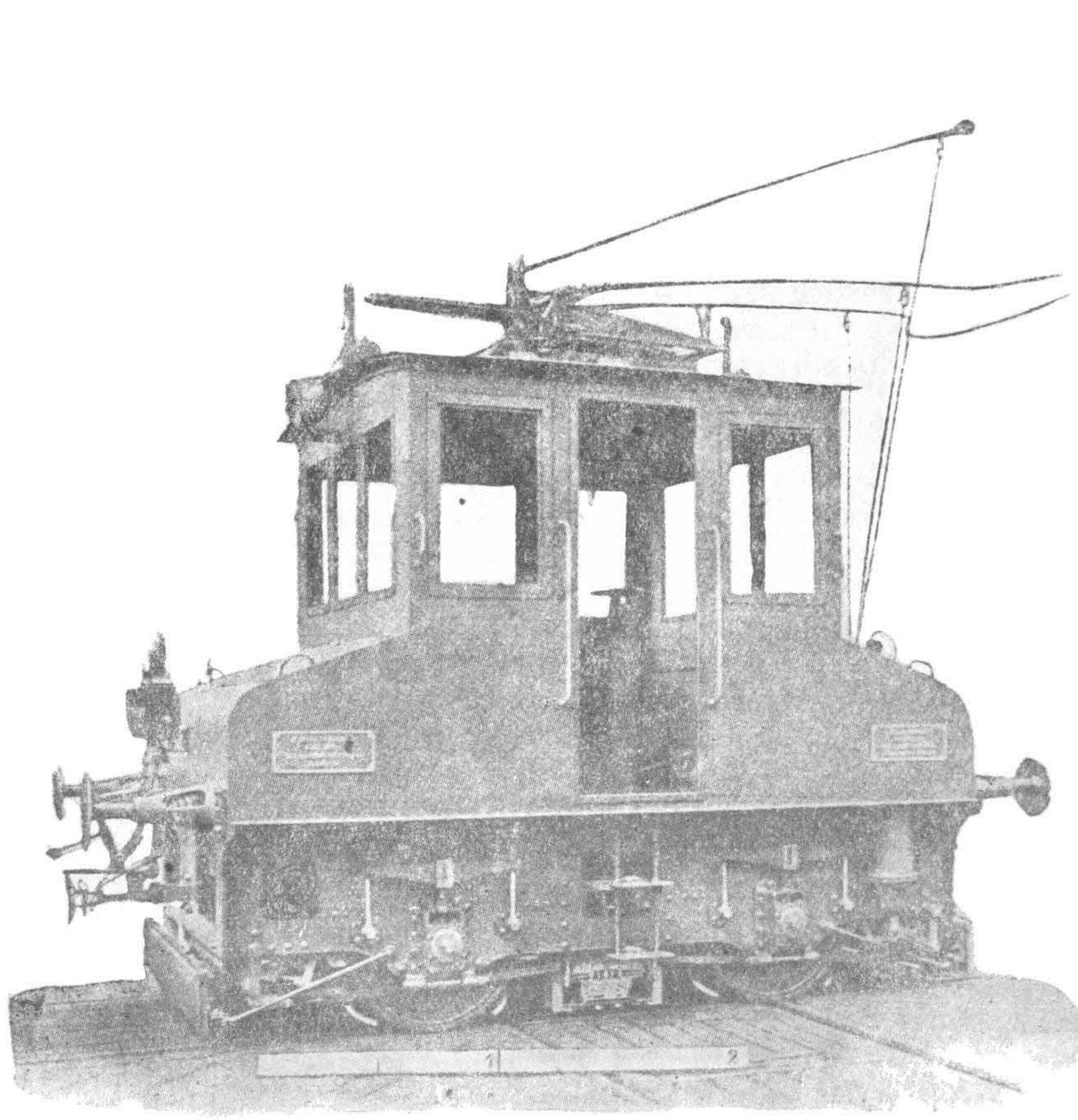


Рис. 499. Двухосный индустриальный электровоз 80 PS_h.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

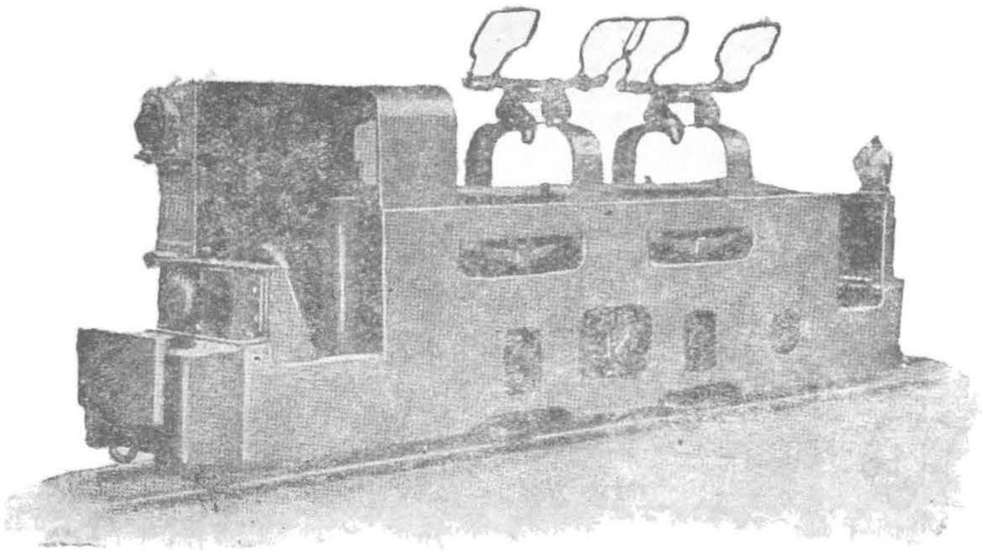


Рис. 500 Электровоз для подземной откатки с верхним контактным проводом.

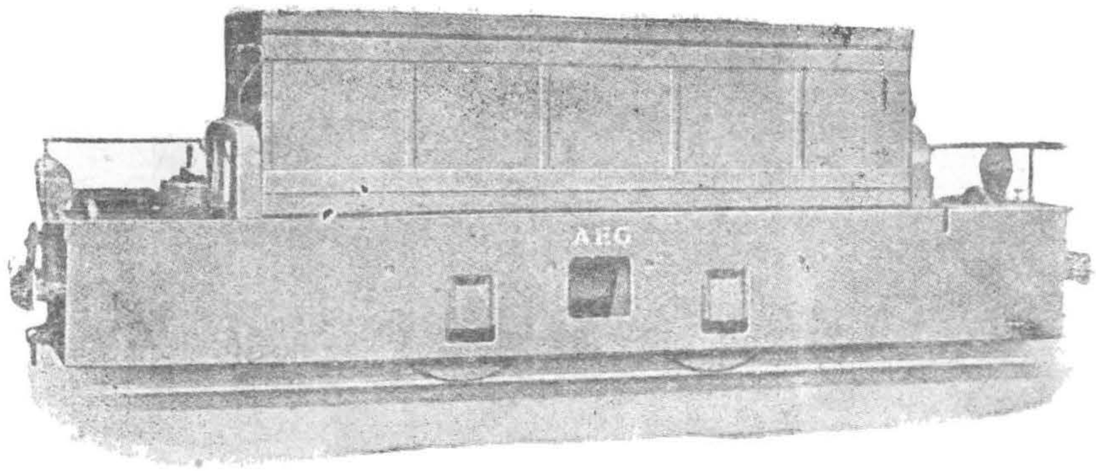


Рис. 501. Аккумуляторный электровоз для подземной откатки.

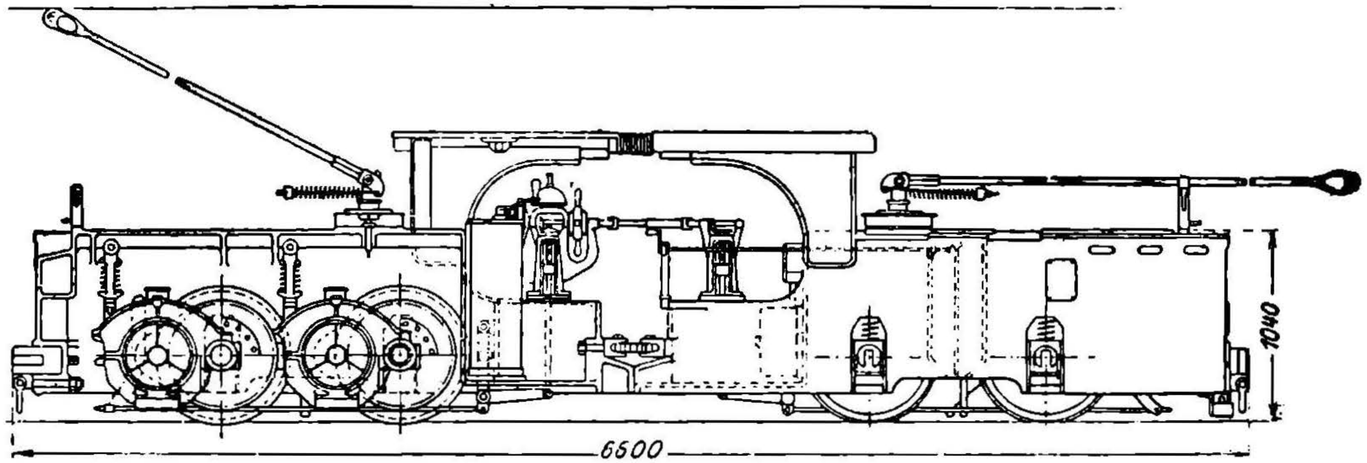


Рис. 502. Сдвоенный электровоз для подземной откатки.

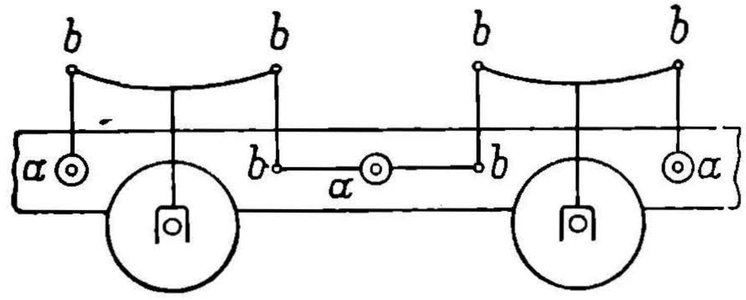


Рис. 503. Элемент балансирной связи между рессорами.

НБ УДУНТ (ДІТ)

Рессорная подвеска электровозов. Рессорная подвеска у электровозов так же, как у вагонов, имеет чрезвычайно важное значение. В большинстве случаев современные электровозы строятся с одним рядом рессор. Но существует целый ряд типов и с двухрядными системами. Таковы преимущественно электровозы на поворотных тележках, в которых поперечный брус, несущий пяту, иногда отделяется вторым рядом рессор от главной рамы, связанной с буксами первым их рядом.

Очень важен для работы электровозов вопрос о правильном распределении веса между отдельными ведущими осями. Вопрос этот сильно осложняется тем, что если даже в состоянии покоя вес надрессорной части локомотива правильно распределен между отдельными его осями, то при реализации движения, как уже было выяснено выше правильность эта нарушается, и одни оси получаются недогруженными, а другие перегруженными. В результате этого возможен сход недогруженных полускатов с рельсового пути, а также получается большая опасность от боксования ведущих полускатов.

Для улучшения ходовых и тяговых качеств в практике строительства электровозов теперь нормально прибегают к особым системам сопряженных рессор. Сущность этих систем в том, что рессоры работают не индивидуально, а в виде целой системы, построенной на шарнирных соединениях. Примером такого устройства может служить простейшая схема рис. 503. Здесь шарниры *a* связывают балансирную систему рычагов с рамой электровоза, а шарниры *b* связывают только отдельные звенья самой системы. С помощью этого устройства, путем подбора длин отдельных рычагов, можно прежде всего уравнять нагрузки на отдельные оси в состоянии покоя, а затем воспользоваться ею и для улучшения уравнивания нагрузок при реализации движения. Действительно, анализ работ рессор показывает, что всякая разгрузка одной из рессор каждой шарнирно соединенной системы вызывает в следующий же момент противодействующий эффект со стороны прочих рессор этой системы, в результате чего нагрузки отдельных осей автоматически находятся друг к другу в неизменном соотношении в соответствии с длинами плеч отдельных балансиров. Теоретически данная система, сколько бы она ни имела сопряженных шарнирно рессор, эквивалентна одной оси с одной точкой опоры, на которую неизменно приходится нагрузка, равная нагрузке, реально приходящейся на все шарнирно сопряженные оси. В соответствии с этим каждую подобную систему балансиров, независимо от того, состоит ли она из одной рессоры или из ряда рессор, соединенных шарнирно, можно считать системой с одной, так называемой фиктивной точкой опоры или точкой подвеса. При балансирной системе нагрузка на каждую шарнирно соединенную систему может меняться, но распределяться между осями данной системы она будет при равноплечих балансирах равномерно, а при балансирах с неодинаковыми плечами обратно пропорционально длине отдельных плеч.

Нужно иметь в виду, что все приведенные выше соображения в отношении работы индивидуальных рессор можно полностью отнести и к каждому отдельному сопряженному балансирами рессорному звену. Последний можно себе мыслить в виде одной эквивалентной ему по своему эффекту рессоры. Для оперирования вместо сложного звена с такой одной рессорой достаточно определить точку приложения ее нагрузки, названной выше фиктивной точкой подвеса, и затем установить фиктивную ее жесткость.

Легко сообразить, что искомая точка подвеса должна находиться на уровне положения шарниров балансиров *a* (рис. 503). Самое же место нахождения ее на линии этого уровня можно установить путем определения расстояния от любой произвольно взятой вертикальной оси по правилу моментов согласно выражению:

$$x_{\phi} = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} P_k x_k}{\sum_{k=1}^{k=n} P_k}, \qquad (477)$$

где x_k — расстояния точек приложения нагрузок отдельных рессор сопряженного звена от выбранной вертикальной оси и P_k — величины этих нагрузок.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Вторая искомая величина, жесткость эквивалентной рессоры, может быть определена из условия равенства между суммарной работой деформаций всех рессор сопрягаемого звена и работой деформации эквивалентной рессоры. Заметив, что работа при деформации рессоры определяется произведением из силы ее нагрузки P_k на величину ее деформации $\frac{P_k^0}{p_k}$, искомую фиктивную жесткость можно определить из следующих соотношений:

$$P_\phi \frac{P_\phi}{p_\phi} = \sum_{k=1}^{k=n} P_k \frac{P_k}{p_k}$$

или при $P_\phi = \sum_{k=1}^{k=n} P_k$:

$$p_\phi = \frac{\left(\sum_{k=1}^{k=n} P_k\right)^2}{\sum_{k=1}^{k=n} \frac{P_k^2}{p_k}} \qquad (478)$$

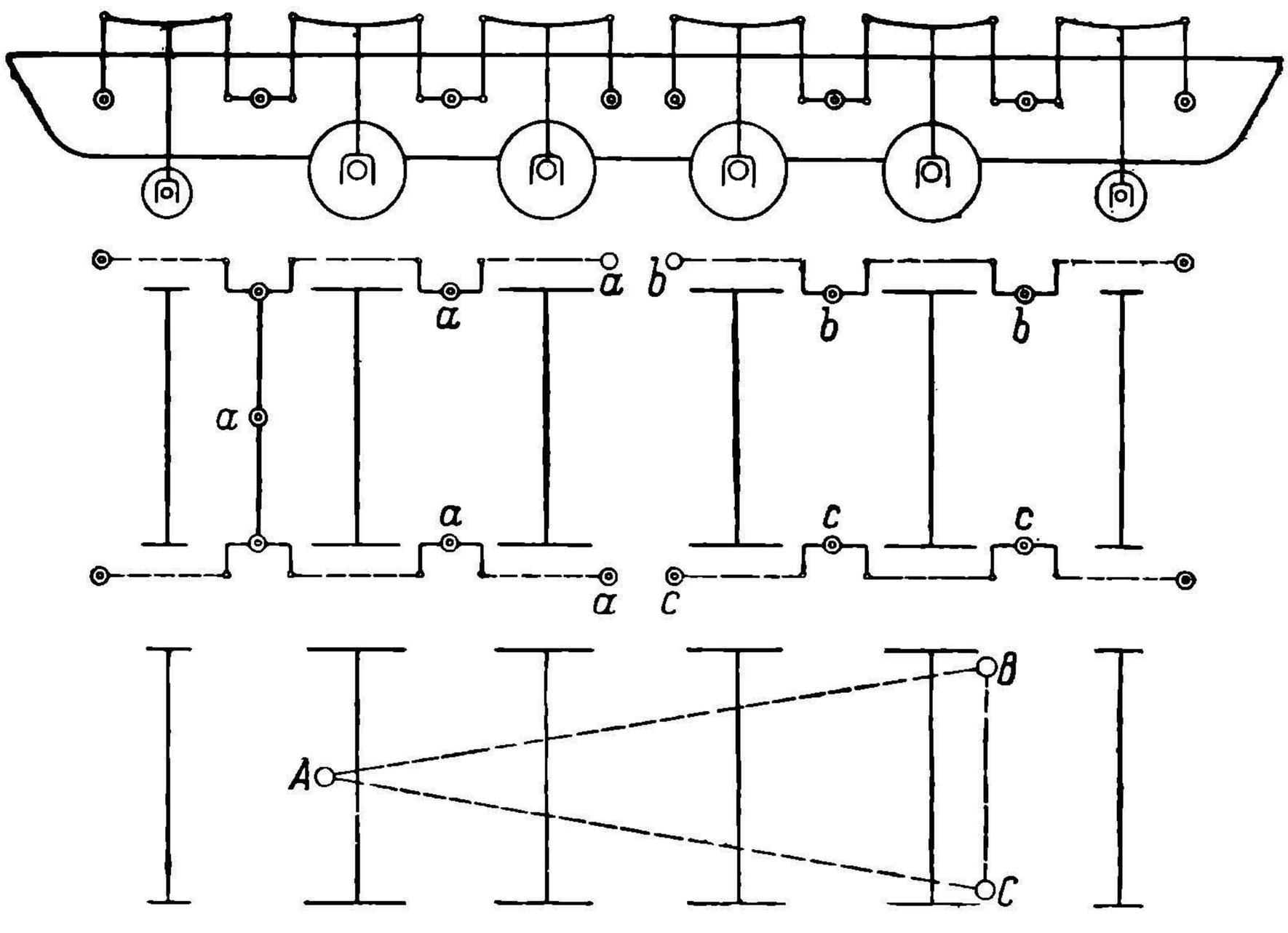


Рис. 504. Схема балансирной рессорной подвески электровоза в трех точках.

Естественно, что по условиям устойчивости невозможно обойтись только одной точкой опоры для всего надрессорного строения электровоза. Для того, чтобы устойчиво опереть надрессорное строение на оси, необходимо не меньше трех опорных точек, и притом расположенных так, чтобы отвес из центра тяжести надрессорного строения не выходил из пространства, ограниченного треугольником, вершинами которого служат указанные три опорные точки опоры. Для получения этих трех точек необходимо иметь три независимых системы сопряженных балансиров.

Система подвески с тремя опорными точками довольно сильно распространена в Америке. Примером ее может служить тип электровоза дороги N.C.R.R. (рис. 504).

НТБ УГУНТ (ДІІТ)

На схеме представлены три независимые системы балансиров. Первая, с шарнирами *aa,* состоит из двух продольных звеньев и одного поперечного звена с шарниром посредине. Две вторые системы являются продольными звеньями с шарнирами *b* и *c*. Фиктивные точки подвеса здесь нужно себе мыслить примерно в положении *A*, *B* и *C*.

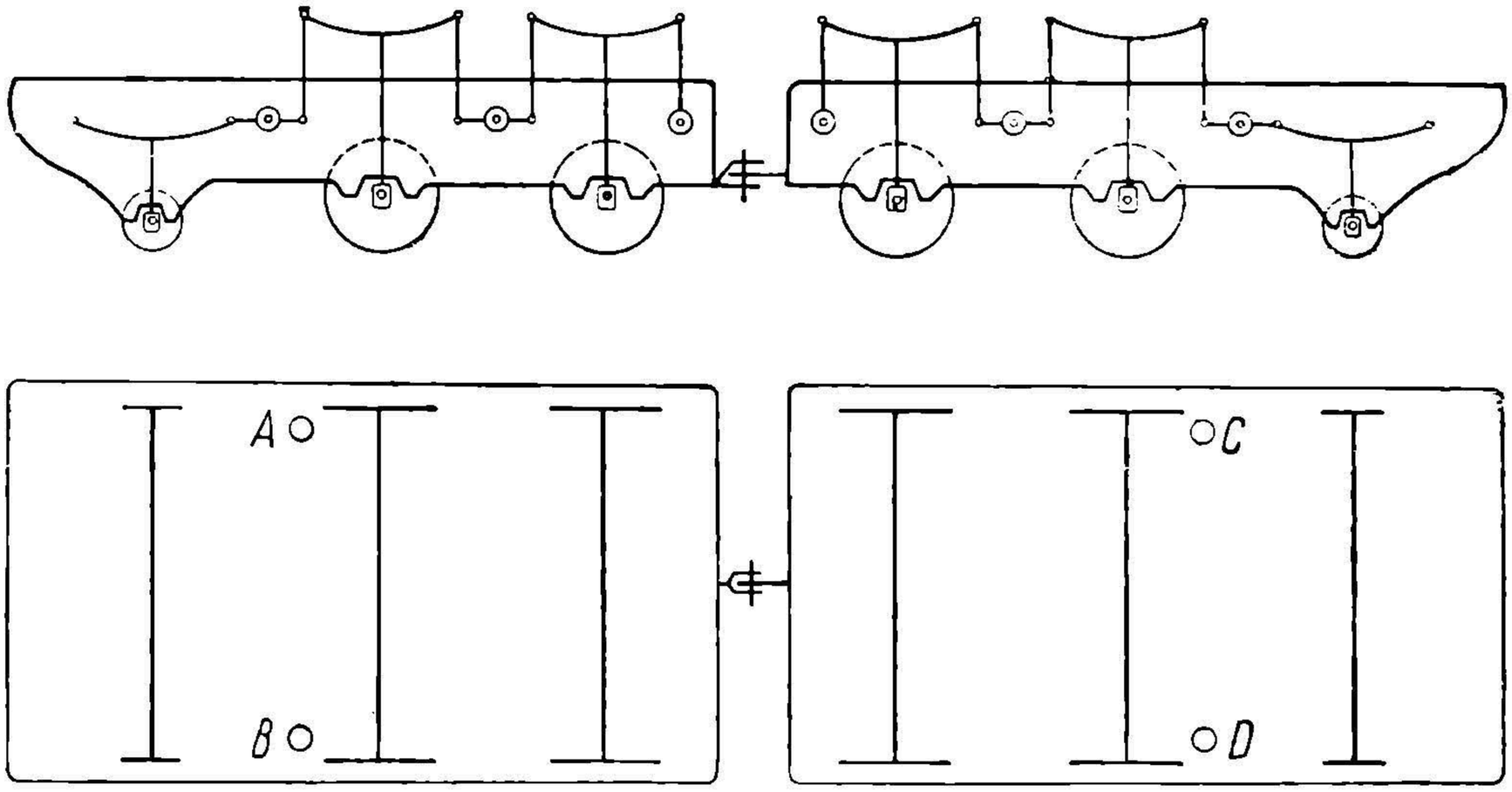


Рис. 505. Схема балансирной рессорной подвески в четырех точках.

Чем меньше точек опоры, тем более совершенно распределяется нагрузка между отдельными осями, так как чем меньше опорных точек и чем больше отдельных осей, входящих в каждое уравновешенное звено, тем менее чувствительно для осей местное, находящееся в пределах этого звена, перераспределение нагрузок между отдельными элементами надрессорного строения. Однако, из-за устойчивости в большинстве типов электровозов отмечается тенденция к большему количеству опорных точек, чем три. Очень значительно применение электровозов с четырьмя точками. Примером может служить электровоз дороги Paulista в Бразилии (рис. 505). Здесь имеются четыре независимых продольных звена, дающих четыре фиктивных точки подвеса *A*, *B*, *C* и *D*. В Европе подвеска с четырьмя точками опоры особенно широко применяется на немецких и швейцарских дорогах. Довольно часто, особенно в больших электровозах, прибегают к шести точкам опоры и нередко к восьми.

Применение правильно рассчитанных балансиров дает возможность во многих случаях значительно улучшить распределение нагрузок между отдельными осями.

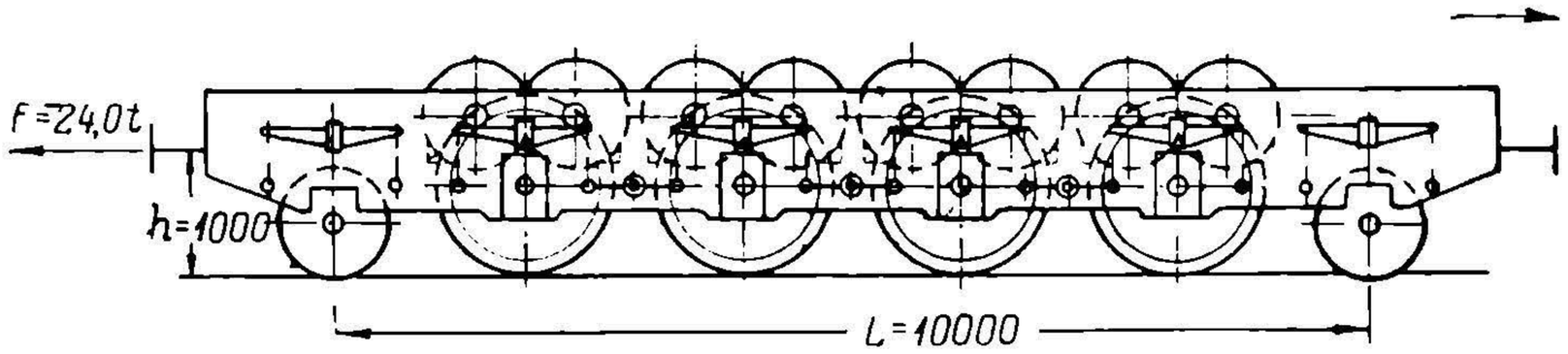


Рис. 506. Схема балансирного подвешивания электровоза 1—4А—1 с полым валом.

Примером может служить электровоз типа 1—4А—1 с полым валом Вестингауза (рис. 506). Как видно из схемы, здесь все ведущие оси соединены балансирами, представляя благодаря этому систему с фактическим вращением около одной центральной точки. Под действием опрокидывающего момента вся система рессор и балансиров так перемещается около этой точки, что отдельные ведущие оси, если пренебречь действием пружин самого передаточного механизма, не испытывают добавочных усилий, а весь опрокидывающий момент приходится на бегунки, разгружая по общему закону (419) передний и нагружая задний. Так как при данной передаче силы $S_{рел}$ и $S_{рес}$, как было отмечено, всегда взаимно компен-

НТБ УГУНТ (ДІІТ)

сируются, то при такой системе подвесок получается выравнивание нагрузок ведущих осей.

Значительно сложнее выравнить эти нагрузки при подвесноосевых двигателях. Как уже было выяснено, при них приходится считаться с появлением в неподрессоренной части сил $S_{рел}$ и в подрессоренной $S_{рес}$. Силы $S_{рел}$ и $S_{рес}$ получают различные знаки в зависимости от того, какое положение занимают двигатели по отношению к сопряженным с ними осям. Из рис. 415 и 416 следует, что при принятом нормальном расположении двигателей тот двигатель, который идет по движению впереди оси, дает добавочное давление на рельс $S_{рел}$. Второй же двигатель, идущий сзади оси, дает своему полускату разгрузку $-S_{рел}$. Если бы оба двигателя находились спереди или сзади своих осей, то от них обоих получались бы $S_{рел}$ одного знака. В первом случае давление на каждую из двух осей увеличилось бы на $S_{рел}$, а во втором уменьшилось бы на такую же величину.

В рассматриваемом случае (рис. 415 и 416), характерном для рессорной подвески вагонов, силы $S_{рел}$ и $S_{рес}$ взаимно компенсировались. Ввиду этого влияние двигателей на нагрузки отдельных осей исключалось.

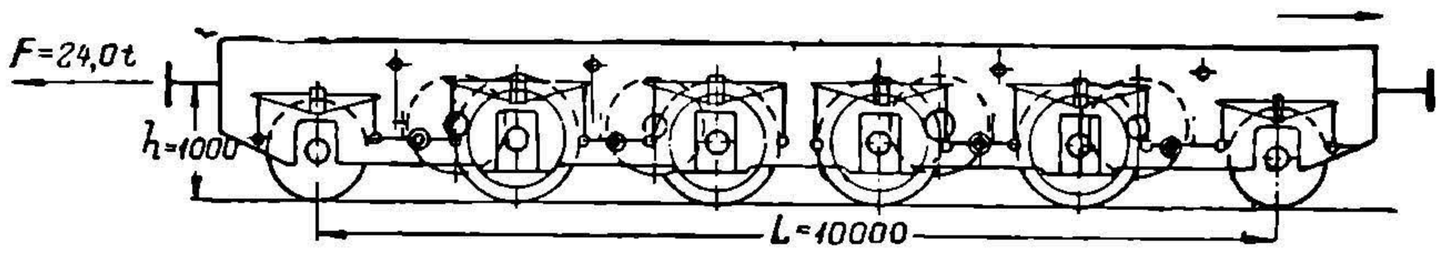


Рис. 507. Схема балансирного подвешивания и расположения подвесноосевых двигателей электровоза 1—4А—1.

Иная картина получается, если взять более сложную систему подвески. Рассмотрим, что происходит, если при системе подвесок, приведенной на рис. 506, электровоз оборудован подвесноосевыми двигателями, расположенными, как показано на рис. 507. При такой системе двигатели, находящиеся по движению впереди своих осей, дают на каждую из этих осей добавочную нагрузку $S_{рел}$, а идущие сзади на каждую из своих осей дают усилие $-S_{рел}$. Как уже было отмечено, силы $S_{рел}$ и $-S_{рел}$ без бегунков и балансиров при простейшей схеме типа схемы рис. 415 и 416 были бы компенсированы соответствующими силами $-S_{рес}$ и $S_{рес}$. При рассматриваемой системе эффект действия сил $S_{рел}$ и $-S_{рел}$, естественно, остается прежним, но результат действия сил $-S_{рес}$ и $S_{рес}$ получается иным. Они не могут в данном случае индивидуально уравновесить соответствующие им силы $-S_{рел}$ и $-S_{рел}$.

Причина этого лежит в том, что силы $S_{рес}$ и $S_{рес}$ действуют но все надрессорное строение. Ввиду этого действие их может сказаться не только на рессорах ведущих осей, но и на рессорах бегунков. Из анализируемой схемы подвески видно, что силы $-S_{рес}$ и силы $S_{рес}$ расположены симметрично по отношению к центральной поперечной оси электровоза и к фиктивной точке подвеса или то же к точке поворота балансирного элемента сопряженных четырех рессор. В рассматриваемой системе действие сил $-S_{рес}$ и $S_{рес}$ будет сводиться к опрокидывающей паре сил, причем последняя так же, как и пара сил от тягового усилия, воспринимается бегунковыми осями, не отражаясь на сопряженных балансирами ведущих осях. В этом случае нагрузка последних искажается только указанными выше силами $S_{рел}$ и $-S_{рел}$.

Если электровоз взять другого типа, например в виде представленного на рис. 507, картина получается иная. Здесь опрокидывающий момент от сил $-S_{рес}$ и $S_{рес}$, а также и от тягового усилия должен восприниматься не только бегунками, но и ведущими осями, так как те и другие входят в один балансирный элемент. При таком условии окончательное искажение нагрузки отдельных ведущих осей определяется результирующими усилиями от $S_{рел}$ и $-S_{рел}$, а также и от тех усилий, которые вызваны опрокидывающими моментами от сил $-S_{рес}$ и $S_{рес}$ и от тягового усилия.

При наличии балансирной системы рессорной подвески приходится особенно строго считаться с расположением тяговых двигателей. При рациональном их раз-

НБ УГУНТ (ДІТ)

мещении можно получить весьма благоприятное распределение нагрузок между отдельными осями даже в случае подвесноосевых двигателей. Примером может служить только что рассмотренная схема подвески электровоза (рис. 507), если для нее подобрать соответствующим образом длины отдельных рычагов балансирной системы.

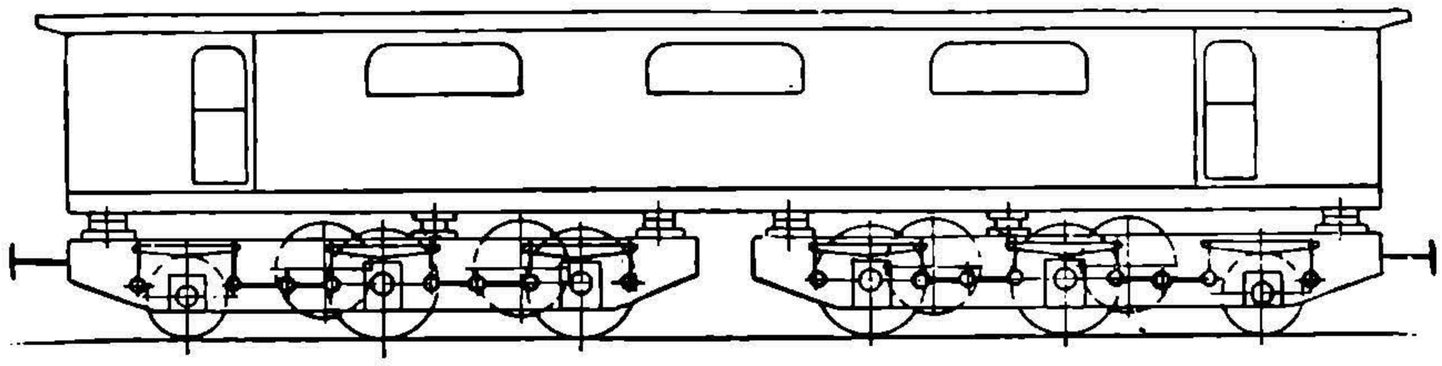


Рис. 508. Схема выравнивания нагрузок на ось электровоза 1—2А—2А—1 с помощью добавочных опорных поверхностей.

Здесь в каждый элемент балансиров, кроме двух ведущих осей, включено по одной бегунковой оси. Длины отдельных плеч балансиров подобраны таким образом, что усилия, являющиеся результатом наличия тягового усилия и сил $-S_{рес}$ и $S_{рес}$, распределяются между ведущими осями и бегунковой осью неодинаково. На ведущие оси из общего усилия, приходящегося на каждый данный элемент, отделяется такое усилие, которое, распределяясь поровну между обеими осями, уравновешивает соответствующие силы $S_{рел}$ или $-S_{рел}$. Благодаря этому нагрузка ведущих осей остается такой же, как и в статическом их состоянии. В данном частном случае она определяется в 20t. Силы $S_{рел}$ и $-S_{рел}$ здесь равны $+3$t и -3t, и таковы же по величине, но противоположны по знаку компенсирующие их усилия от опрокидывающих пар. Нагрузка бегунковых осей, воспринимающих на себя избыточный эффект опрокидывающих пар, здесь определяется для передней оси в 13,6t и задней—в 18,4t при статической нагрузке в 16t. Таким образом, в данном случае и при подвесноосевых двигателях коэфициент перераспределения сцепного веса, характеризующийся отношением нагрузки, приходящейся на наиболее разгруженную ось при реализации движения к нагрузке на нее в статическом состоянии, получается равным единице.

Последний пример показывает, что то или другое взаимное расположение подвесных двигателей имеет существеннейшее влияние на качество работы локомотива

Разобранные примеры относились к электровозам на общей раме. Гораздо труднее уравновешивать нагрузку при электровозах на тележках, так как здесь кузов и тележки не связаны жестко друг с другом, и потому создать одни и те же центральные точки вращения для кузова и тележек здесь очень трудно. Одним из решений этого вопроса может служить конструкция рис. 508. Здесь кузов, помимо шкворней, опирается на тележки еще с помощью расположенных по их концам

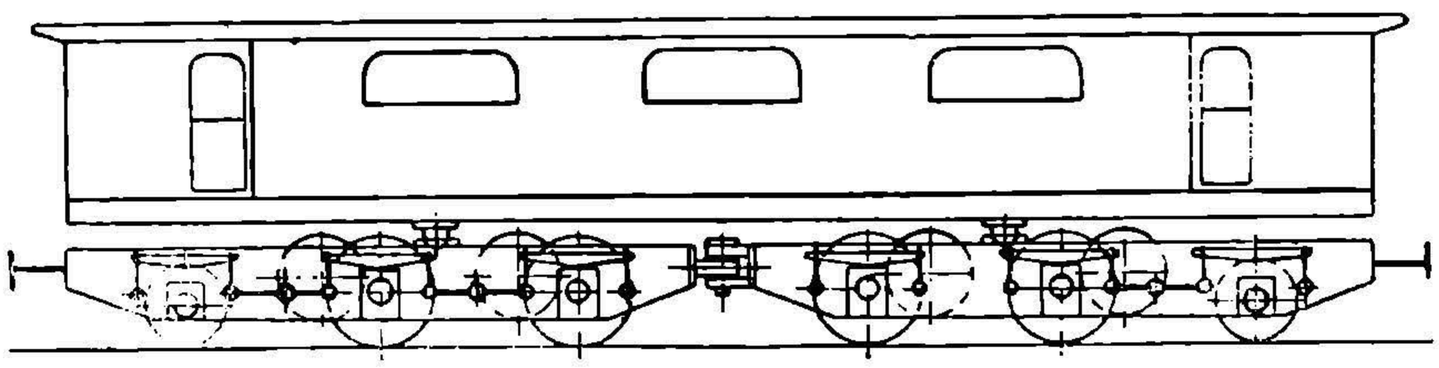


Рис. 509. Схема американской системы балансировки для выравнивания нагрузок на ось электровозов типа 1—2А—2А—1.

опор. Последние не препятствуют повороту тележек по отношению к кузову, но вместе с тем фиксируют вертикальные нагрузки кузова на тележки так, как это фактически имеет место при общей раме (рис. 507). В Америке такой же результат стремятся получить, применяя расположение шкворней и балансиров, указанное на рис. 509.

Следует, однако, иметь в виду, что во многих таких локомотивах, как, например 0 — 2А — 2А — 0, 0 — 3А — 3А — 0, 0 — 2А — 2А — 2А — 0, балансиры полностью ура-

НБ УГУНТ (ДІІТ)

внять нагрузки на оси не могут. В целях лучшего уравнивания нагрузок пытаются применять добавочные приспособления. В частности некоторую пользу, как было выше указано, может принести правильное расположение по высоте шарнирных сцепок между отдельными тележками и правильный выбор их системы (Л. 258) Довольно много в литературе теперь уделяется внимания специальным уравнителям, построенным на том принципе, что в нужный момент тем или другим способом нагрузка на определенные оси увеличивается или уменьшается. Одним из способов решения этой задачи является применение особых воздушных цилиндров с поршнями в качестве опор для кузова при передаче его веса на тележки. При подаче машинистом в отдельные цилиндры большего или меньшего количества воздуха поршни их соответственно воспринимают большую или меньшую нагрузку от кузова, передавая ее на тележки. Таким образом, путем регулирования нагрузок на отдельные элементы тележек удается выравнивать нагрузки отдельных осей (Л. 242).

Рамы электровозов. Рамы электровозов разделяются на внешние и внутренние. При первых буксы располагаются так же, как и в вагонах, на внешней стороне колес, а при вторых они находятся между колесами. С точки зрения компактности внутренние рамы заслуживают предпочтения. Они применяются в тех системах электровозов, где не требуется, по условиям расположения двигателей, значительной ширины по оси между колесами. Особенно удобны внутренние рамы при рычажных передачах, так как при них можно значительно укоротить длину

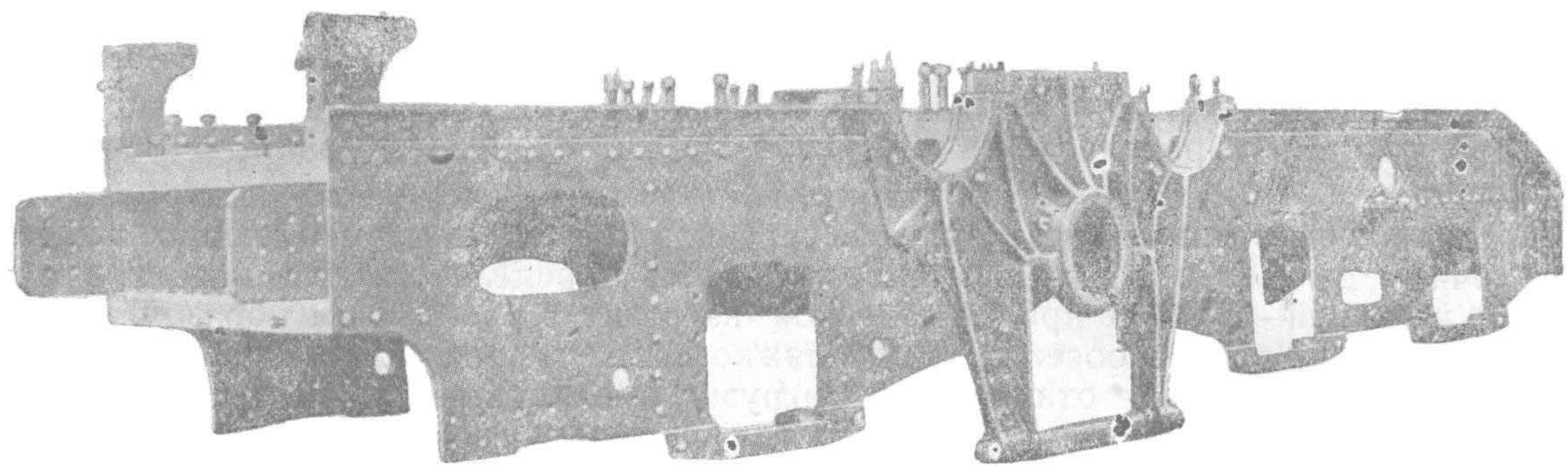


Рис. 510. Электровозная рама клепаного типа.

кривошипных пальцев передачи. Очень удобны они также и при зубчатой передаче с зубчатыми секторами Buchli. Что касается прочих систем индивидуальных передач, то при них приходится применять, как общее правило, внешние рамы, позволяющие располагать всем пространством между колесами для размещения двигателей. Кроме того, внешние рамы имеют некоторые преимущества в большей устойчивости и несколько большей плавности хода электровоза.

В отношении материала рамы электровозов разделяются на литые, листовые и брусковые. Литые рамы, благодаря отсутствию швов, стыков и простоте при них сборки имеют ряд положительных качеств. Однако, из-за сложности отливки они применяются относительно редко, и только в последнее время они начинают получать значительное распространение. В основе листовых рам лежат продольные листы железа толщиною от 18 до 35 mm (рис. 510). В некоторых случаях для усиления их в определенных местах, главным образом по верхней кромке, приклепываются уголки. Для придания жесткости раме приходится ставить сильные поперечные крепления, состоящие в большинстве случаев из клепаных систем. В тех случаях, когда буксовые вырезы существенно ослабляют листы, последние в этих местах усиливаются. Усиление производится применением специальной стяжки под буксой или же приклепыванием в районе буксового выреза добавочных листов или специальной фасонной отливки. Если оставшаяся высота под вырезом листа не меньше 460 mm, то по данным Sachs'a никакого специального усиления не требуется. Для облегчения рамы иногда делают в ней вырезы, с таким расчетом, чтобы не ослабить ее прочности по сравнению с наиболее слабыми у нее местами.

При рычажных и зубчато-рычажных передачах приходится применять рамы с отверстиями для отбойных и передаточных валов (рис. 511). Ввиду больших

НТБ УИИНТ (ДИТ)

напряжений в таких валах места этих отверстий приходится тщательно усиливать. При рычажных передачах, во избежание колебательных и резонансных процессов, необходимо иметь совершенно жесткую конструкцию, связывающую валы двигателей и отбойные валы, так как только при таких условиях можно более или менее зафиксировать точность сборки передаточного механизма. Отдельные части листовых рам соединяются заклепками или электрической сваркой.

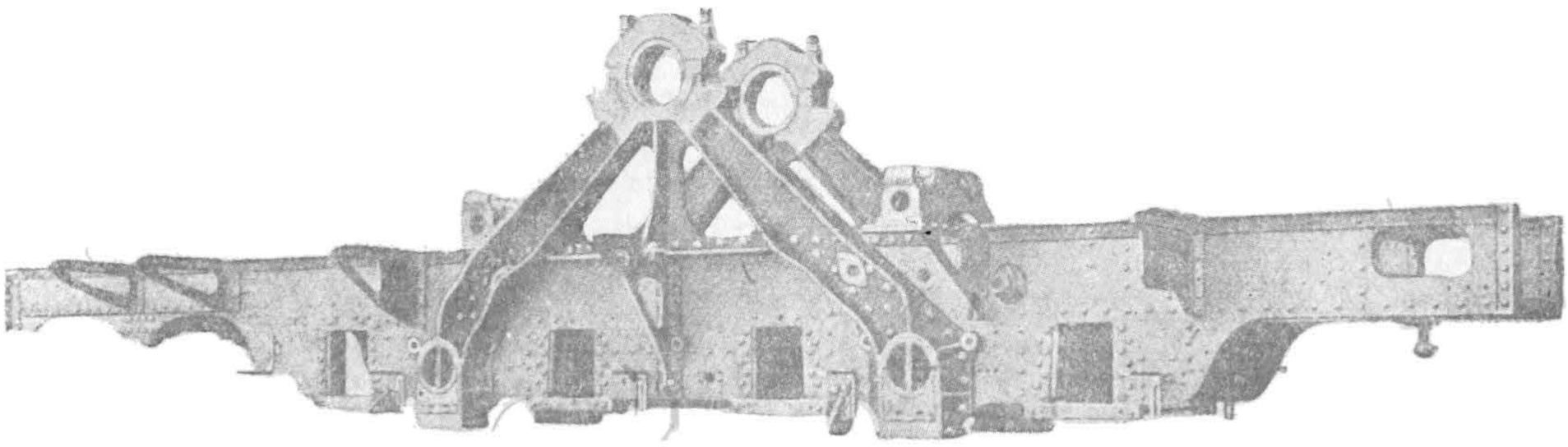


Рис. 511. Рама электровоза с высоко лежащим двигателем при рычажной передаче.

Большим распространением, особенно в Америке, пользуются брусковые рамы (рис. 512). Основа их состоит из массивных литых или кованых брусьев, идущих по высоте в два ряда и соединяемых друг с другом вертикальными стойками. Верхний брус идет непрерывно, нижний же имеет вырезы для букс. Все основные скрепления в брусковых рамах выполняются посредством сварки, так что вся рама представляет собою как бы одну решетчатую систему. Брусья рамы делаются чаще всего квадратного сечения, с размером сторон около 80—100 mm. Преимущество брусковых рам—в большой прочности отдельных брусьев, благодаря чему не требуется такого количества поперечных креплений, как при рамах листовых. В результате рама получается менее загроможденной, и на ней гораздо легче монтировать оборудование электровоза. Нужно указать, что в современных типах электровозов СССР применяются брусковые рамы. В последнее время у нас ставится вопрос о применении рам литых.

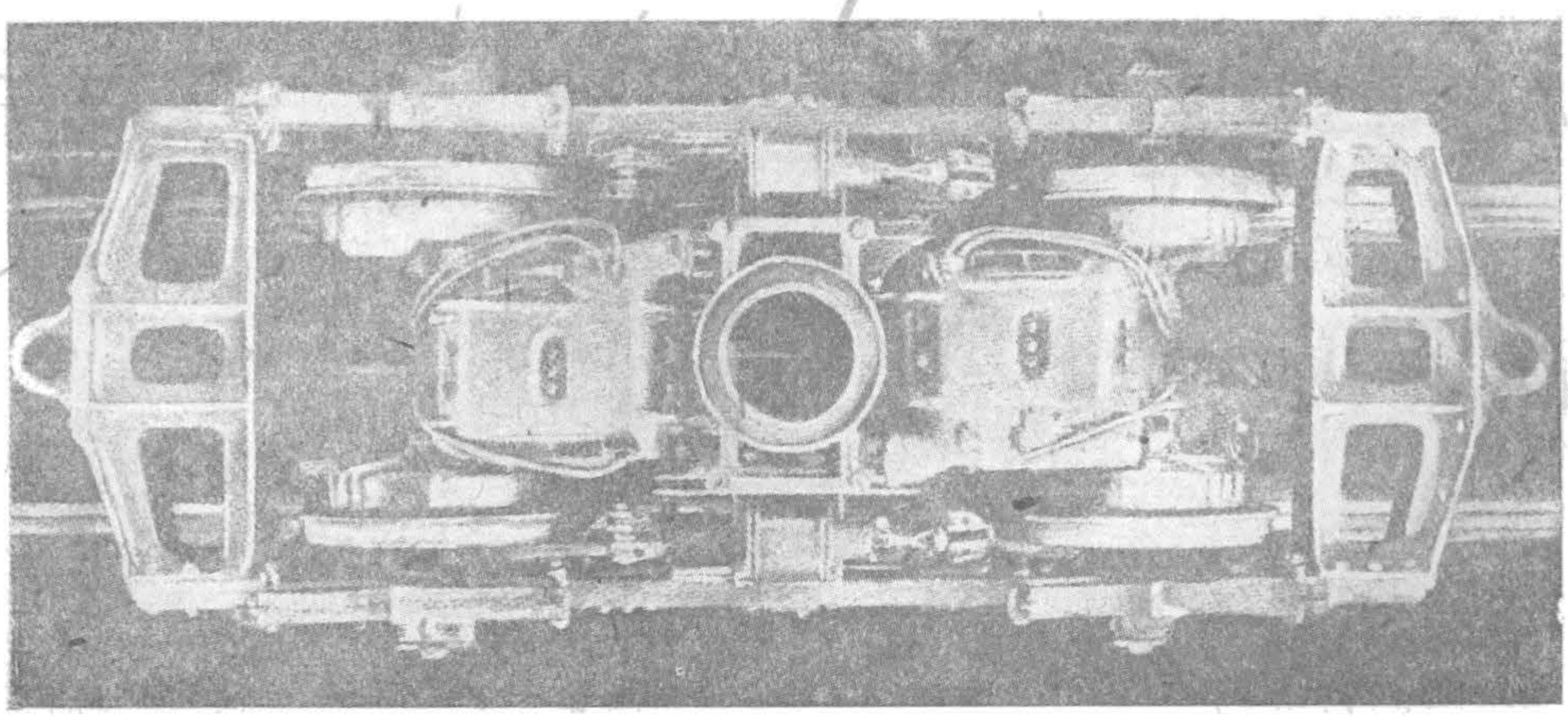


Рис. 512. Брусковая рама электровоза.

Средний тип между листовой и брусковой рамой занимает система вырезной рамы AEG (рис. 513). Она состоит из продольных массивных листовых боковин с вырезами, сделанными таким образом, чтобы по возможности не ослабить сечение и в то же время по возможности облегчить ее вес. Толщина листов боковин берется около 50 mm.

Для локомотивов небольшой мощности, в частности индустриальных, рамы допустимо делать более облегченного типа, приближаясь в этом отношении к вагонным рамам. Здесь возможно применение штампованых и клепаных систем.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Между рамами, общими для всего электровоза, и рамами отдельных поворотных тележек не наблюдается особого принципиального различия в отношений конструкции. Как те, так и другие выполняются по типу литых, листовых, и брусковых. Существенным отличием поворотных тележек является наличие шкворневого устройства Шкворни – пяты выполняются или по системе цилиндрических (рис. 512), или по системе шаровых. Примером последней системы, особенно широко

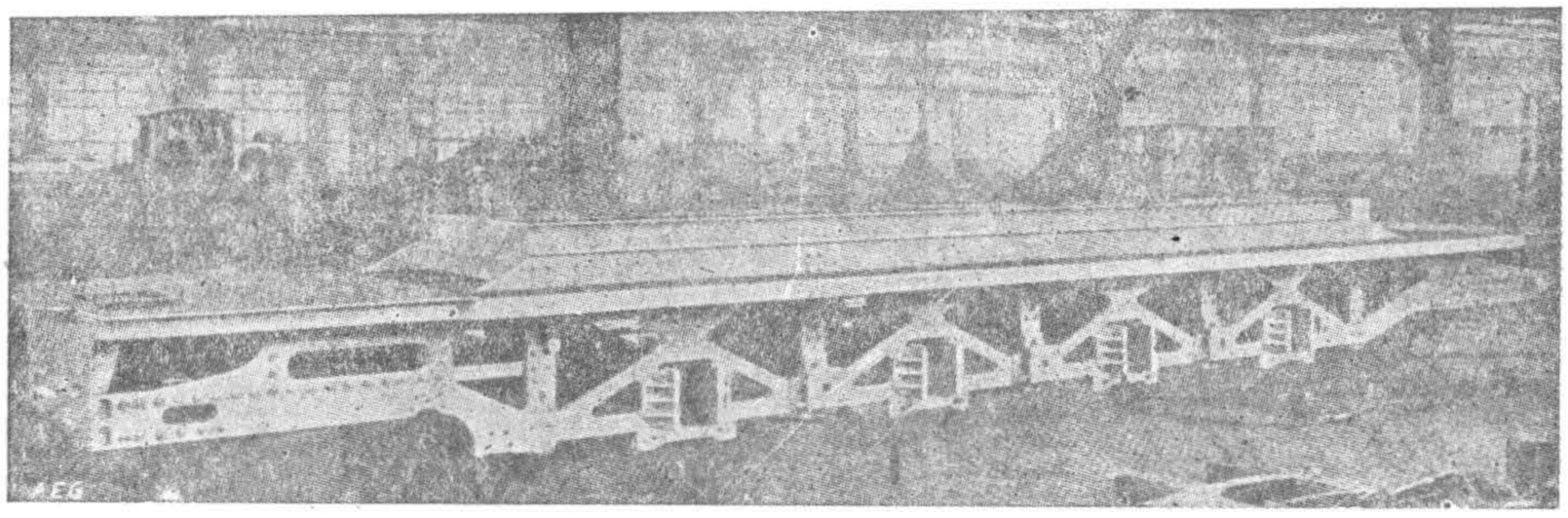


Рис. 513. Рама с листовыми вырезными боковинами.

применяемой в Европе, может служить шкворень одного из швейцарских электровозов (рис. 514) Шаровые шкворни, придавая большую эластичность связи тележек с кузовом, вместе с тем требуют особенно тщательной смазки. В некоторых случаях, для большей устойчивости кузова, применяются по бокам шкворней скользуны, рессорно соединенные с рамой тележки

Прикрепление тягово-буферных механизмов в электровозах с общей рамой производится обычно к специальным поперечинам, прочно скрепляемым с боковинами рамы. В поворотных тележках встречаются два вида крепления. В одном случае тягово-буферные механизмы крепятся к раме кузова, что требует большой прочности от последней, так как через нее передается главное тяговое усилие. Шкворни в этой конструкции также сильно напрягаются, так как через них сила тяги передается на раму кузова. Во втором случае тяговые приборы крепятся к раме тележек, причем последние должны иметь шарнирное соединение друг с другом. При такой

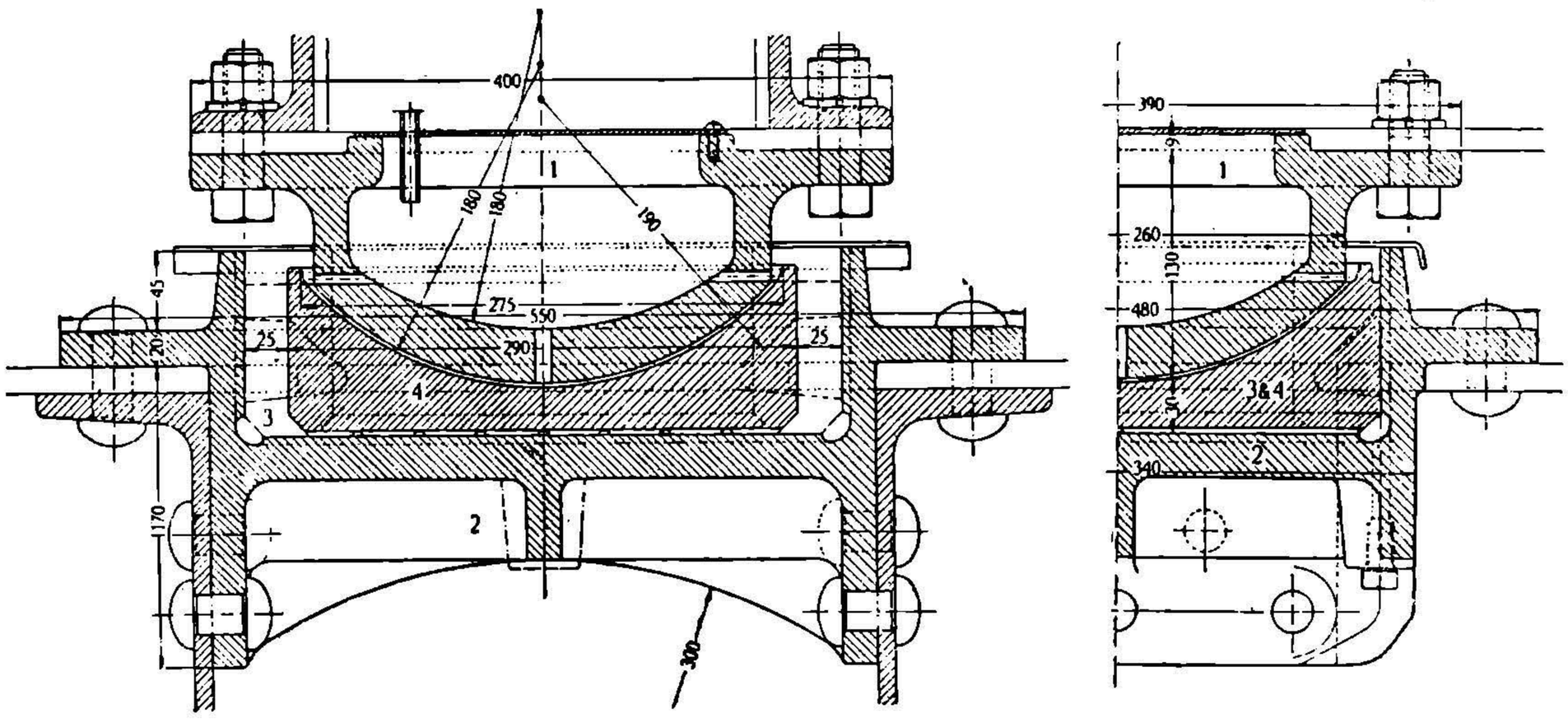


Рис. 514. Шкворень-пята сферического типа электровоза 1—Б—В—1.

конструкции рама кузова и шкворни разгружаются, но зато тележки несколько теряют в эластичности своего вращения В тяжелых электровозах доминирует вторая система, так как при ней можно выиграть довольно много в весе локомотива. Междутележечная сцепка — ответственная часть электровозов. Как уже было выяснено выше, тип ее конструкции и высота ее положения может оказать значительное влияние на коэфициент использования сцепного веса. Кроме того, она суще-

НВ УДУНТ (ДІІТ)

ственно влияет на ходовые качества электровоза вообще и, в частности, особенно при движении на кривых Значительными преимуществами обладают между тележечные сцепки, в которых соприкосновение тележек друг с другом в горизонтальной плоскости происходит не жестко, а через пружинное звено. Благодаря последнему из-за эластичной связи между тележками значительно облегчается прохождение электровоза на кривых и вместе с тем из-за смягчения ударных эффектов между тележками улучшается процесс движения на прямой. Примером такой сцепки может служить сцепка электровоза СССР типа ВЛ.

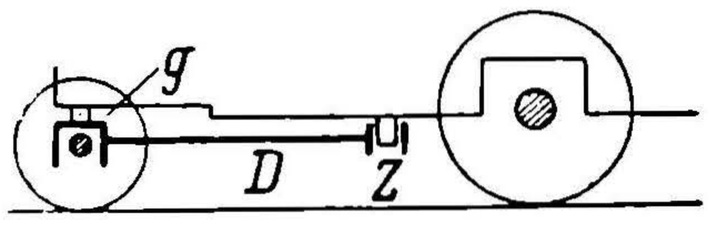


Рис. 515. Схема биссельной одноосной тележки.

Бегунки и бегунковые тележки. Как уже было указано, для лучшего вписывания электровоза в кривые, а также для ослабления воздействий на путь вообще, очень часто, особенно у быстроходных электровозов, применяются бегунковые приспособления. Наиболее часто на практике встречается применение биссельной одноосной тележки. Конструктивных вариантов бисселей имеется большое количество. Идея их сводится (рис. 515) к вращению бегунковой одноосной тележки *D* около шкворня *Z*, имеющего опору в главной раме локомотива, причем последняя в свою очередь опирается на биссельную ось с помощью шкворневого устройства *g*, позволяющего бисселю перемещаться по отношению к главной раме.

Для облегчения взаимного перемещения бисселя и главной рамы, очень часто между ними помещается еще небольшая вспомогательная рама Последняя с одной стороны опирается с помощью пяты на биссельную ось, а с другой стороны подвешивается на рычажно-шарнирных подвесках к рессорам или буксам соседней ведущей оси. Главная рама в свою очередь опирается на вспомогательную с помощью особой пяты, выполняемой обычно в виде шаровидной. Таким образом, при повороте начинает сперва перемещаться биссель. Вслед за ним вовлекается в движение вспомогательная рама, поворачиваясь с одной стороны около шкворня бисселя, а с другой стороны перемещаясь на рычажно-шарнирных подвесках по отношению к соседней ведущей оси Одновременно с этим вспомогательная рама поворачивается около цапфы главной рамы.

На прямой биссель устанавливается в правильное положение чаще всего с помощью спиральных или листовых пружин, помещаемых между ним и главной рамой электровоза (рис. 516). На кривых при повороте бисселя пружины эти деформируются, а на прямой они стремятся выправиться и поставить биссель в центральное положение.

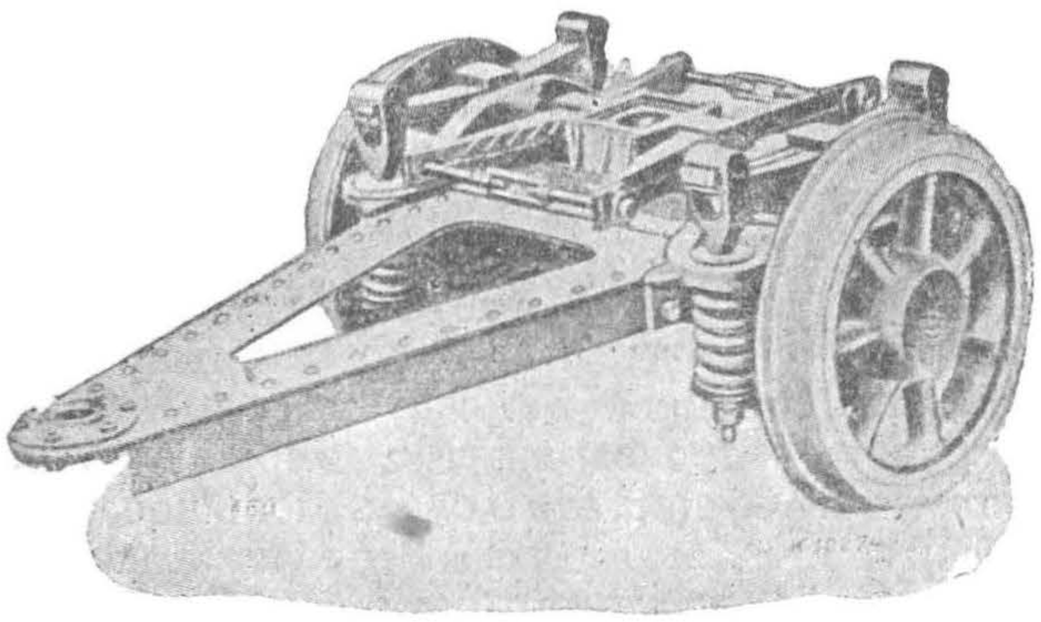


Рис. 516. Биссельная тележка с возвращающим механизмом.

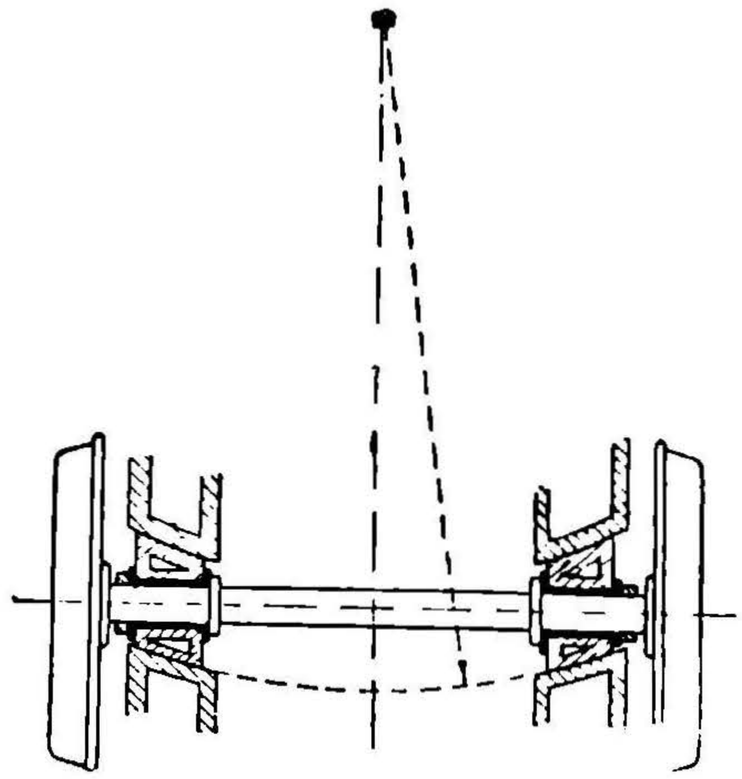


Рис. 517. Бегунковая ось Adams'a.

Вместо тележки-бисселя иногда применяется бегунок Adams'a (рис. 517). Основан он на принципе чисто радиального поворота каждой индивидуальной бегунковой оси (Л. 120).

Следующим типом бегунковых механизмов являются двухосные тележки, состоящие из бегунковой оси и соседней ведущей оси. Основным типом таких тележек является система Krauss—Helmholtz'a (рис. 518). В этой системе поворот бегунковой

НВ УДУНТ (ДІІТ)

тележки по отношению к главной раме производится около шкворня *D*, являющегося вместе с тем и точкой опоры для главной рамы по отношению к тележке. Соединение между бегунковой и ведущей осями производится с помощью шарнира *E*. При движении на кривой бегунковая ось делает поворот, заставляя ведущую ось совершать поперечное перемещение, в результате чего реборды ее отводятся от головок рельсов, и это уменьшает сопротивление движению на кривой. Возвращающий механизм здесь выполняется в виде листовых рессор. Конструкций тележек, основанных на разобранном принципе, имеется весьма большое число—тележки Zara, Oerlikon'a, AEG, BBC и ряда других заводов (Л. 220).

Еще более совершенной конструкцией бегунковых механизмов являются двухосные бегунковые тележки (рис. 519). Тележки эти выполняются чаще всего по принципу разобранных выше вагонных двухосных тележек, но только без рессорной подвески поперечного бруса, несущего шкворневой подшипник. Кроме того, для фиксации правильного положения на прямой здесь применяются по большей части специальные пружинные устройства. На кривой при действии таких устройств тележка поворачивается, преодолевая противодействие пружин. На прямой же пружины ставят тележку в ее центральное положение.

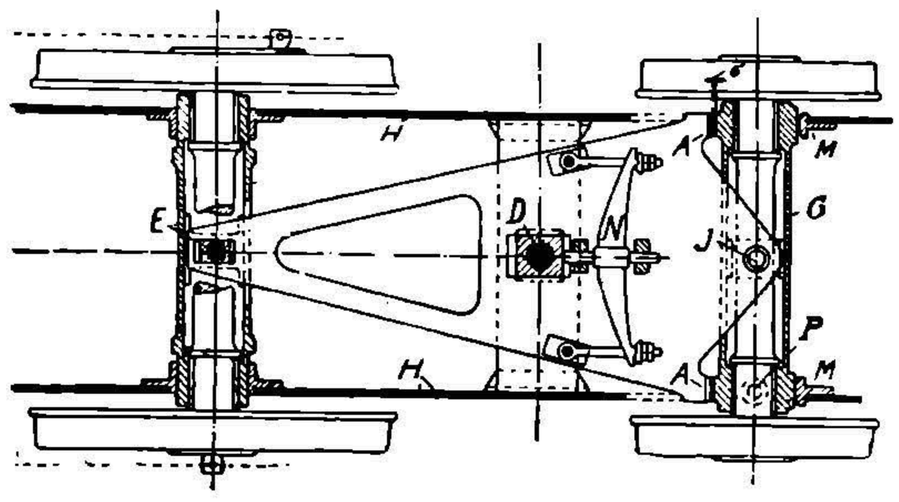


Рис. 518. Бегунковая тележка Krauss—Helmholtz'a.

Дальнейшим развитием идеи бегунков является применение принципа Krauss—Helmholtz'a к двухосным тележкам. В этих конструкциях тележки связаны шарнирно с соседней ведущей осью, производя на нее такое же действие, как и в системе Krauss—Helmholtz'a. Такие же цели преследует бегунковая система Kando, по которой двухосная тележка типа Krauss—Helmholtz'a связывается еще со второй ведущей осью. Таким образом, получается координирование движения бегунковой оси и двух смежных ведущих осей (Л. 220).

Отдельные детали ходовых частей и кузова. В отношении деталей отдельных ходовых частей, колесных пар и подшипников, электровозные конструкции принципиально мало отличаются от вагонов, но они, естественно, более массивны. Колесные пары для современных электровозов делаются почти всегда из литой стали с прочностью на разрыв не меньше 45—50 kg/mm² при удлинении не ниже 25%. Насаживаются колеса на оси под большим давлением, доходящим до 100—150 t. Бандажи делаются из прокатной высокосортной стали с сопротивлением не ниже 75—80 kg/mm². Диаметры электровозных колес колеблются в очень широких пределах. Для малых электровозов они определяются в 800—1000 mm, для товарных типов—в 1200—1600, для пассажирских—в 1200—2200.

Оси локомотивные выполняются или из стали Сименса-Мартена, или же из специальной никелевой, во всяком случае с разрывным усилием не ниже 50 kg/mm² и удлинением не меньше 25%.

Подшипники электровозов, как общее правило, выполняются по типу скользящих. Ввиду больших напряжений роликовые системы пока находят редкое применение. Из подшипников трения скольжения применяется система с одним верхним вкладышем. Смазка в большинстве случаев производится с помощью подбивки шерсти или специальных смазочных подушек. Существует очень большое количество вариантов выполнения смазки, главная цель которых—обеспечить надежную подачу масла с применением в некоторых системах автоматической ее регулировки (Л. 220).

Что касается кузова электровоза, то он в основе состоит из металлического каркаса, выполняемого из уголков и обшиваемого жестью толщиною около 3—5 mm. В некоторых конструкциях он обшивается деревом. У электровозов без тележек каркас кузова базируется на общей электровозной раме с применением поперечных консолей для поддержки выступающих по ширине за раму частей кузова. У электровозов с поворотными тележками и общим кузовом приходится для последнего делать отдельную прочную раму. Для удобства монтажа оборудования кузов очень часто выполняется разъемным с легким отъемом крыши и боковых стенок, выполняемых в виде щитов. Расположение окон и дверей, как можно ви-

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

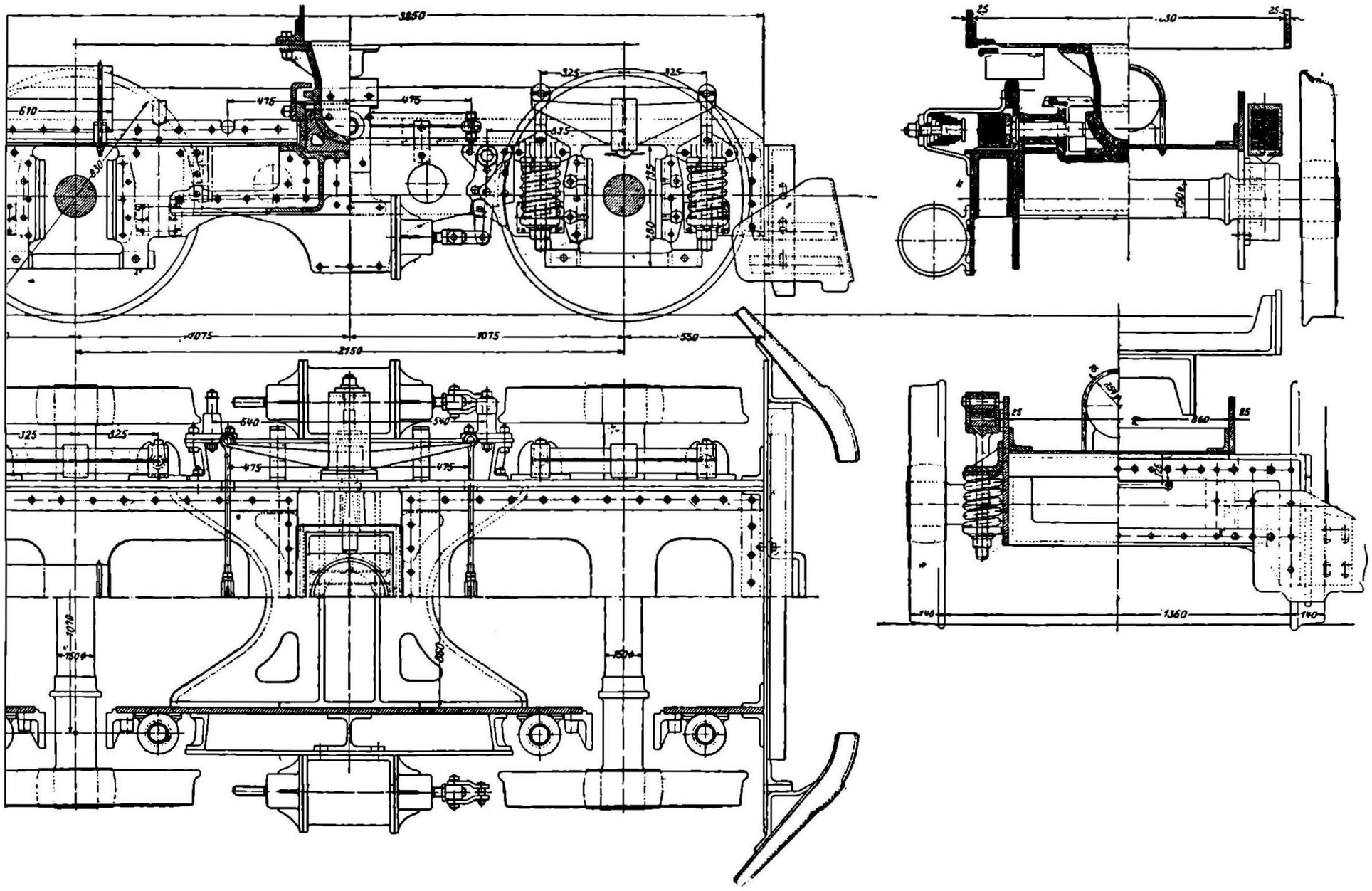


Рис. 519. Бегунковая двухосная тележка.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

деть из приведенных выше рисунков, отличается большим разнообразием. Определяется оно в значительной степени типом локомотива и характером его оборудования. На рис. 520 приведен в качестве образца кузов германского электровоза типа 1—3А—3А—1. Из этого рисунка видно, каким образом кузов базируется на главной электровозной раме.

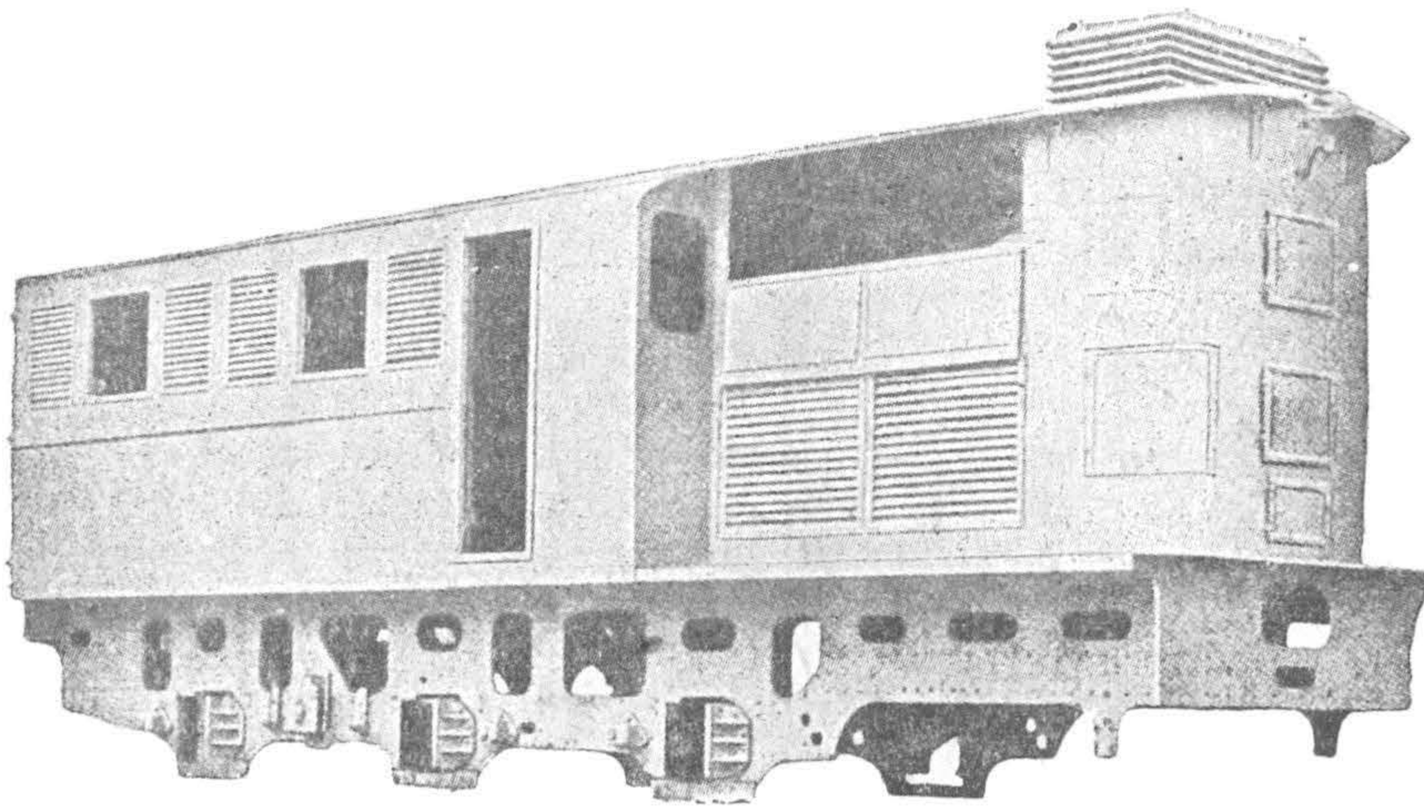


Рис. 520. Общий вид кузова электровоза германских ж. д. типа 1—3А—3А—1.

Компановка оборудования электровозов. Оборудование современного электровоза, как уже выяснено, было выше, состоит из механического, пневматического и электрического. При размещении оборудования необходимо соблюдать по возможности экономию места, требования безопасности для обслуживающего персонала и правильное распределение нагрузки между отдельными осями. Последнее достигается очень часто с большими затруднениями и требует применения различного рода опорных подставок и подкладок.

Наиболее тяжелую часть электрического оборудования электровозов составляют тяговые электродвигатели. При подвесноосевых системах двигатели занимают свое естественное положение—под кузовом, оставляя свободное в нем место для прочего оборудования. Размещение двигателей на тележках можно видеть из рис. 521. Точно так же вполне определенное место двигатели должны занимать и в системах с полым валом и зубчатыми секторами ВВС. Иначе дело обстоит с рычажными и зубчато-рычажными передачами, где размещение двигателей можно варьировать, но в то же время приходится весьма считаться с тем, что в кузове локомотива они занимают много места. В подобных случаях, особенно при наличии трансформатора, приходится из-за недостатка места часто прибегать к бегункам для размещения на них нагрузки, неумещающейся на ведущих осях. Примером монтировки электродвигателя с рычажной передачей может служить электровоз Пенсильванских железных дорог постоянного тока мощностью в 4000 PS_h (рис. 24). На рис. 522 приведено расположение двигателя с зубчато-рычажной передачей Лебчергской железной дороги типа О—С—С—О общей мощностью в 2 200 PS_h.

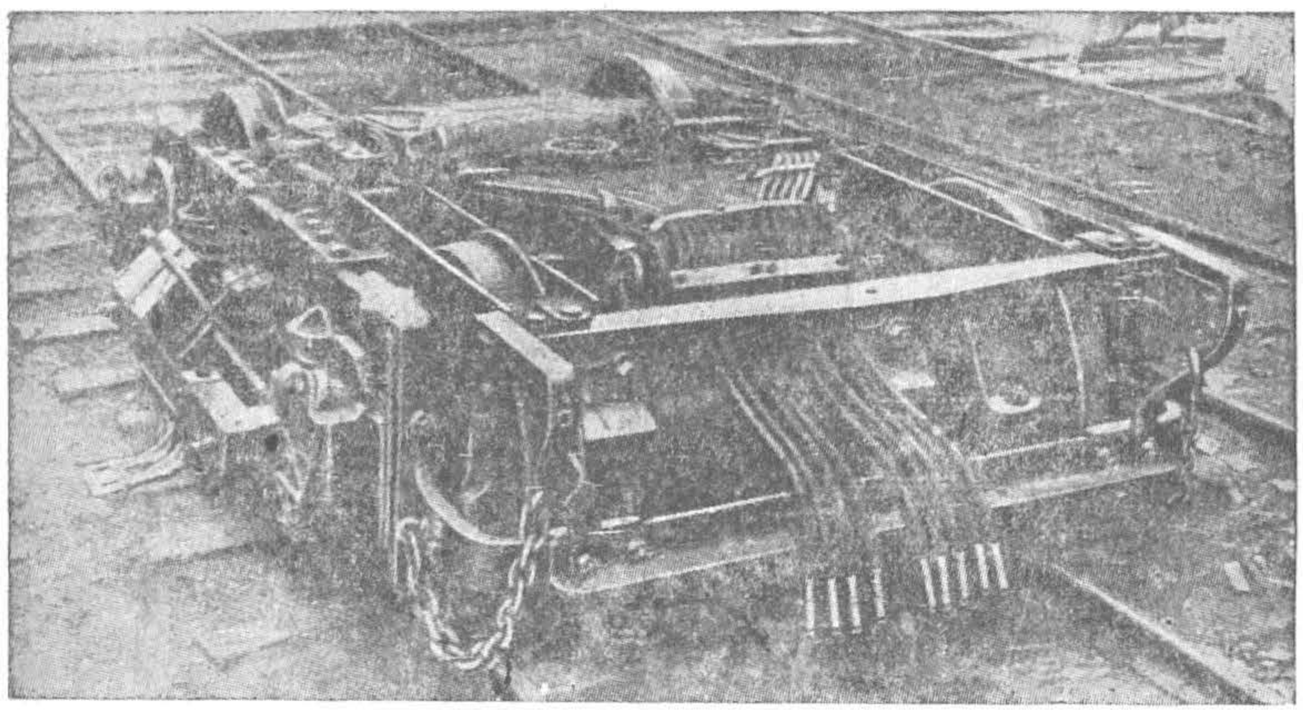


Рис. 521. Общий вид тележек электровоза в монтированном виде.

Той же дороги электровоз 1—С—С—1 может дать понятие о размещении на раме двигателей и трансформатора, причем над трансформаторами смонтированы контроллеры главной цепи, о которых упоминалось в отделе III (рис. 523). Заметим, что трансформаторы, в зависимости от расположения тяговых двигателей, могут располагаться или по концам электровоза, или в его центре.

Много места в электровозах занимают контакторы и реверсоры. Система их монтажа может быть различной, но чаще всего они монтируются на особых каркасах. На рис. 524 показана передняя сторона, а на рис. 525 задняя сторона такого мон-

НВ УДУНТ (ДІІТ)

тированного комплекта для электровоза германских железных дорог типа 1—4А—1. Тщательного выбора места требуют автоматические выключатели. Особенно большие затруднения возникают с масляными выключателями. Они помещаются или внутри электровоза в особых камерах, или же ставятся непосредственно над трансформатором, причем камера выключателя частично выносится на крышу.

Особо нужно отметить оборудование, помещаемое на крыше. В состав его входят токоприемники разъединители, иногда индукционные отражательные катушки и разрядники. В некоторых случаях на крыше при постоянном токе размещаются пусковые реостаты. Передача тока с крыши в электровоз производится через проходные изолято

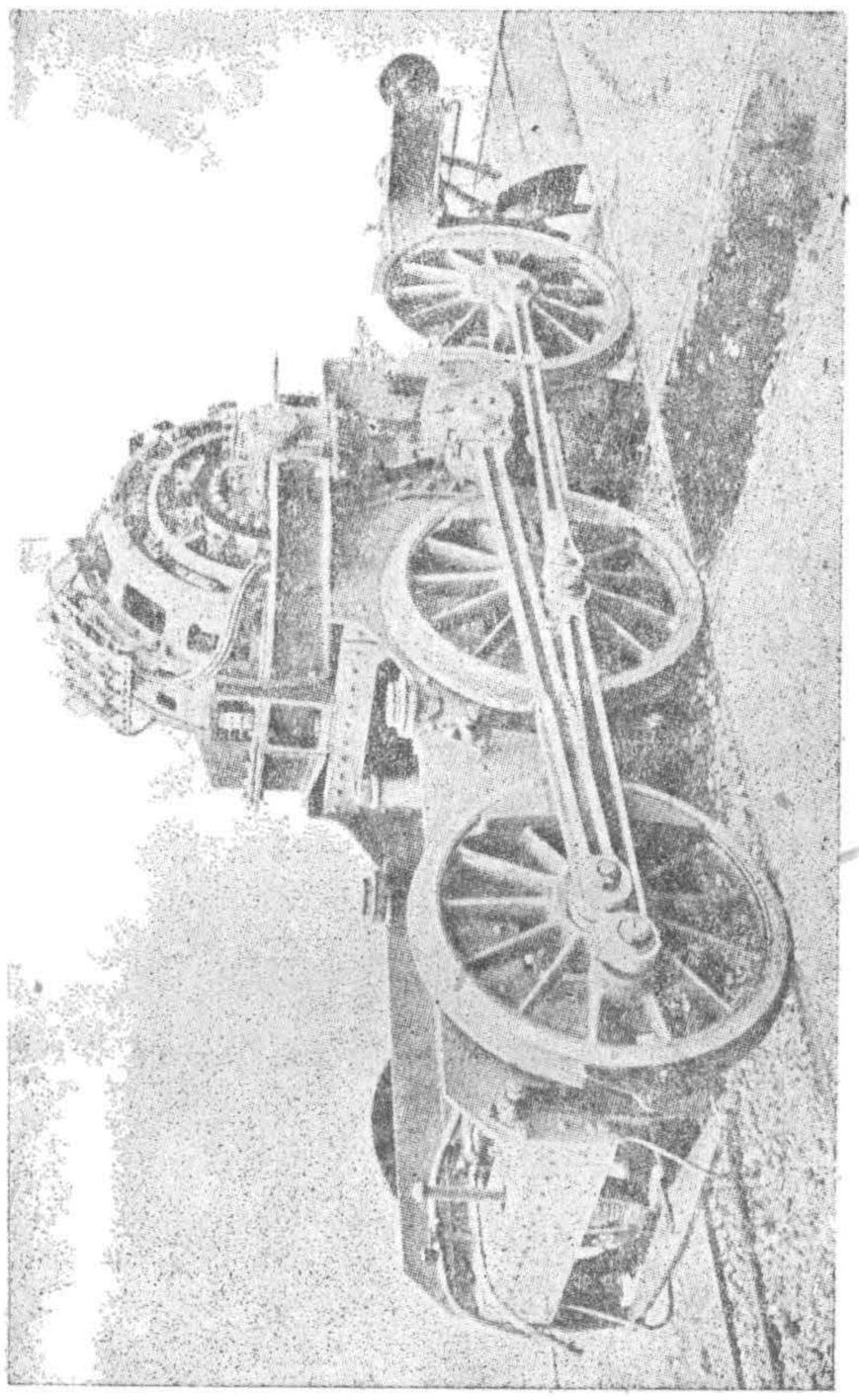


Рис. 522. Вид монтированной тележки электровоза Лебчергской ж. д.

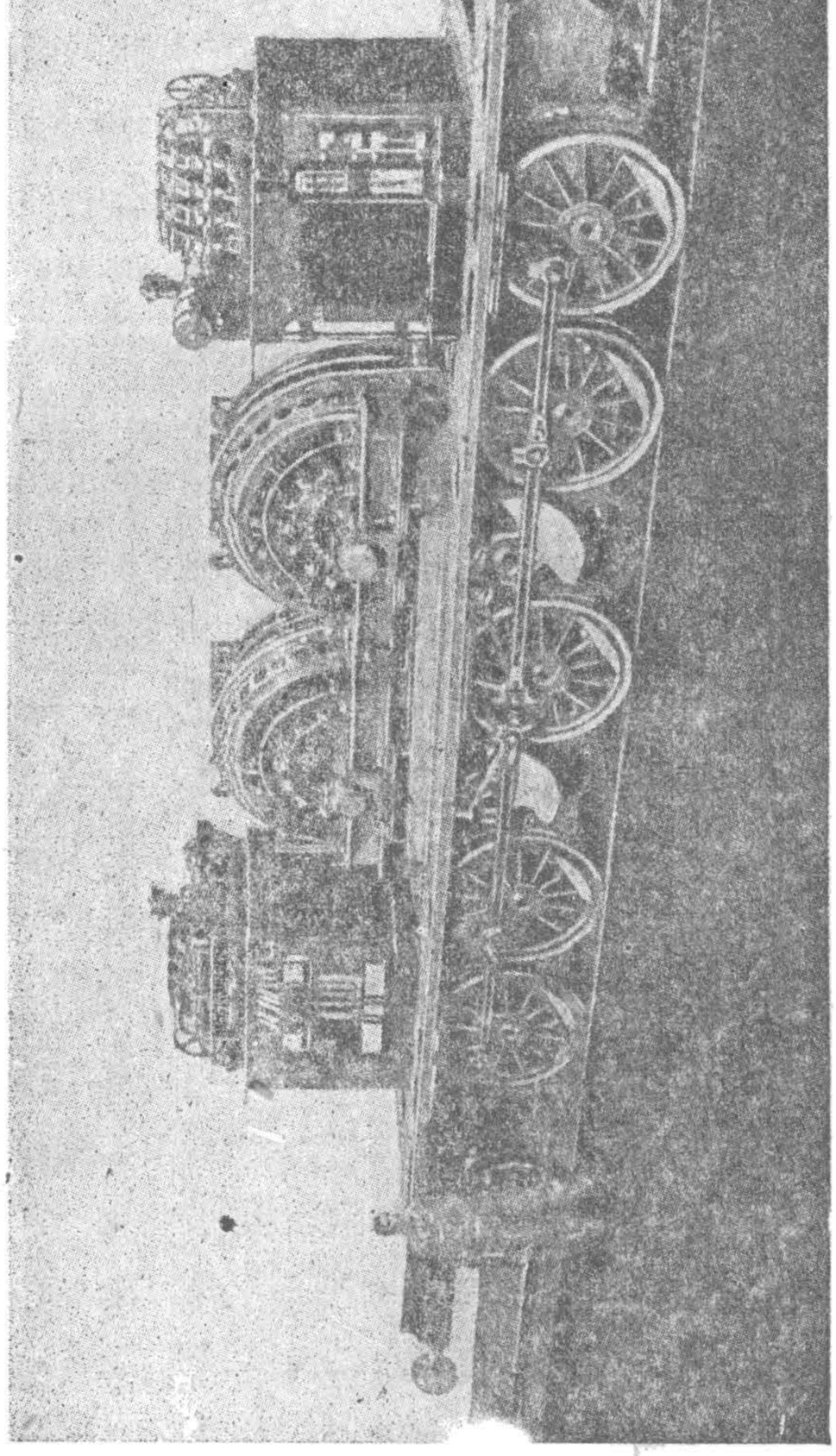


Рис. 523. Общий вид расположения оборудования на раме электровоза Лебчергской ж. д.

ры. При напряжении до 750—1000 V токоприемники можно располагать на крыше просто на деревянных брусьях. При напряжении до 3000—4000 V допустимо брать одиночные фарфоровые изоляторы. При более высоких напряжениях применяется двойная изоляция.

В электровозах, работающих от высокого напряжения, приходится делать особую камеру, в которой помещаются трансформаторы, масляники и прочие аппараты высокого напряжения. Дверь камеры обычно устроена так, что открыть ее можно только тогда, когда опущены токоприемники Одновременно с открытием двери камеры вся высоковольтная система электровоза заземляется.

Управление электровозом производится машинистом из особых кабинок, размещаемых нормально по обоим концам локомотива. В кабинке сосредоточиваются

НВ УДУНТ (ДІІТ)

все аппараты, необходимые для управления поездом. Здесь имеются контроллеры управления, краны машиниста, амперметры, вольтметры, измерители скорости поезда, кнопки и рычаги для управления токоприемниками и выключателями, манометры, а иногда и указатели нагрева двигателей. Кабинки отапливаются, причем часто применяются ножные грелки в виде теплых подставок для ног.

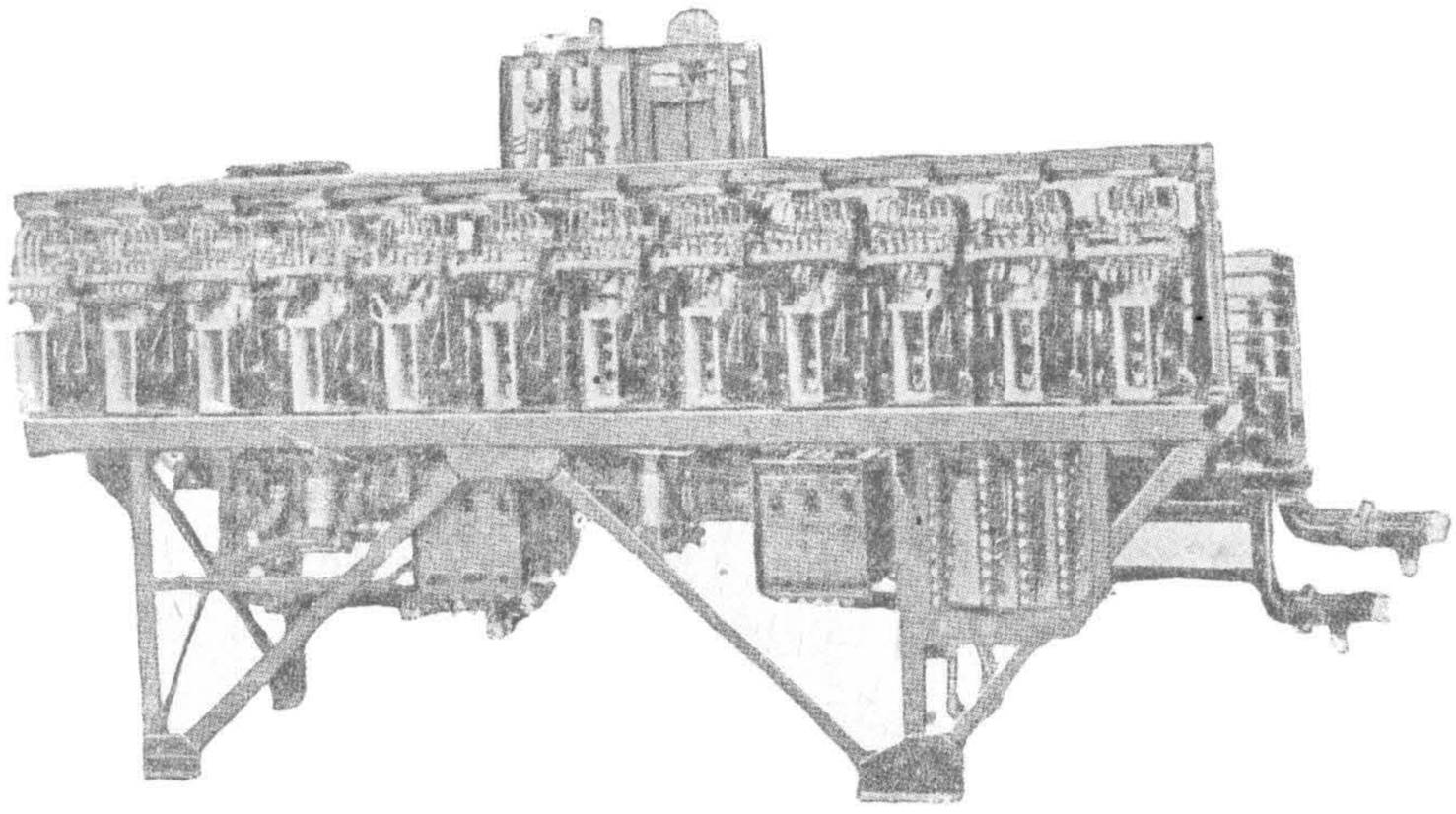


Рис. 524. Передняя сторона контакторного комплекта на каркасе.

Представление о размещении оборудования электровозов постоянного тока дают рис. 526 и 527. Первый рисунок дает картину размещения аппаратов управления в поставленном фирмой AEG электровозе испанских железных дорог О — 2А — 2А — О постоянного тока с подвесноосевыми двигателями. Мощность его—около 1050 PS_h при напряжении в 1500 V. Второй рисунок дает размещение аппаратов управления в электровозе дороги Ch. M. St. P. R., завода Вестингауза, мощностью в 4000 PS_h с полым валом и сдвоенными двигателями.

Рис. 528 представляет локомотив однофазного тока германских железных дорог типа О — 3А — 3А — О, общей мощностью около 1200 PS_h при напряжении в 15 000 V и частоте $16^2/_3$ Hz, с подвесноосевыми двигателями, завода SSW. На рис. 529 дана

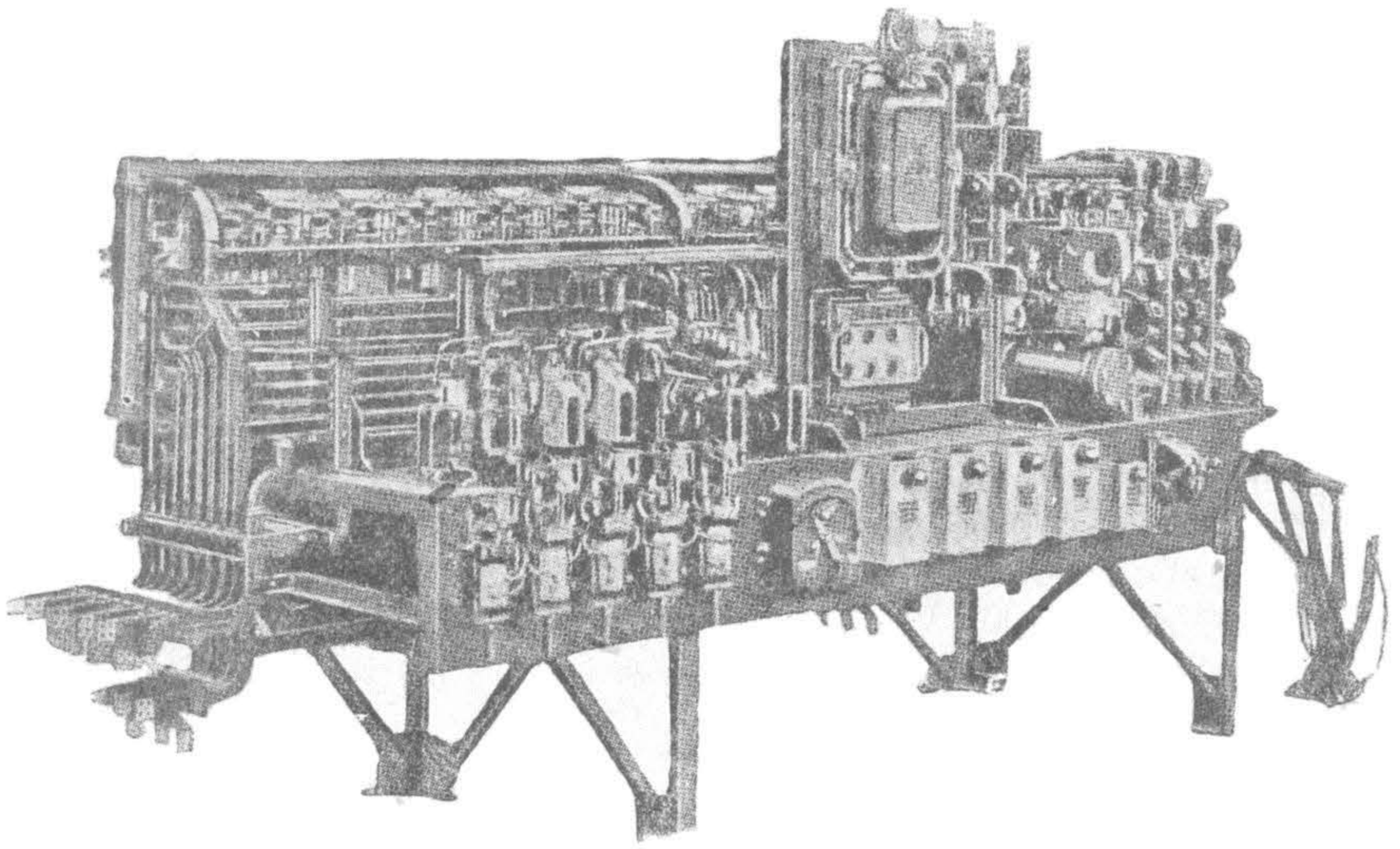


Рис. 525. Задняя сторона контакторного комплекта на каркасе.

половина электровоза однофазного тока шведских железных дорог, мощностью в 2900 PS_h при напряжении в 15 000 V, и частоте $16^2/_3$ Hz. Электровоз—типа 1 — С — — С — 1 с зубчато-рычажной передачей.

Общее размещение оборудования электровоза трехфазного тока итальянских железных дорог можно видеть на рис. 530. Электровоз—мощностью около 3000 PS_h

НБ УДУНТ (ДІІТ)

с рычажной передачей, напряжение в контактном проводе—3600 V и частота $16^2/_3$ Hz. Работает электровоз без трансформатора с пусковым водяным реостатом.

Для суждения о весовых соотношениях отдельных частей оборудования приводятся данные об электровозе закавказских железных дорог СССР, фирмы GEC типа 0—3А—3А—0, мощностью в 2 760 PS_h.

Веса частей оборудования электровоза 0—3А—3А—0:

1. Механическая часть.

Тележка первая	21,200 kg
Тележка вторая	21,300 „
Кузов с рамой	20,100 „
	62,600 kg.

2. Электрическое оборудование.

Двигатели 6 штук типа GEC — 1730 при напряжении на одном коллекторе 1500 V . . .	32 000 kg
Комплект электропневматического оборудования	10 600 „
Динамотор CGM 114 — 1 шт.	2 550 „
Агрегат возбуждения для рекуперации RMG 114	3 100 „
Вентиляторные агрегаты CV 300 — 2 шт. .	1 530 „
Разрядник	50 „
Аккумуляторная батарея	375 „
Электрические печи 2 шт. .	400 „
Воздушные компрессоры 2 шт.	2 930 „
Оборудование воздушного тормоза	1 730 „
Прочее вспомогательное оборудование . .	2 135 „
Итого .	57 400 kg.

Общая весовая характеристика электровоза 0—3А—3А—0.

Вес механических частей .	62 600 kg
Электрическое оборудование	52 740 „
Тормозное оборудование . .	4 660 „
Полный конструктивный вес .	120 000 „
Вес добалластировки	20 000 „
Полный рабочий вес	140 000 „
Сцепной вес	140 000 „
Неподрессоренный вес на каждую ведущую ось	5 000 „

Для иллюстрации весовых соотношений у электровозов однофазного тока может служит электровоз Вестингауза на 15 000 V и 15 Hz, мощностью в 1 200 PS_h:

Весовые соотношения у электровоза типа 1—С—1.

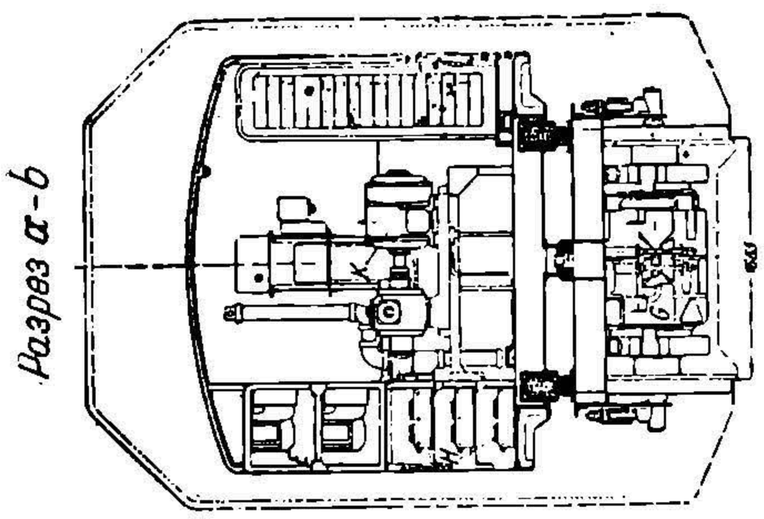
Двигатели с передачею 2×600 PS_h .	26 800 kg
Трансформаторы 2 шт. . .	9 650 „
Контакторное оборудование	3 420 „
Пантографы . .	530 „
Вентиляторы	783 „
Компрессоры	900 „
Прочее . .	105 „
Итого .	43 000 kg
Вес механических и тормозных частей . .	38 000 „
Всего .	81 000 kg.

Данные о весовых соотношениях у электровозов с расщепленной фазой содержатся в материале, приведенном в отделе V.

Течения в строительстве электровозов. В первый период строительства считали выгодным применять конструкции с непосредственной насадкой двигателей на ведущую ось. Таковы, например, были первые электровозы Вальтелинской железной дорогой. Однако, целый ряд конструктивных осложнений, особенно в отношении трехфазных асинхронных двигателей, заставил конструкторов отказаться от данной конструкции. Впоследствии эта идея возродилась в виде двигателей с непосредственной насадкой якорей на ведущие оси, применяемых, как выше указывалось, для некоторых типов электровозов постоянного тока GEC. Но и при таком

НБ УДУНТ (ДІІТ)

решении вопроса данный тип сочленения двигателей с ведущею осью не получил большого распространения. В настоящее время такие электровозы, как уже отмечалось выше, имеются только на американских дорогах N. C. R. R. и Ch. M. St. P. R. В Европе же имеются только пробные единицы на дороге Paris Orléans.



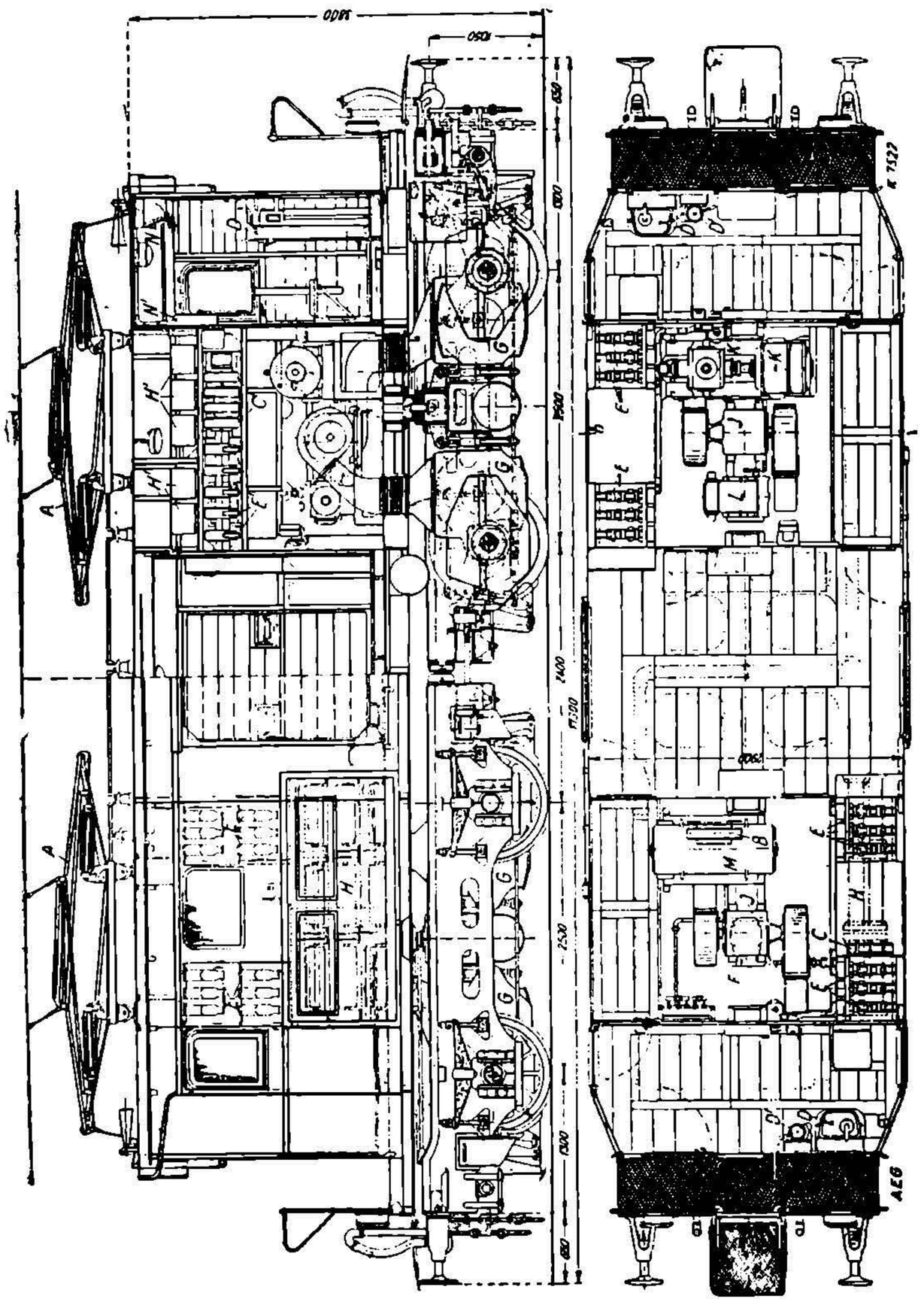


Рис. 526. Электровоз испанских ж. д. AEG мощностью 1050 PSh постоянного тока 1500 V.

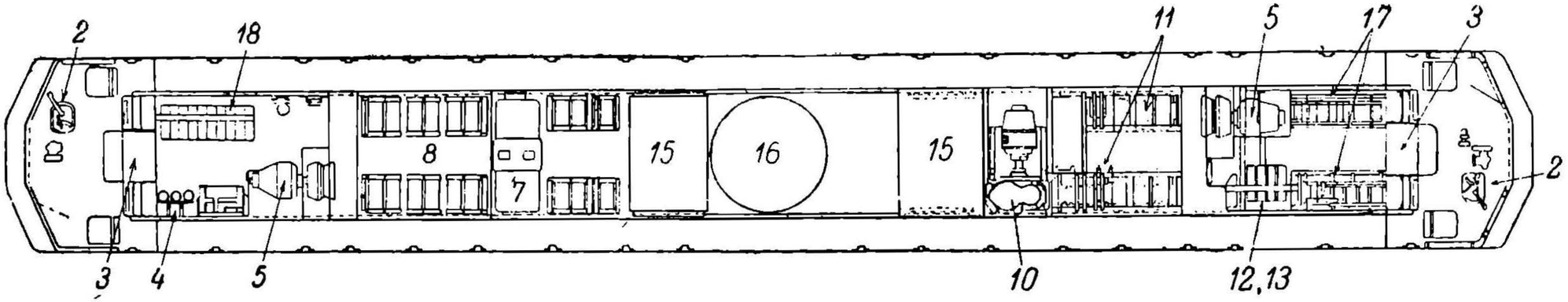
Обозначения.

A — Токоприемник.
B — Автомат.
C — Предохранители главной цепи.
C' — Предохранители для вспомогательных агрегатов.
D — Контроллер управления.
D' — Кран машиниста.
E — Контакторы главной цепи.
F — Реверсор.
G — Главные двигатели.
H — Пусковые и тормозные сопротивления.
H' — Реостаты для вспомогательных двигателей.
J — Вентилятор.
K — Насос разрежения.
L — Компрессор
M — Мотор-генератор.
N — Измерительные приборы.
N' — Распределительная доска для освещения.

В истории развития строительства электровозов наиболее сильными конкурентами были локомотивы с различными типами зубчатых передач и передач рычажных. Опыт паровозостроения побудил первых строителей электровозов обратить самое серьезное внимание на применение рычажных передач. Следует отметить, что в это время зубчатые передачи технически еще не были вполне разработаны. Много было опасений относительно их прочности и коэфициента полезного действия. Европа довоенного периода определенно стала на сторону рычажных передач. В Америке вопрос обстоял иначе. Там, как и в Европе, была сделана попытка применения рычажных передач. Но одновременно с этим американцы начали строить электровозы с зубчатыми передачами как трамвайного типа, так и типа с полым валом Вестингауза. Для того, чтобы разобраться в преимуществах и недостатках зубчатых и рычажных передач, американцы производили ряд опытов и наблюдений. В частности на дороге N.H.H R. были пущены одновременно на испытание электровозы примерно одинаковой мощности с зубчатой и с рычажной передачами. Электровоз с зубчатой передачею оказался на 17% легче по весу и дал в эксплоатации лучшие показатели. В соответствии с наблюдениями и опытом американцы определенно отдают теперь предпочтение электровозам с зубчатыми передачами.

Опыт американцев не прошел бесследно и для Европы. Более внимательное исследование вопроса показало, что с рычажными передачами как было выяснено выше, в эксплоатации часто получаются большие осложнения в отношении паразитных колебаний. Предотвратить их может очень тщательная сборка механизма, трудно

НБ УПУНТ (ДІІТ)



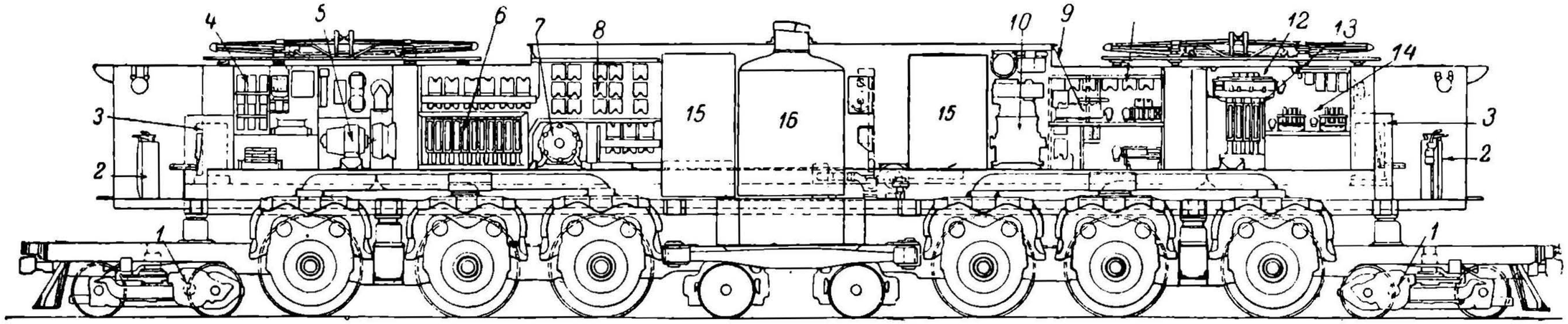


Рис. 527. Электровоз дороги Ch. M. St. P. R. Вестингауза мощностью 4 000 PS_h постоянного тока 3 000 V.

Обозначения.

1. Возбудители для рекуперации
2. Контроллеры управления.
3. Шунты для обмоток возбуждения.
4. Предохранители вспомогательных цепей.
5. Мотор вентилятор
6. Реостатные контакторы.
7. Мотор-генератор.
8. Реостаты.
9. Коммутатор для включения и переключения вспомогательных цепей.
10. Воздушный мотор-компрессор.
11. Сопротивления и контакторы для рекуперации.
12. Контакторы общей силовой цепи.
13. Контакторы в цепях отдельных двигателей.
14. Контакторы для шунтов.
15. Баки для воды.
16. Котел для отопления.
17. Кулачковые приводы и их контакторы.
18. Контакторы защиты главных цепей.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

достижимая в эксплоатации. Расход смазочных материалов и стоимость ремонта также получаются неблагоприятными для рычажных передач. Кроме того, двигатели электровозов с рычажными передачами благодаря своей тихоходности оказались дорогими и при наличии к тому же больших мощностей очень громоздкими, крайне неудобными в отношении сборки, ремонта и замены отдельных частей. Эти недостатки обнаружились еще до войны, и тогда уже стали строиться электровозы с зубчато-рычажными передачами, находящими себе теперь очень широкое применение в Европе, главным образом в Швейцарии, Германии, Австрии, Италии и Скандинавии. Значительно позже, уже после войны, Европа начинает строить в большом количестве электровозы с индивидуальной зубчатой передачей. Помимо трамвайной подвески, появились модификации системы полого вала Вестингауза, конструкции Secheron и AEG, система Buchli, выполняемая BBC, и целый ряд конструкций

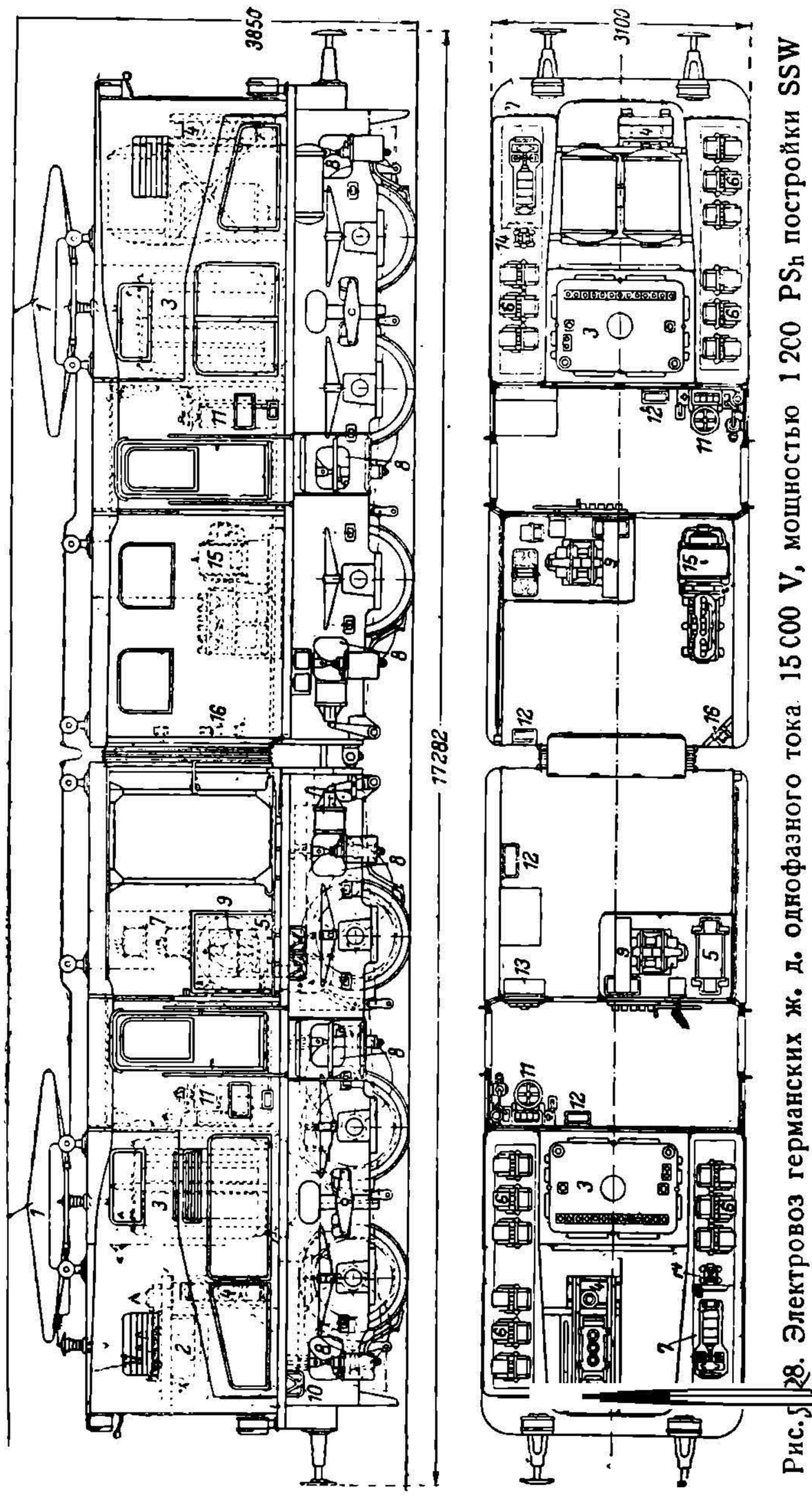


Рис. 528. Электровоз германских ж. д. однофазного тока 15 000 V, мощностью 1200 PS_h постройки SSW

Обозначения.

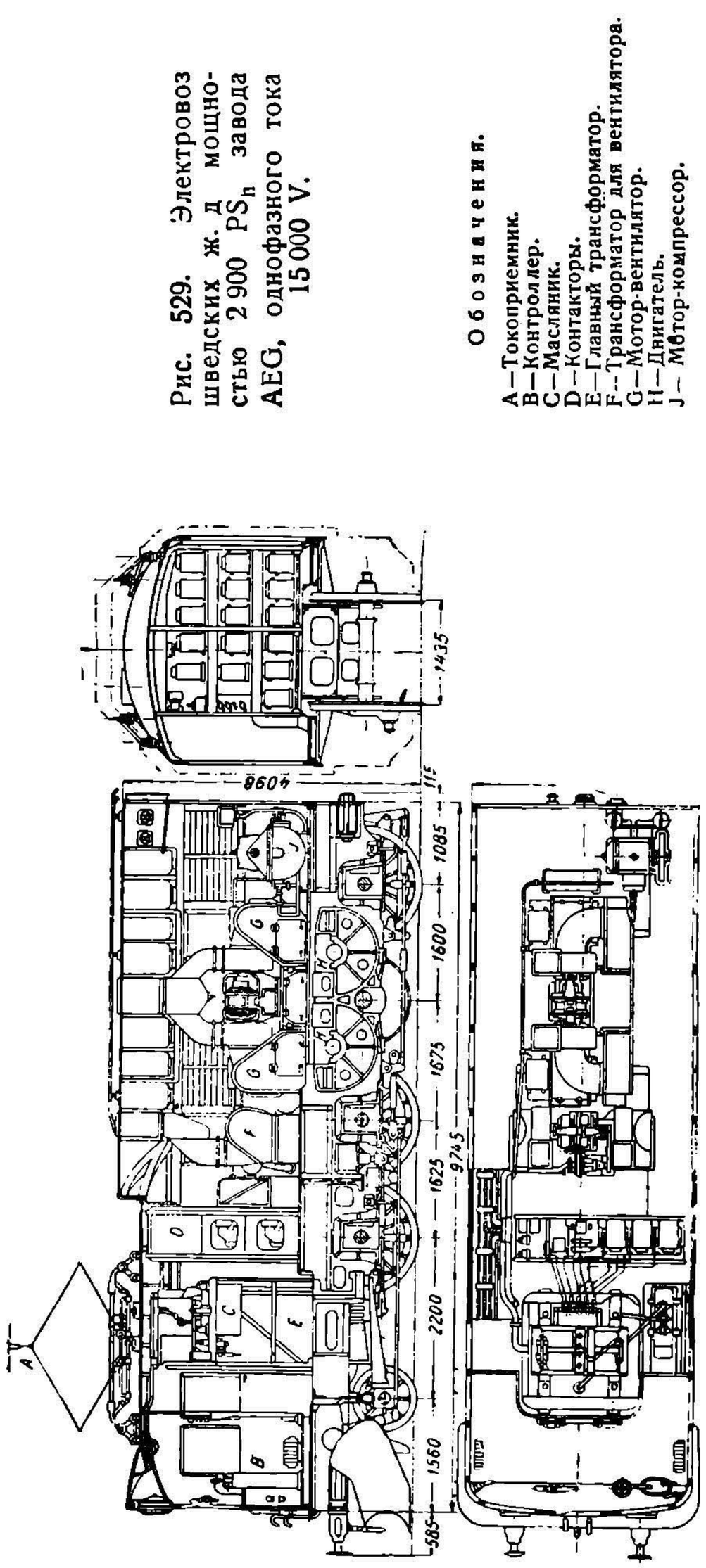
1—Токоприемник.
2—Масляник.
3—Трансформатор.
4—Дроссельная катушка.
5—Вспомогательный реостат.
6—Контакторы.
7—Реверсор.
8—Двигатели.
9—Мотор-вентиляторы.
10—Вспомогательные реостаты.
11—Контроллер управления.
12—Нагревательные приборы.
13—Распределительная доска.
14—Измерительный трансформатор.
15—Компрессор.
16—Ручной воздушный насос.

с полым валом других заводов. Была также сделана во Франции и Австрии отмеченная выше попытка применения вертикальных двигателей, но до сего времени широкого применения они не получили. Одна из причин этого кроется, повидимому, в сложности системы и наличии в ней конических колес, менее совершенных, чем колеса цилиндрические.

Переходя теперь к общей конструкции электровозов, нужно отметить, что она в значительной степени развивалась в связи с типом передач. Зубчатые передачи с трамвайными подвесками наиболее удобно укладываются в электровозы с поворотными тележками, представляющими большие преимущества в эксплоатации. Электровозы с полым валом, предназначаемые чаще всего для пассажирского движения, строятся на общей раме и по типу отдельных тележек. В Европе предпочитают первую конструкцию, в Америке Вестингауз чаще строит вторую. Зубчато-рычажные передачи также выполняются по той и другой системе. Спаривать больше, чем четыре оси, теперь избегают. Электровозы с рычажной передачею и система Buchli нормально выполняются на общей раме.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Большинство современных электровозов имеют бегунковые приспособления. Однако, электровозы на тележках, особенно типа 0—2А—2А—0 и 0—3А—3А—0, очень часто строятся без бегунков. Применение бегунковых приспособлений у электровозов этих типов часто диктуется не самою сущностью конструкции локомотива, а в большинстве случаев стремлением облегчить работу путевых устройств.



Обозначения.
A—Токоприемник.
B—Контроллер.
C—Масляник.
D—Контакторы.
E—Главный трансформатор.
F—Трансформатор для вентилятора.
G—Мотор-вентилятор.
H—Двигатель.
J—Мотор-компрессор.

Рис. 529. Электровоз шведских ж. д. мощностью 2900 PS_h завода AEG, однофазного тока 15000 V.

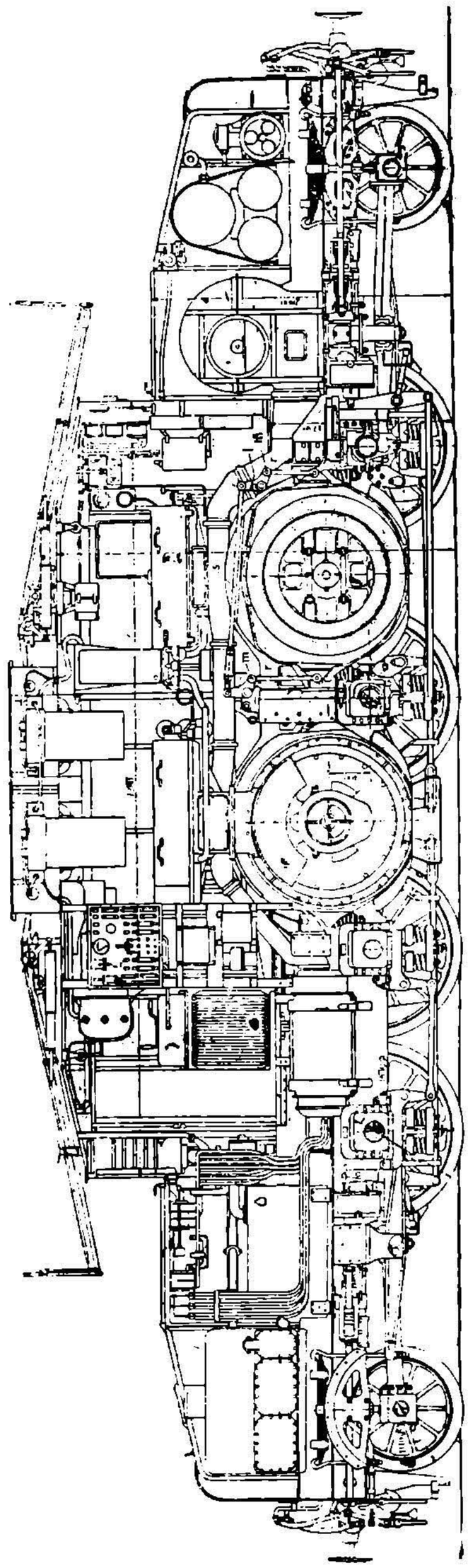


Рис. 530. Электровоз трехфазного тока итальянских ж. д. мощностью 3000 PS_h

Важным вопросом при изучении развития электровозов является вопрос о том, в какой мере система тока и напряжения дороги оказывает влияние на их конструктивные формы. Влияние здесь имеется несомненно, и, главным образом, оно проявляется при постоянном токе, особенно при высоком напряжении. При этой системе тяги выгодно с электрической точки зрения иметь в электровозе несколько индивидуальных двигателей. Выгодно это как с точки зрения понижения расхода энергии при пуске в ход двигателей, так и потому, что высокое напряжение контактного провода делится тогда между несколькими коллекторами. Например, при напряжении в 3000 V принято в современных электровозах держать в непрерывном последовательном соединении по два двигателя с тем, чтобы напряжения на одном

РГБ УИУНТ (ДІТ)

коллекторе не превышали 1500 V. Если при таких условиях применять при разгоне поезда последовательно параллельное включение, то для этого требуется не меньше четырех двигателей. Указанное обстоятельство объясняет, почему электровозы постоянного тока почти всегда строятся с индивидуальными передачами. Исключение

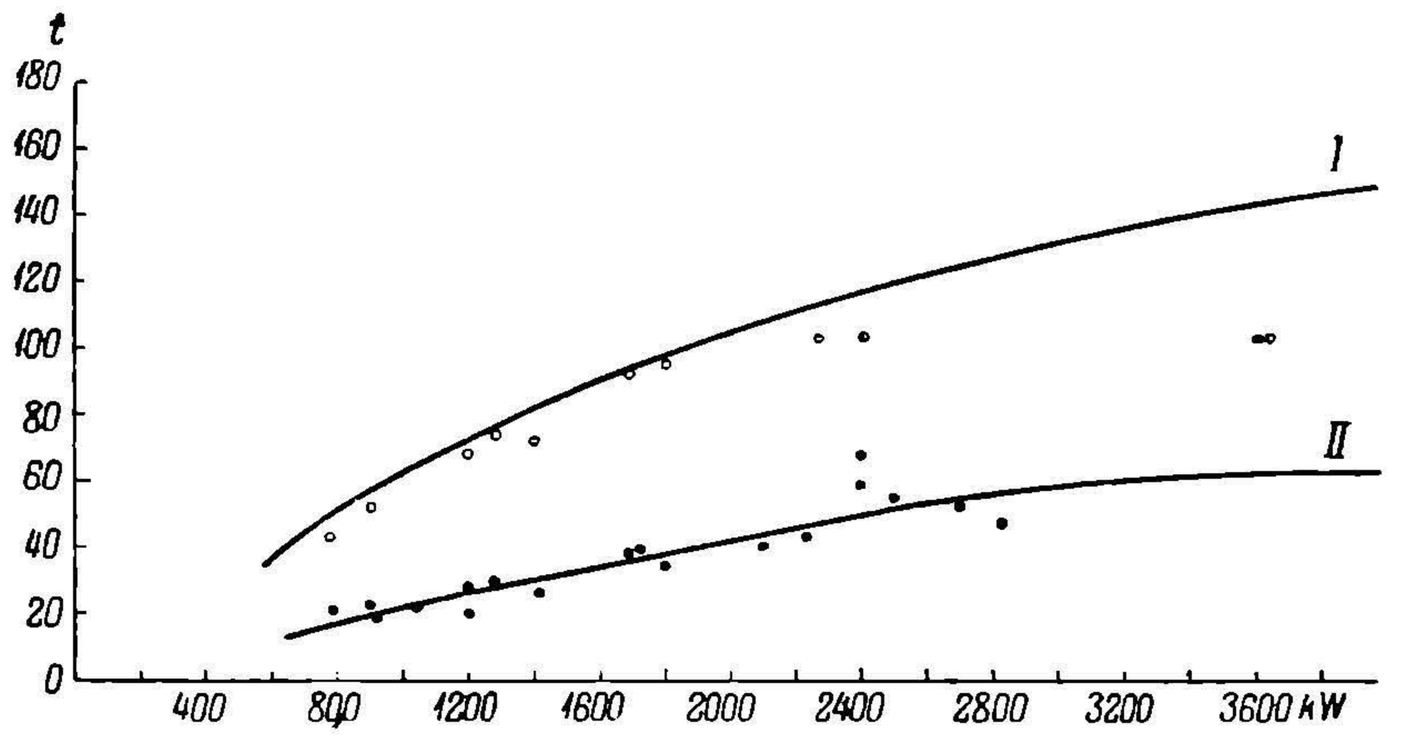


Рис. 531. Кривые весовых соотношений электровозов постоянного тока.

из этого правила составляют только единичные случаи, например электровозы дороги Paris-Orléans.

Существенное влияние на выбор системы электровоза оказывают асинхронные двигатели. Последние, как было подробно объяснено в предыдущих отделах, очень чувствительны к различию характеристик и диаметров колес, являющемуся причиной большого расхождения между нагрузками отдельных двигателей. Это обстоятельство объясняет преимущественное применение групповых приводов, преимущественно зубчато-рычажных, у электровозов трехфазного тока, с расщепленной фазой и прочих типов, работающих с асинхронными двигателями. Отчасти это объясняется еще тем, что резонансные колебания рычажных и зубчато-рычажных передач при шунтовых характеристиках, как уже указывалось, менее опасны, чем при последовательных.

Общее представление о современных электровозах, преимущественно новейших типов, могут дать табл. 79, 80 и 81. Табл. 79 содержит данные об электровозах постоянного тока. Для иллюстрации их весовых соотношений приведены кривые

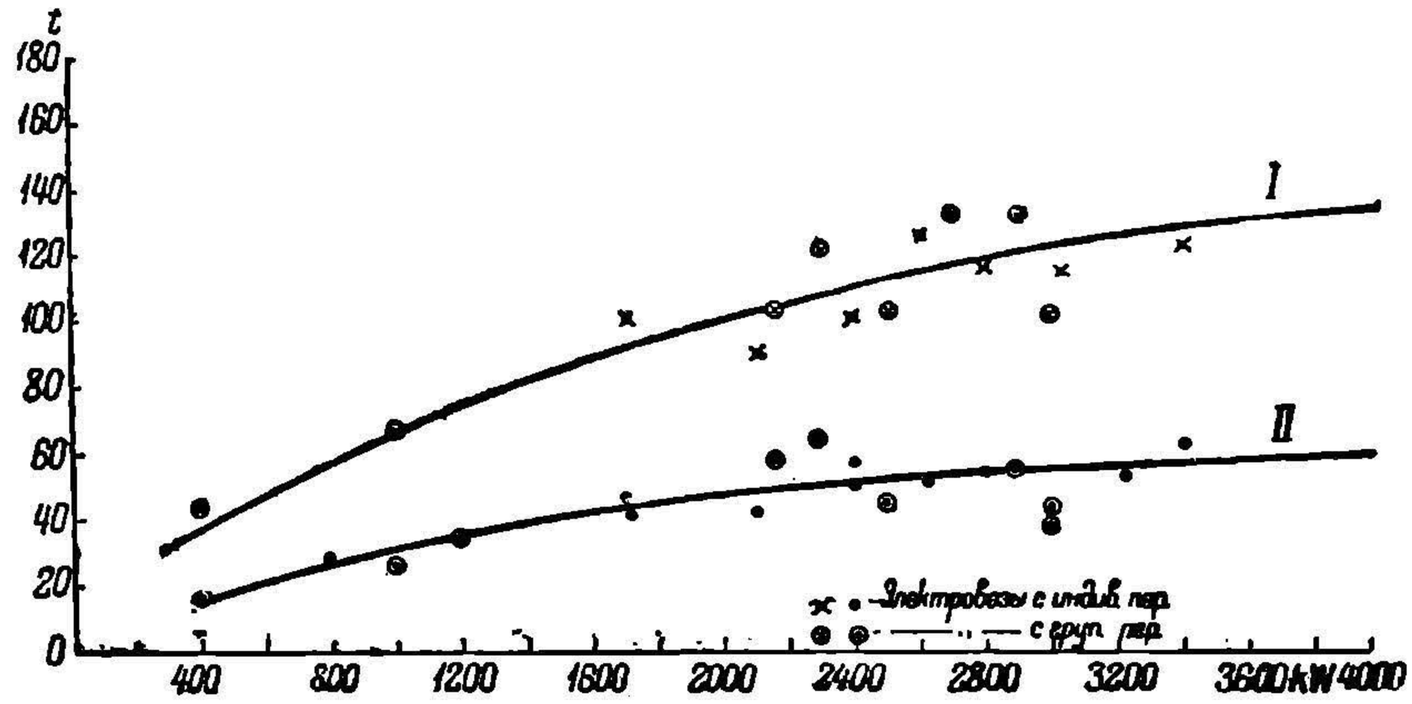


Рис. 532. Кривые весовых соотношений электровозов однофазного тока.

(рис. 531), дающие представление о полных весах (кривая I) и весах электрического оборудования (кривая II) в зависимости от мощности. Такие же данные и кривые для однофазных электровозов приведены в табл. 80 и на рис. 532. Табл. 81 относится к электровозам трехфазного тока и различным типам умформерных локомотивов. Кривые рис. 533 дают понятие о весовых соотношениях электровозов трехфазного тока.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

Анализ весовых соотношений показывает, что наиболее легкими по весу получаются, как это и следовало ожидать, электровозы трехфазного тока. Сравнение их весов при частотах $16^2/_3$ и 45 показывает близкие цифры для тех и других. Несмотря на наличие трансформаторов, вес электрического оборудования с увеличением частоты вследствие понижения весов двигателей держится на одном и том же уровне.

Сравнение весовых соотношений у электровозов постоянного и однофазного тока не показывает значительной разницы между этими двумя системами, хотя следовало бы ожидать более низких цифр для постоянного тока. Объясняется это частично тем, что в число электровозов постоянного тока включено большее количество американских типов, а среди однофазных доминируют типы немецких и швейцарских заводов, конструкции которых в большинстве случаев значительно легче американских. Иное соотношение получается, если сравнить электровозы обеих систем одной и той же фирмы, например, два новейших типа завода ВВС, стоящие в табл. 79 под номером 25 и в табл. 80 под номером 10. При постоянном токе

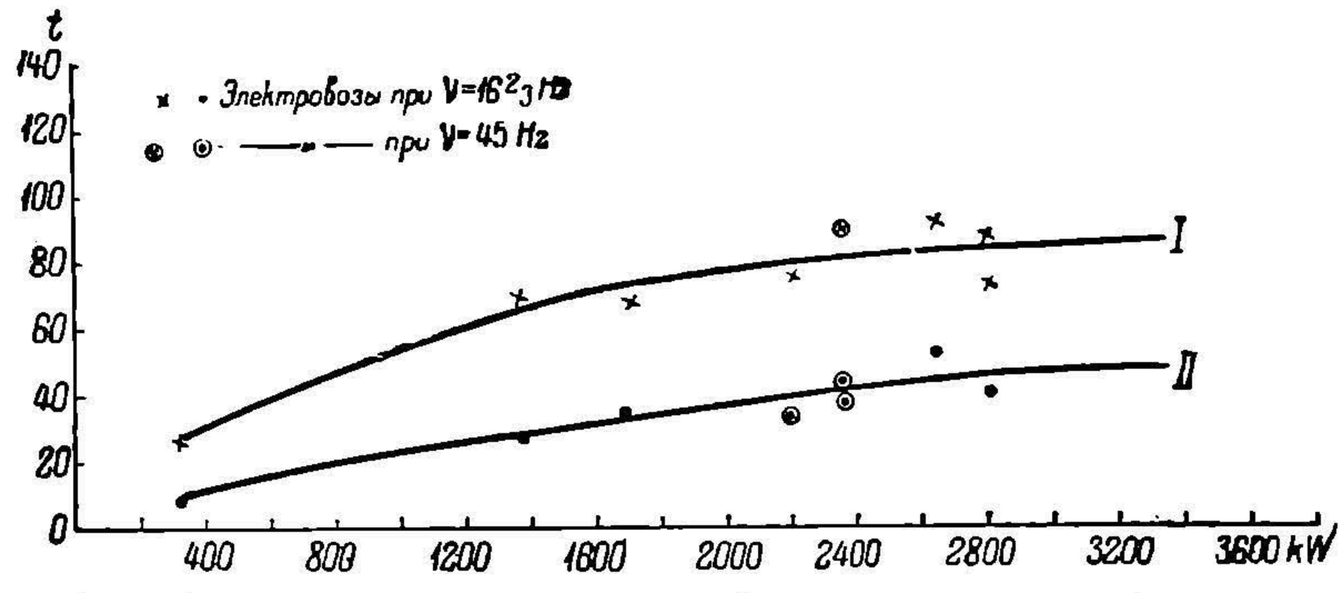


Рис. 533. Кривые весовых соотношений электровозов трехфазного тока.

у электровоза большей мощности электрическое оборудование весит 44 t, а при переменном токе 54 t. Таковы же примерно соотношения электровозов однофазного тока AEG, стоящих под номерами 12 и 13. Следует также иметь в виду, что при одном и том же весе электрического оборудования стоимость его при однофазном токе должна быть выше, чем при постоянном, одною из причин чего является наличие дорогих трансформаторов и двигателей в однофазных электровозах.

При анализе весовых соотношений у электровозов большое внимание нужно уделять весам электрического оборудования. Полный вес электровоза очень часто диктуется не только механическим расчетом, но и требованиями тягового расчета. Приходится иногда в связи с необходимостью иметь требуемую силу тяги, увеличить общий вес локомотива, дабы избежать боксования колес. Между прочим, одною из главных причин более значительных весов у американских локомотивов является также мощная американская сцепка, требующая большой массивности и прочности от механических их частей.

Рассмотрение новейших типов электровозов показывает, что техника их строительства чрезвычайно быстро прогрессирует. Широкое применение усовершенствованных методов производства, особенно применение электросварки и штамповки, а также внедрение более легких материалов дают возможность резко понижать их веса. В этом отношении очень показателен один из самых последних типов немецких электровозов, приведенный в табл. 80 под номером 14. При мощности в 4 200 PS_h вес его составляет всего лишь 80 t.

Современное течение в деле усовершенствования транспорта характеризуется широким стремлением во всех передовых промышленных странах мира к повышению скоростей на транспорте Эта же задача является одной из актуальнейших и у нас в СССР. Высокие скорости движения являются важнейшим показателем транспортной техники. В связи с указанными тенденциями теперь стоит на очереди вопрос о создании локомотивов высокой скорости. Уже в ряде государств, например, в Германии, первые типы таких электровозов выполнены. Необходимою принадлежностью электровозов высокой скорости является совершенство ходовых их частей надежность токособирания и воздушная обтекаемость их внешних форм.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Параметры электровозов

№	Тип	Система тяги		Мощность		Сила тяги в kg			Скорость в km/h			Вес в t	
		Ток	Напряж.	PS_h	PS_∞	F_h	F_∞	F_{max}	v_h	v_∞	v_{max}	Полн	Сцепн.
1	0-2A-2A-0	ПС	2 400	1 280	1 090	13 600	11 340	21 800	24,8	26,0	80	72,6	72,6
2	0-2A-2A-0	ПС	3 000	560	390	8 900	5 170	15 400	17,0	20,4	57	61,8	61,8
3	0-2A-2A-0	ПС	3 000	1 680	1 600	14 000	13 300	27 200	33,5	34,0	56	91,0	91,0
4	0-2A-2A-0	ПС	1 500	1 400	1 000	12 600	—	—	—	—	—	72,0	72,0
5	0-2A-2A-0	ПС	1 500	1 730	1 310	10 400	7 240	21 600	45,0	49,0	100	64,0	64,0
6	0-2A-2A-0	ПС	3 000	1 200	970	10 560	7 450	19 000	33,3	46,7	72	67,0	67,0
7	0-2A-2A-0	ПС	4 000	775	680	7 100	—	10 500	30,0	—	60	42,0	42,0
8	0-2A-2A-0	ПС	1 500	1 100	1 040	8 020	7 880	15 000	35,2	35,2	65	59,8	59,8
9	0-2A-2A-0	ПС	1 500	900	600	7 500	4 500	—	32,5	36,5	60	50,5	50,5
10	2-2A-2A-2	ПС	1 500	2 400	1 840	13 000	6 200	18 800	50,0	80,0	110	110,0	72,0
11	0-2A-2A-0	ПС	1 500	1 200	960	10 200	7 100	—	32,5	37,0	65	55,0	55,0
12	0-2A-2A-0	ПС	1 500	1 040	990	8 100	7 450	—	34,7	36,0	65	60,0	60,0
13	1-2A-2A-1	ПС	3 000	2 400	—	—	—	—	68,5	—	104	142,0	103,0
14	0-2A-2A-0	ПС	1 500	925	645	—	—	12 000	39,0	44,0	70	46,3	46,3
15	0-2A-2A-0	ПС	1 500	1 800	1 600	—	—	—	50,0	56,0	95	76,0	76,0
16	0-3A-3A-0	ПС	3 000	1 680	1 375	12 700	9 300	25 600	36,4	40,0	65	103,0	103,0
17	0-3A-3A-0	ПС	3 000	1 680	1 350	13 335	9 800	26 535	35,5	37,6	65	105,8	105,8
18	0-3A-3A-0	ПС	3 000	2 760	2 400	24 300	20 000	37 000	30,7	32,0	65	125,0	125,0
19	1-3A-3A-1	ПС	3 000	2 250	1 950	12 750	9 400	—	48,0	51,2	—	115,0	96,0
20	0-2A-2A-2A-0	ПС	3 000	2 735	—	—	—	—	—	—	—	154,5	154,5
21	1-3A-3A-1	ПС	3 000	2 250	2 000	—	—	—	30,4	—	65	115,0	95,0
22	2-3A-3A-2	ПС	1 500	2 100	1 650	12 000	—	—	—	—	100	102,0	54,0
23	2-3A-3A-2	ПС	1 500	2 820	2 130	8 460	5 700	—	90,0	101,0	—	108,8	76,6
24	1-4A-1	ПС	1 500	1 410	—	6 900	5 000	13 000	55,5	61,5	90	69,0	52,0
25	2-4A-2	ПС	1 500	3 600	3 000	14 700	11 100	—	66,0	73,0	130	118,0	72,0
26	2-2A-2A+2A-2A-2	ПС	3 000	3 600	3 170	38 600	32 200	60 200	24,5	25,2	56	260,5	240,0
27	2-3A-2-3A-2	ПС	3 000	4 000	3 200	30 000	22 000	51 000	36,0	—	96	241,0	150,0
28	1-3A-2-3A-2	ПС	3 000	4 680	3 400	30 000	18 000	—	43,0	50,0	105	272,0	171,0
29	1-2A-4A-4A-2A-1	ПС	3 000	3 240	3 000	20 800	19 000	—	44,3	—	104,5	230,1	207,6
30	1-B-B-1	ПС	1 500	1 600	1 230	8 760	6 000	10 500	48,0	53,0	90	79,0	54,0
31	2-B-B-2	ПС	600	2 500	1 590	8 000	4 900	—	73,0	88,5	130	148,8	100,8
32	2-B-B-2	ПС	1 500	3 400	3 000	10 500	—	—	88,0	—	130	128,0	64,0
33	0-3A-3A-0	ПС	3 000	2 760	2 400	20 400	17 000	—	36,5	38,0	75	120,0	120,0
34	0-3A-3A-0	ПС	3 000	3 100	2 650	27 500	22 100	—	29,4	30,4	65	135,0	135,0
35	2-3A-2	ПС	3 000	2 760	2 400	11 000	9 300	17 000	70	73	130	124	69

УДУНТ (ДІІТ)

ЦА 79.

постоянного тока.

Тип передачи	Тип двигателя	Количество двигателей	Тип оборудования	Вес оборудования в t		Дороги	Заводы
				Механического	Электрического		
Зубчатая	ПО	4	Контакт.	45,4	27,2	Bütte Anaconda	GEC
	ПО	4		39,0	28,8	Чилийские	GEC
	ПО	4		52,5	38,0	Бразильские	GEC
	ПО	4		—	—	Южно-французские	TH
	ПО	4		35,0	29,0	Paris — Orléans	MFO
	ПО	4		39,0	27,0	Южно-африканские	MV
	ПО	4		21,5	20,5	Итальянские	BBC
	ПО	4		—	—	Японские	GEC
	ПО	4		28,5	22,0	Острова Явы	AEG
	Сдв.	4		43,0	67,0	Paris — Lion	MFO
	ПО	4		35,5	19,5	Японские	GEC
	ПО	4		37,5	22,5	Японские	GEC
	ПО	4		33,5	58,5	Бразильские	GEC
	ПО	4		26,7	19,0	Испанские	AEG
	ПО	4		42,0	34,0	Южно-французские	CEF
	ПО	6		63,7	39,3	Дороги Чили	GEC
	ПО	6		66,2	39,6	Бразилии	GEC
	ПО	6		67,2	52,8	СССР	GEC
	ПО	6		72,8	42,2	Чили	GEC
	ПО	6		87,0	67,5	Мексики	GEC
	ПО	6		72,8	42,2		GEC
Зубчатая кон.	Сдв.	6		62,0	40,0	Южно-французские	TH
Непос. на оси	Осевой	6		62,0	46,8	Paris — Orléans	GEC
Зубчатая сект.	Опор.	4	Кулачку	42,0	27,0	Нидерландской Индии	BBC
Зубчатая сект.		4		74,0	44,0	Paris — Orléans	BBC
Зубчатая	ПО	8	Контакт.	151,3	109,2	Ch. M. St. P. R.	GEC
Пол. вал. Вест.	Сдв.	6		134,0	107,0		West.
Пол. вал. Вест.		6		166,5	105,5		
Непос. на ось	Осевой	10		129,8	106,6		GEC
Зубчатая рыч.	Опор.	4		—	—	Голландские	AEG
Рычаж. отб. вал.		2		93,0	55,8	Пенсильванские	West.
Рычаж. Kando		2		52,0	76,0	Paris — Orléans	Ganz
Зубчатая	ПО	6		63,0	51,0	СССР	им. Кирова
Зубчатая	ПО	6		—	—	СССР	BBC
Пол. вал.	Сдв.	3		73	51	СССР	им. Кирова

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ТАБЛИ

Параметры электровозов

№	Тип	Система тяги			Мощность		Сила тяги в kg			Скорость в km h		
		Ток	Напряжение	Частота	PS_h	PS_∞	F_h	F_∞	F_{max}	v_h	v_∞	v_{max}
1	0-2A-2A-0	Одн.	8 000	25	320	180	3 900	—	—	22,	—	—
2	0-2A-2A-0	Одн.	15 000	$16^2/_3$	800	400	6 860	3 400	9 300	30,0	—	—
3	0-3A-3A-0	Одн.	15 000	$16^2/_3$	—	1 000	—	6 250	21 000	—	45,0	—
4	1-2A-2A-1	Одн.	11 000	25	1 700	1 350	11 200	7 760	—	42,0	48.0	—
5	1-3A-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	1 800	1 440	7 800	6 300	—	62,0	62,0	75
6	2-3A-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	2 100	1 740	8 300	6 800	10 400	65,0	65,0	90
7	1-2A-1-2A-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	2 400	1 920	11 920	9 680	19 680	54,0	—	75
8	1-2A-2-2A-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	2 630	2 180	11 100	9 100	18 600	61,0	65,0	90
9	1-4A-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	2 400	2 000	—	—	18 500	—	—	110
10	2-4A-1	Одн	15 0 0	$16^2/_3$	2 800	2 470	11 600	10 000	20 000	65,0	66,0	100
11	1-3A-3A-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	3 000	2 650	21 500	17 500	30 000	36,0	39,0	65
12	1-4A-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	3 250	2 550	11 000	8 500	24 000	77,0	77,0	110
13	2-4A-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	3 400	2 600	12 800	6 000	23 000	66,0	110,0	110
14	0-2A-2A-0	Одн.	15 000	$16^2/_3$	4 200	—	19 600	—	—	58,0	—	80
15	1-3A-3A-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	4 500	3 700	24 300	20 000	34 000	50,0	50,0	75
16	1-2A-1-2A-1+1-2A-1-2A-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	7 500	7 000	34 300	—	50 000	59,0	61,0	100
17	1-2A-1-2A-1+1-2A-1-2A-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	8 800	8 300	38 300	—	60 000	62,0	62 0	106
18	0-B-B-0	Одн.	6 000	25	400	230	5 400	3 400	—	20,0	20,0	—
19	0-B-B-0	Одн.	15 000	25	1 000	800	11 400	8 900	14 000	23,0	23,0	60
20	0-D-0	Одн.	15 000	$16^2/_3$	1 130	800	9 500	6 200	18 000	30,5	36,0	60
21	0-E-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	1 170	840	10 600	7 000	17 500	34,5	42,0	50
22	0-B-B-0	Одн.	15 000	$16^2/_3$	1 200	1 000	800	1 300	16 000	34,0	34,0	50
23	0-C-C-0	Одн.	15 000	$16^2/_3$	1 400	1 240	—	10 500	16 500	—	32,3	53
24	1-C-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	1 650	2 310	8 900	7 300	13 500	50,0	—	75
25	1-B-B-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	2 160	1 720	9 700	7 100	16 000	60,0	60,0	75
26	1-C-C-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	2 200	1 700	17 000	13 100	24 000	35,0	35,0	65
27	0-B-B-B-0	Одн.	15 000	$16^2/_3$	—	1 170	—	10 500	20 000	—	30,0	50
28	2-B-B-2	Одн.	15 000	$16^2/_3$	2 250	1 460	—	—	—	—	—	90
29	2-B-B-2	Одн.	15 000	$16^2/_3$	2 260	1 760	8 800	5 700	16 000	60,0	78,0	100
30	1-C-C-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	2 500	1 850	12 500	10 000	16 500	54,0	—	65
31	1-D-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	2 600	1 550	8 200	5 250	18 000	70,0	83,0	—
32	2-C-2	Одн.	15 000	$16^2/_3$	3 000	2 250	10 000	7 500	16 500	—	—	—
33	1-C-C-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	2 700	2 500	22 000	19 000	32 000	33,0	35,0	65
34	1-C-C-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	2 900	2 340	19 000	13 600	29 000	34,0	45,0	60
35	2-C-2	Одн.	15 000	$16^2/_3$	3 000	2 250	10 000	7 500	16 500	75,0	75,0	110
36	2-D-1	Одн.	15 000	$16^2/_3$	3 000	2 250	14 750	9 375	20 000	56,5	65,0	90

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ЦА 80.

однофазного тока.

Вес в t		Тип передачи	Число двигат.	Тип двигателей	Тип оборудования	Вес оборудования в t.			Заводы
Полный	Сцепной					Механического	Электрического	Дороги	
31,5	31,5	Зубчатая	4	ПО	Контр.	—	—	Альбальтальск.	AEG
56,0	56,0	Зубчатая	4	ПО	Контак.	32,0	24,0	Германские	AEG
114,0	114,0	Зубчатая	4	ПО		—	—	„	SSW
100,0	75,0	Полый вал	4	Сдв.	„	52,5	47,5	N. H. H. R. R.	West
82,6	57,0	„	3	„	Кулачк.	39,0	43,0	Швейцарские	Sécheron
92,0	57,0	Зубчатые сект.	3	Опор.	Контр.	49,5	42,5		BBC
113,0	74,0	Полый вал	4	Сдв.	Кулачк.	55,5	57,5		Sécheron
126,8	72,9	Зубчатая сект.	4	Опор.	Контр.	74,2	57,8	„	BBC
110,0	80,0		4			60,0	50,0	Германские	BBC
117,5	80,0	„	4	„	„	63,5	54,0	Швейцарские	BBC
145,0	120,0	Зубчатая	6	ПО	Контак.	73,3	71,7	Германские	AEG
115,0	80,0	Полый вал	4	Опор.		62,0	53,0		AEG
122,0	78,4	„ „	4	„		61,0	61,0		AEG
80,0	80,0	Зубчатая	4	ПО		40,0	40,0	„	BEW
141,6	114,6	Полый вал	6	Сдв.	Кулачк.	77,0	64,0	Швейцарские	Sécheron
245,1	168,2	Зубчатые сект.	8	Опор.	„	130,0	115,0		BBC
247,0	172,0	Полый вал	8	Сдв.	Контак.	132,0	115,0	„	MFO
42,0	42,0	Зубчато-рычажн. с камнем	2	Опор.		25,8	17,0	Valle Bremlana	BBC
68,0	68,0	Зубчато-рычажн. с камнем	2			41,0	27,0	Швейцарские	AEG
68,6	68,6	Зубчато-рычажн.	1	Сдв.		42,1	26,5	Шведские	ASEA
72,1	72,1	„ „	3	Опор.		36,6	35,5	Австрийские	SSW
65,0	65,0	Зубчато-рычажн. с камнем	2			30,5	34,5	Германские	AEG
96,0	96,0	Зубчато-рычажн.	2	Сдв.	Контр.	54,0	42,0	„	BBC
91,0	58,5	„ „	1			46,5	44,5	Швейцарские	MFO
107,6	78,0	Зубчато-рычажн. с камнем	2			49,6	18,0		MFO
129,0	104,0	Зубчато-рычажн.	2	„	„	72,0	57,0	„	MFO
103,0	103,0		3	Опор	Контак.	58,2	44,2	Германские	AEG
129,0	72,0	„	2	Сдв.		64,5	64,5	„	AEG и SSW
123,2	63,2	Зубчато-рычажн. с камнем	2	Опор.		70,6	52,6	Шведские	ASEA
114,7	87,0	Зубчато-рычажн.	2	Сдв.		70,0	44,7	Австрийские	BBC
90,0	68,0	Рычаж. с 2 шатунами	2	Опор.		—	—	Германские	SSW
96,0	96,0	Зубчато-рычажн.	2	Сдв.	„	54,0	42,0	„	BBC
131,0	108,4		4	Опор.	Контр.	77,0	53,4	Швейцарские	MFO
132,0	102,0	„ „	2	Сдв	Контак.	79,0	53,0	Шведские	AEG
118,5	56,0	Рычаж. с двумя отб. валами	1	Опор.		76,5	42,0	Германские	BEW
108,0	66,0		1			58,0	38,0		BEW

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ТАБЛИЦА 81.

Параметры электровозов трехфазного тока и умформерного типа.

№№	Тип	Система тяги			Мощн.		Сила тяги в kg			Скор в km/h			Вес в t		Тип передачи	Тип двигателей	Число двигат.	Тип управления	Вес обор. в t		Дороги	Заводы
		Ток	Напряж.	Частота	PS_h	PS_∞	F_h	F_∞	F_{max}	v_h	v_∞	v_{max}	Полный	Сцепн.					Механического	Электрич.		
1	1-C-1	Трехф.	650	$16^2/_3$	1360	1000	4200	—	—	88	—	95	69	48	Рычаж. с 2 шатунами	Опор.	2	Контак.	43	26	Итальянские	BBC
2	2-C-2		3300	$16^2/_3$	2640	—	9500	—	12000	75	—	100	92	54	Рычаж. с 2 отб. валами		2		49,3	42,7		MFO
3	0-E-0		10000	45	2200	—	10000 12000	—		25 50	—	—	73	73	Зубчато-рычаж.		2		39,7	32,3		BBC
4	0-E-0		3300	$16^3/_3$	2200	—	11500 13000		22000	25 50	—	50	76,5	76,5	Рычаж. Kando		2		38,3	37,2		West
5	1-D-1		10000	45	2360	—	18500 12000 12000	—	19200	37,5 50 75	—	75	94,4	—	Зубчато-рычаж.		2		50	44,4		Ernesto Bredo
6	1-D-1		10000	45	2360	—	6600 6000 8500 7000	—	—	37,5 50 75 100	—	75	90	66			2		50,4	39,6		BBC
7	1-C-1		3300	$16^2/_3$	2780	—	9500	—	12000	75	—	100	73	48	Рычаж. с 2 шатунами		2		33	40		West
8	1-D-1	„	3300	$16^2/^3$	2800	—	10800	—	17000	71	—	75	88,4	69,4	Рыч. 2-звенная	„	2		44	44	Симплонская	BBC
9	1-B-B-1+1-B-B-1	Расщ ф за	11000	25	3600	3000	39000	30800		22,5	22,5	57	245	203,5	Зубчато-рычаж.	Сдв.	4		112,5	94,5	Norfolk West ern	West
10	1-B-B-1+1-B-B-1	Тоже	11000	25	4000	3300	40800	40800	76000	22,5	22,5	57	362	257			4		—	—		
11	1-C-C-1		11000	25	4800	4000	39950	33200	64500	33	33	35	234	199			2		117	117	Пенсильванск.	
12	1-B-B-1+1-B-B-1+1-B-B-1		11000	25	7200	6180	73500	61200	126000	45,4	45,4	—	583	420			6		—	—	Virginia	
13	0-4A-4A+4A-4A-0	Одноф. пост	22000	25	4200	3600	41000	24200	114000	27,5	40	—	335	335	Зубчат.	ПО	16		—	—	Detroit - Toledo	
14	1-D-1	Одноф. трехф. сист	16000	50	2500	2200	—	—	—	24,2 50 75 100	24,5 50 75 100	—	96,5	70	Рычаж. Kando	Опор	1		50,5	46	Венгерские	Ganz
15	0-F-0	Тоже	16000	50	2500	2200	—	—	—	—	16,6 34,3 51,5 68,3	—	96,5	96,5			1		50,5	46		

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ОТДЕЛ ВОСЬМОЙ.

РАБОЧАЯ СЕТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ.

I. СИСТЕМЫ ПОДВОДКИ ТОКА К ПОДВИЖНОМУ СОСТАВУ.

1. Верхний контактный провод.

Основные условия работы контактных систем подводки тока. Под рабочей сетью электрических железных дорог нужно подразумевать ту систему проводов, с помощью которой ток от питательных пунктов подводится к поезду и затем обратно отводится к отсасывающим пунктам. В основе системы, подводящей ток к поезду, должен лежать особый контактный, иначе называемый рабочий провод, который в настоящее время выполняется в виде специального верхнего провода или в виде нижнего, идущего по земле параллельно пути. В последнем случае провод получает жесткую массивную конструкцию с сечением, по большей части напоминающим ходовые рельсы, почему он и носит название третьего контактного рельса. Кроме указанных двух основных систем, существуют еще системы щелевая и контакторная. Однако, эти системы теперь имеют скорее историческое значение, и потому в дальнейшем они будут рассмотрены только в самых общих чертах.

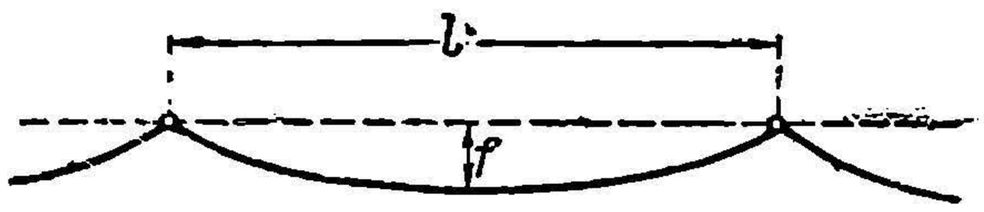


Рис. 534. Схема положения верхнего контактного провода.

Основное затруднение в работе контактных систем заключается в том, что ток при них приходится передавать с помощью скользящего контакта. Условия такого токособирания получаются очень тяжелыми. Переносить через скользящий контакт большие токи при высоких напряжениях, особенно при наличии высоких скоростей, представляет чрезвычайные трудности. Осложнения получаются механического и электрического характера. С механической точки зрения провод и токоприемник вследствие трения подвергаются значительному износу. Неизбежные ударные эффекты токоприемника о провод его усиливают, отзываясь тяжело не только на самом проводе, но и на поддерживающих его изоляторах. В электрическом отношении особенно опасной становится работа контактной системы в моменты отскакивания токоприемника от провода. В такие моменты неизбежно нужно ждать образования вольтовых дуг со всеми теми последствиями, которые они влекут за собою.

Среди систем подводки тока к подвижному составу в настоящее время доминирующее распространение имеет система верхнего контактного провода, к рассмотрению которой и будет приступлено в первую очередь. Рационально предварительно изучить данный вопрос в общем виде, независимо от конструктивных особенностей различных систем подвески провода. Как общее правило, контактный провод тем или другим способом подвешивается к опорным пунктам и натягивается. Независимо от величины натяжения, провод никогда не может принять идеально прямолинейное положение (рис. 534). Всегда у него будет провес, величина которого в основном зависит от силы тяжения провода и расстояния между точками подвеса. Чем больше натяжение провода и меньше расстояние между опорами, тем меньше стрела провеса. Понижение натяжения провода и увеличение пролетов между опорными пунктами, наоборот, увеличивает стрелу провеса. Сильное влияние на провес провода оказывает температура окружающего воздуха. При понижении температуры стрела провеса уменьшается, при повышении температуры стрела провеса возрастает. Увеличивает ее также и возрастание нагрузки на провод.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Провес провода является главной причиной отскакивания токоприемника во время движения. Для надежного токоснимания приемник должен все время вписываться в линию провода, все время быть в соприкосновении с проводом. Наибольшие осложнения получаются во время прохождения мест подвеса провода, где особенно резко нарушается плавный ход линии провода, так что токоприемник очень часто не успевает вписаться в нее. Вследствие инерции пружин и самого токоприемника изменение его положения не поспевает за изгибами провода, и токоприемник перескакивает с одного пролета провода на другой, отрываясь от контактного провода.

При нормальном движении происходит срабатывание провода и токоприемника только за счет трения. В случаях же отскакивания получается более интенсивное разрушение, вызываемое как ударами токоприемника о провод, так и, главным образом, появлением вольтовых дуг в момент размыкания тока при отскакивании токоприемника. При образовании дуги в случае постоянного тока срабатывается положительный электрод вследствие распыления его материала. В рассматриваемом случае большему износу чаще подвергается провод, так как в нормальных условиях по причинам, указанным ниже, он обычно является положительным электродом по отношению к токоприемнику. Вольтовы дуги являются причиной больших осложнений. Как уже было отмечено, в местах отскакивания токоприемника они производят распыление материала провода, что вызывает ослабление его сечения. Еще больше влияние вольтовых дуг сказывается в сильных перегревах провода, в результате которых может получиться изменение структуры металла. В местах отжига металл делается слабым и хрупким, вследствие чего он теряет свою стойкость в работе.

Таким образом, для улучшения процесса токособирания очень важно иметь по возможности малый провес провода. Однако, уменьшение стрелы провеса вызывает увеличение напряжения в проводе, которое приходится ограничивать условиями прочности материала.

Материалы и профили контактных проводов. Совершенно очевидно, что для рациональной работы контактного провода большое значение имеет сорт применяемого материала. Прежде всего материал контактного провода должен иметь большую прочность на разрыв, так как это дает возможность увеличивать его натяжение, а следовательно, уменьшать стрелу провеса. Следует иметь в виду, что допускаемое напряжение в проводе по общему правилу расчетов должно браться с определенным процентным запасом по отношению к разрывному усилию.

Материал должен иметь высокий предел эластичности, т. е. значение того предельного натяжения, при котором провод еще не имеет остаточных удлинений. Это качество материала, как и предыдущее, позволяет давать проводу большее натяжение. Нужно обратить внимание на то, что давать проводу тяжение, превышающее предел эластичности, не допускается.

Материал должен иметь как можно меньший температурный коэфициент, чтобы провес провода мало изменялся с изменением температуры.

Материал не должен подвергаться окислению и разрушению под действием воздуха и дыма. Последнее важно в тех случаях, когда данная железная дорога одновременно работает на электрической и паровой тяге. Особенно это относится к дорогам, имеющим тоннели.

Материал должен обладать высокой электрической проводимостью, что позволяет уменьшить сечение провода.

Материал должен иметь возможно малый удельный вес, что дает меньшее значение удельной нагрузки, а следовательно, меньшую стрелу провеса при одних и тех же условиях натяжения.

Из всех металлов поставленным условиям в совокупности лучше всего удовлетворяет твердотянутая медь, которая в настоящее время для данных целей имеет исключительно широкое применение. Главным преимуществом твердотянутой меди следует считать высокую проводимость, хотя она значительно уступает многим металлам как в отношении прочности, так и по своему сравнительно низкому пределу эластичности.

В Америке иногда вместо меди употребляют в качестве материала для контактного провода специальный состав силлициевой бронзы. Материал этот называется „Phono-Electric“. Он обладает большей прочностью, более высоким пределом эластичности, но проводимость у него значительно ниже, чем у меди.

Значительное распространение начинают теперь получать медно-кадмиевые составы, обладающие большой прочностью и высокой проводимостью. В такие составы

НБ УЛУНТ (ДІІТ)

кадмий по большей части подбавляется в размере 1—1,2%. В некоторых случаях применяют для контактного провода сталь, которая, наряду с хорошей прочностью и значительным пределом эластичности, имеет относительно небольшой удельный вес. Однако, сталь является плохим проводником, вследствие низкого значения удельной проводимости. Для устранения этого недостатка стального контактного провода параллельно с ним по большей части приходится тянуть медный или алюминиевый провод. Для предохранения от окисления стального провода его обычно гальванизируют. В таблице 82 приведены основные данные, характеризующие отдельные материалы, применяемые для верхнего контактного провода и вспомогательных проводов рабочей сети.

ТАБЛИЦА 82.

Материалы, применяемые для рабочих сетей электрических железных дорог.

Материал	Удельный вес	Удельное сопротивление	Предел эластичности в kg/mm²	Разрывное напряжение в kg/mm²	Допустимое напряжение в kg/mm²	Температур. коэфициент	Модуль эластичности
Твердотянутая медь .	8,96	0,0176—0,0184	13—20	38—40	12	$1{,}68\ 10^{-5}$	13 300
Phono-Electric	—	0,0383	40	57	—	—	10 700
Сталь .	7,80	0,15—0,17	52	120—140	—	$1{,}22\ 10^{-5}$	20 000
Бронза . .	8,65	0,0177—0,05	13—40	46—80	20—28	$1{,}75\ 10^{-5}$	12 000
Алюминий .	2,70	0,0287	8—10	18—26	8—9	$2{,}30\ 10^{-5}$	7 300

Важным вопросом при конструировании контактного провода является придание его сечению наиболее удобного профиля. Наиболее распространенными профилями в настоящее время являются восьмеркообразные типы, показанные на рис. 535 под литерами *a* и *b*. Широкое распространение таких профилей объясняется удобством их крепления и подвешивания, осуществляемых с помощью клемм без всякой пайки.

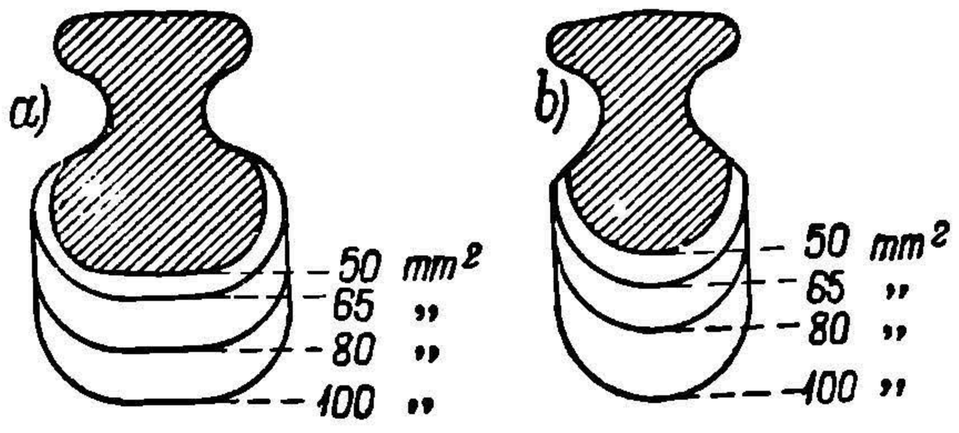


Рис. 535. Восьмеркообразные профили контактных проводов.

Большими техническими достоинствами обладает желобчато-круглый профиль (рис. 536). Представляя такие же удобства, как и восьмеркообразные, в отношении крепления он имеет преимущество с точки зрения уменьшения давления на него ветра, что особенно важно в условиях загородных дорог, полотно которых обычно идет по открытой местности, хорошо доступной ветрам. По исследованиям государственных дорог Германии понижение эффекта давления ветра при кругло-желобчатой форме достигает 20—40%.

Из особых профилей некоторое распространение в Англии получает круглый профиль с внутренним жолобом (рис. 536). Этот профиль несмотря на круглую форму,

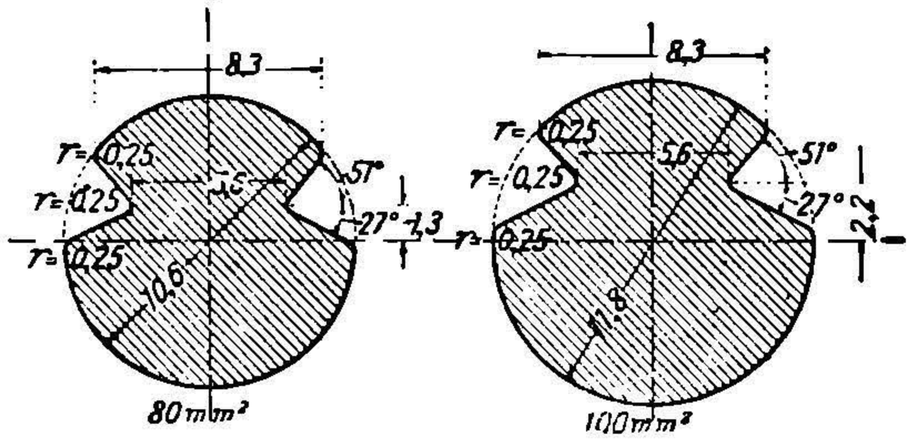


Рис. 536. Круглые профили контактных проводов с внешними и внутренними жолобами.

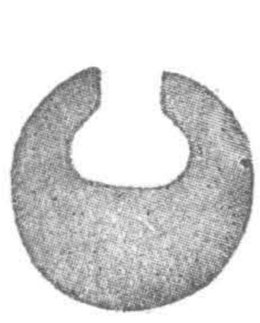




Рис. 537. Контактный провод из меди со вставкой из бронзы.

позволяет достаточно удобно осуществлять подвеску с помощью специальных клемм без впайки. Особо следует отметить попытку применить профиль типа рис. 537 Она продиктована стремлением одновременно с хорошей проводимостью провода,

НБ УДУНТ (ДІІТ)

обеспечиваемой его медной частью, получить и высокую сопротивляемость износу посредством прочной бронзовой части, впрессованной в медь. Большого, однако, распространения последняя система пока не получила из-за относительно сложного процесса ее производства.

По большей части сечения контактных проводов колеблются от 50 до 120 mm^2. Без спайки длина отдельных кусков провода обычно бывает от 250 до 500 m. При выборе величин сечения контактных проводов приходится руководствоваться, помимо требований в отношении допустимых падений напряжений, условиями механического износа. По этим условиям, дабы не слишком часто менять провода, сечения последних теперь не берут ниже 50 mm^2 и даже 65 mm^2.

В европейской практике приняты следующие сечения:

50 mm^2; 60—65 mm^2; 80—85 mm^2; 100—105 mm^2; 120 mm^2.

В Америке, сечения, марки которых обозначаются нулями, берутся следующие:

$$\frac{53\ mm^2}{0};\quad \frac{67\ mm^2}{00};\quad \frac{85\ mm^2}{000};\quad \frac{107\ mm^2}{0000}.$$

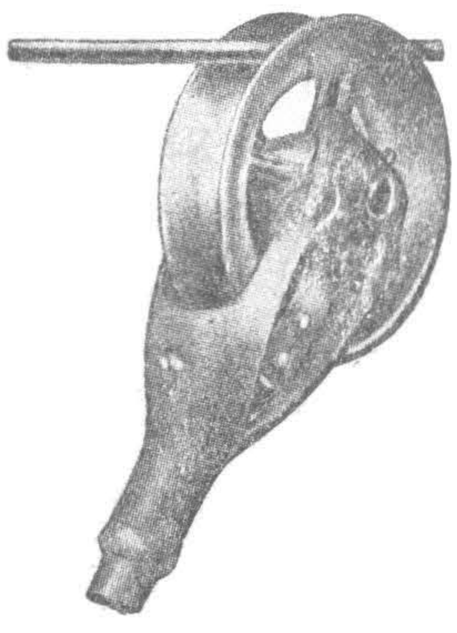


Рис. 538. Роликовый токособиратель.

В трамвайной практике наиболее ходовыми сечениями являются 65—85 mm^2. В практике загородных железных дорог для главных путей применяются преимущественно сечения 100—107 mm^2, а для второстепенных и специальных путей 80—85 mm^2.

Процесс токособирания. Передача тока от контактного провода к токоприемнику в настоящее время осуществляется почти исключительно двумя способами—с помощью катящегося ролика и скользящей дуги. Роликовая система (рис. 538) имеет преимущество вследствие уменьшения потерь на трение, так как в данном случае приходится иметь дело с трением второго рода — качением. Однако, наряду с этим преимуществом ролик имеет целый ряд существенных недочетов. Одним из главнейших недостатков является склонность его к соскакиванию с провода, сопровождающемуся очень часто обрывом как самого провода, так и вспомогательных оттяжных тросов. Такие аварии сопровождаются почти всегда приостановкой движения на линии, что крайне тяжело отзывается на общей эксплоатации предприятия.

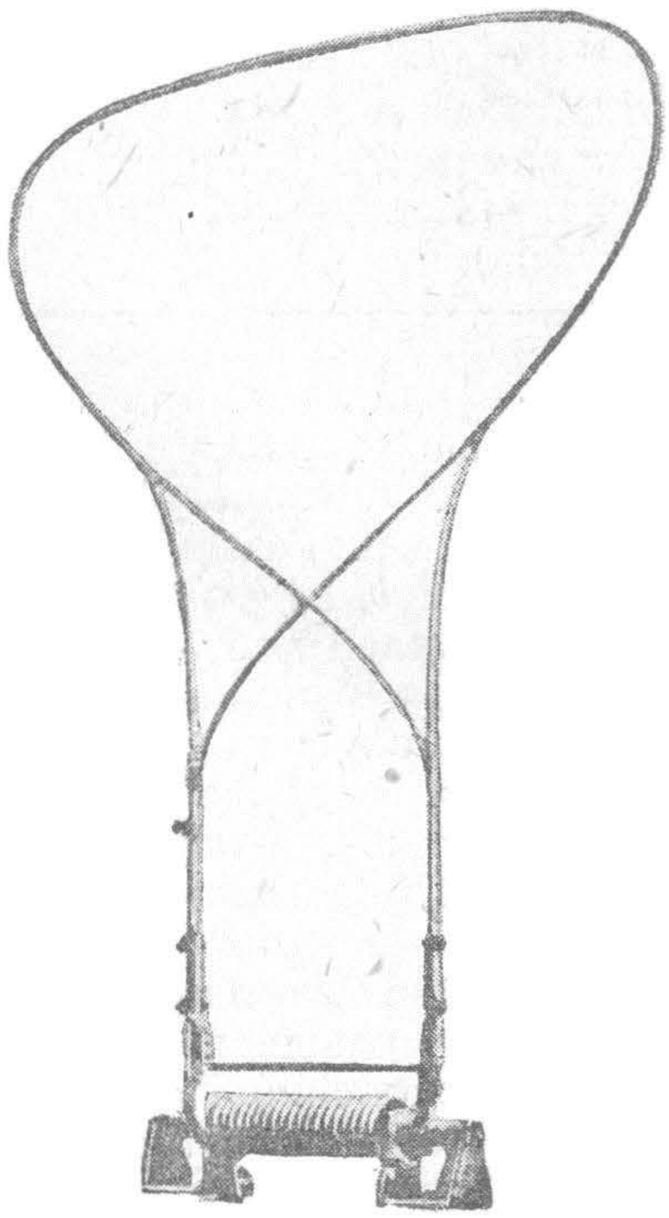


Рис. 539. Бюгельный токоприемник SSW.

Другим важным недостатком роликового токособирания является сложность контактного провода. Прежде всего при его выполнении приходится быть очень осмотрительным в отношении клемм, поддерживающих провод. Если не принять надлежащих мер, ролик своими закраинами может их задевать. Особенно осложняется конструкция контактного провода на кривых, стрелках и крестовинах. Здесь опасность соскакивания ролика особенно велика. В результате контактная сеть при ролике получается дорогой как в отношении своего первоначального сооружения, так и в отношении стоимости ремонта и содержания.

Токособирание с помощью контактной дуги имеет существенные преимущества (рис. 539). Благодаря значительной длине дуги опасность ее соскакивания снижается до минимума. Не имея выступающих закраин, охватывающих провод, дуга не требует такой тщательности монтажа провода. Необходимо только позаботиться о том, чтобы при первоначальном монтаже проводов были достаточно приподняты оттяжки и кронштейны опор, чтобы дуга не могла за них задевать своими концами.

Как уже было отмечено, дуга, работая на принципе скольжения, дает большие потери на трение, чем ролик. Однако, эта разница при больших скоростях, когда коэфициент трения скольжения снижается, становится не особенно ощутимой. Ее

НТБ УГЛУНТ (ДІІТ)

уменьшает еще и то, что для предотвращения соскакивания ролика с провода приходится при нем давать токоприемнику на провод большее давление по сравнению с дугой. Давление это берется в среднем раза в два выше, что, естественно, влечет за собою и повышение потерь на трение, пропорциональных давлению.

Ввиду указанных преимуществ дуговые токоприемники в современных установках имеют очень большое применение. Роликовые токоприемники преимущественно удерживаются в части трамваев, проникнув туда когда не были еще выяснены преимущества дуги, или когда о последней не имели еще данных, так как ролик вошел в практику значительно раньше. Преимущества дуговых токоприемников побуждали некоторые государства уже в период эксплоатации переходить на них, заменяя ролики. Примером может служить Швейцария; где большое количество трамваев перешло на дугу. В настоящее время роликовые токоприемники удерживаются, главным образом, на трамваях в Америке и Англии.

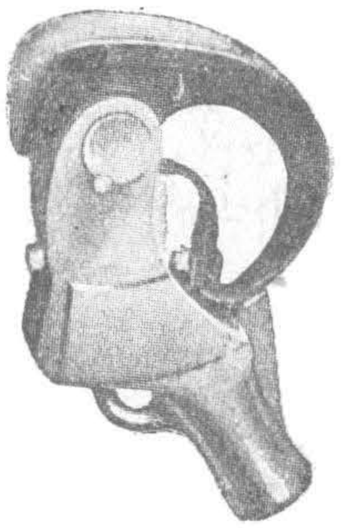


Рис. 540. Башмачный токособиратель.

Стремлением избавиться от осложнений в эксплоатации, вызываемых роликами, объясняется появление башмачных токоприемников (рис. 540). При переходе на них не требуется менять самого основания токоприемника и не требуется никаких переделок в контактном проводе. Такие мотивы, например, послужили поводом к подобным экспериментам в Бостоне. По имеющимся в литературе данным опыты дали достаточно удовлетворительные результаты. Число сходов токоприемников значительно понизилось. Однако, рациональность применения башмачных токоприемников возбуждает большие сомнения, так как совершенно очевидно, что они имеют ряд существенных недостатков.

Следует обратить внимание, что процесс токособирания сопровождается потерями Потери эти — частично механического характера и частично — электрического. Механические потери вызываются трением скользящего контакта о провод. Электрические потери объясняются потерями напряжения в местах контактов. При роликовом токоприемнике места таких переходных потерь получаются в контакте между проводом и телом ролика, а затем между осью ролика и штангой. При дугообразных токоприемниках потери получаются только в первом месте. Представление о порядке величины переходных потерь может дать табл. 83.

ТАБЛИЦА 83.

Переходные потери в роликовом токоприемнике.

Скорость поезда в km/h	Электрические переходные потери в W		Потери на трение в W	Пояснение
	От провода к ролику	От оси ролика к штанге		
16	10	13	20	Ток 100 А. Давление токоприемника на провод 13,7 kg. При скоростях порядка 55—75 km/h общие потери доходили до 400 W. В периоды образования вольтовых дуг они поднимались до 15 kW
24	50	17	26	
32	80	40	36	
40	120	80	50	

Важное значение при планировании токособирания имеют предельные величины токов, которые можно снимать с одного токоприемника. Естественно, что особенно больших ограничений в этом отношении нужно ждать при больших скоростях. Допускаемые на один токоприемник токи, по американским данным, имеют для роликового токоприемника следующие величины:

v km/h	8	16	32	64	96	Примечание
I_{max}	1 000	850	650	400	200	Давление на провод 6,5—18 kg

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Для дугообразных токоприемников железнодорожн. типа имеются данные Hobart'a:

v km/h	16	32	48	64	100
I_{max}	1 200	900	600	450	300

При двух токоприемниках Hobart рекомендует брать значение общих токов на 75% выше, чем при одном.

Очень интересны опыты по токособиранию, произведенные в Америке (GEC). Было обнаружено, что один токоприемник при скоростях порядка 80 km/h способен снимать без особо тяжелых последствий до 5000 A. При скоростях до 100—110 km/h один токоприемник свободно брал 2000 A, а два—4000 A Несмотря, однако, на это, американцы для нормальных подвесок не рекомендуют при одном токоприемнике длительно брать выше 1000 A и кратковременно 1500 A. Для подвесок же особо совершенного типа эти цифры поднимаются до 2000 и 2700 A. Опыты показали, что повышение давления токоприемников от 8,7 до 14,5 kg существенного влияния на качество токособирания не оказывает. Смазка токоприемников ухудшала контакт

2. Простые подвески контактного провода.

При небольших скоростях и относительно небольших токах может применяться обыкновенная простая подвеска. Сущность этой подвески сводится к тому, что провод подвешивается с помощью промежуточных изоляторов к опорам. Опоры могут быть с кронштейнами и устанавливаются между путями или же они размещаются по бокам пути. Провод подвешивается, как это указано на рис. 541. В некоторых случаях провод может подвешиваться к стенам зданий, идущих вдоль улицы (рис. 542). Расстояние между опорными точками подвеса колеблется в пределах от 30 до 40 m. Высота подвеса провода чаще всего берется в пределах от 5 до 6,5 m. Только в исключительных случаях, как например, под мостами и виадуками, эту величину можно снижать до 4,2—4,5 m. Провод поддерживается путем особых клемм (рис. 543), которые крепятся к специальным изоляторам-держателям для подвески к поддерживающим устройствам. Наиболее распространенные типы изоляторов-держателей приведены на рис. 544, 545 и 546. Первые типы (рис. 544 и 545) применяются при дуговых токоприемниках, второй (рис. 546) — при роликовых. Как общее

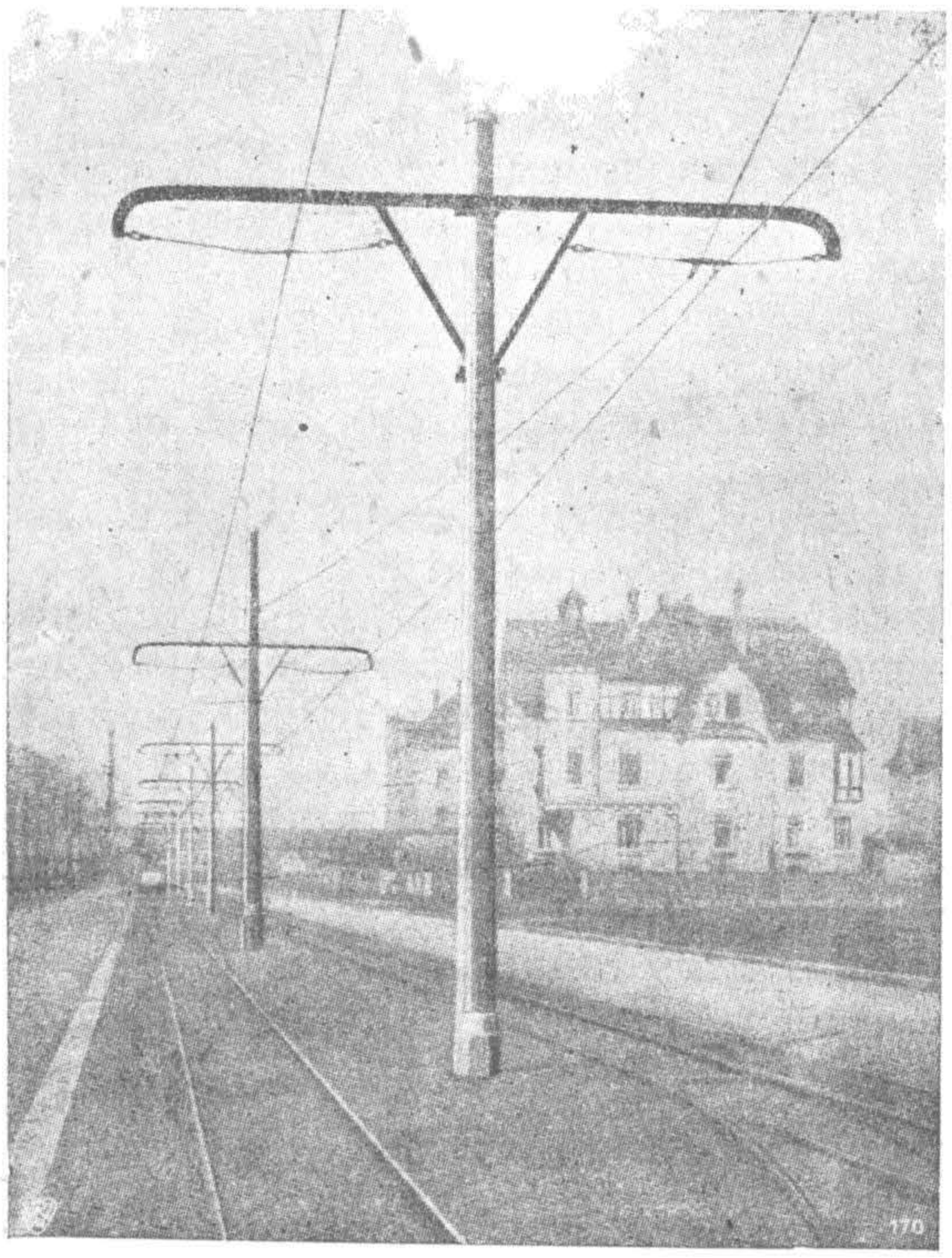


Рис. 541. Простая подвеска контактного провода

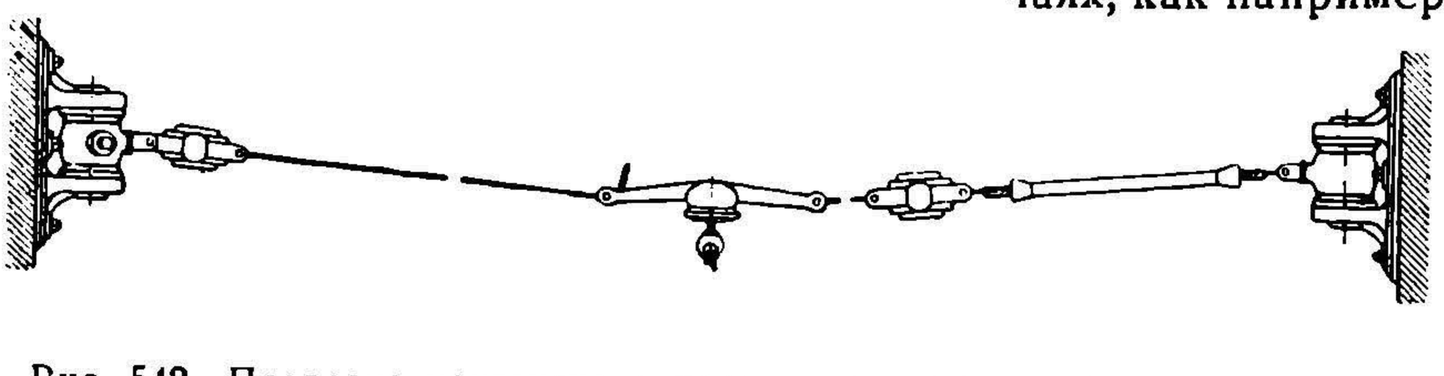


Рис. 542. Подвеска контактного провода с помощью стенных розеток.

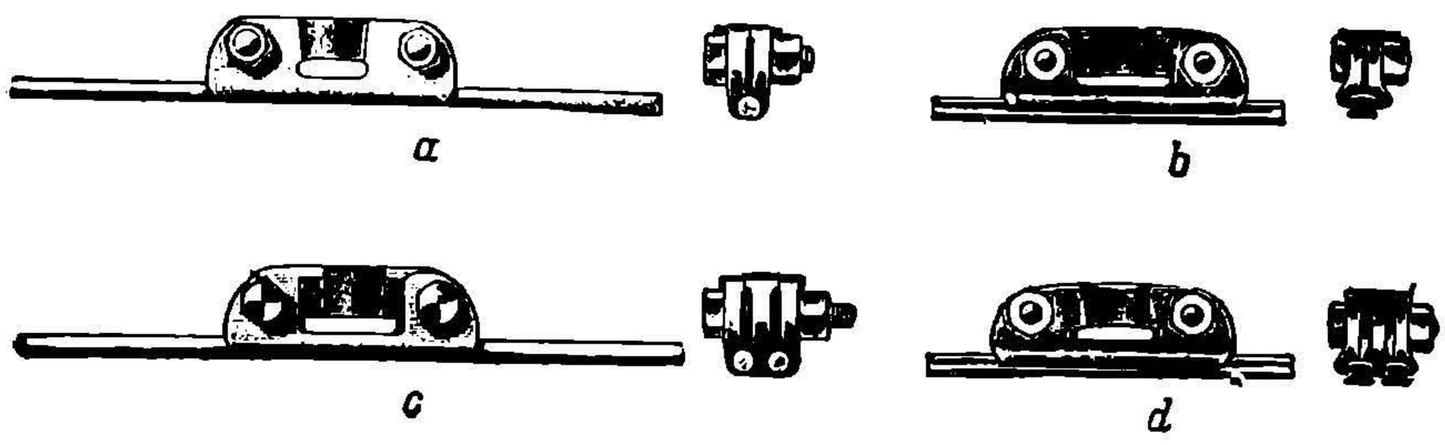


Рис. 543. Клеммы для подвешивания контактного провода

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

правило, изолятор-держатель состоит из изоляторного болта и держательной обоймы. Зажимные клеммы по большей части выполняются или из бронзы, или из латуни. Скре-



Рис. 544. Изоляторы-держатели для контактного провода

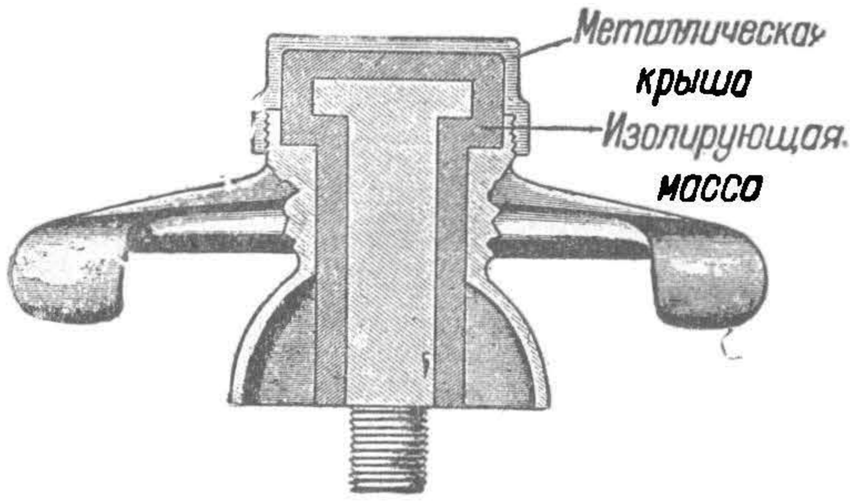


Рис. 545. Разрез изолятора-держателя при дуговом токоприемнике.

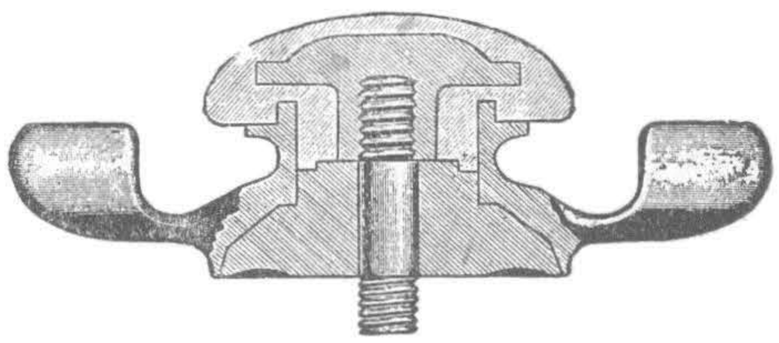


Рис. 546. Разрез изолятора-держателя при роликовом токособирателе.

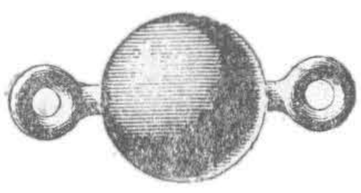


Рис. 547. Оттяжной изолятор шарового типа.

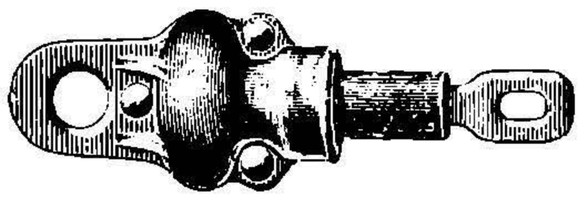


Рис. 548. Оттяжной изолятор с изолированным болтом.

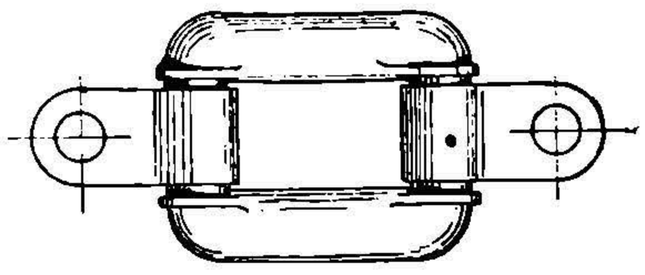


Рис. 549. Пряжечный оттяжной изолятор

пление производится винтами. Кроме изоляторов-держателей, для лучшей изоляции в поддерживающие поперечные тросы вставляются оттяжные или боковые изоляторы. Таким образом, получается система двойной изоляции. На рис. 547, 548 и 549 приведены наиболее распространенные системы оттяжных изоляторов. Кроме этих типов, в настоящее время широко начинают применяться изоляторы орешкового типа.

Для фиксации и натяжения провода приходится через определенные расстояния наглухо крепить его к опорным пунктам. Такое крепление носит общее название анкеровки. Такая анкеровка показана на рис. 550. Расстояние между анкерными пунктами берется нормально в пределах от 1000 до 2000 m. Кроме такой регулярной анкеровки, провода иногда приходится подвергать еще анкеровке дополнительной, что, например, может иметь место на переходах с одного пути на другой (рис. 551).

Трамвайная сеть в электрическом отношении разделяется на отдельные уча-

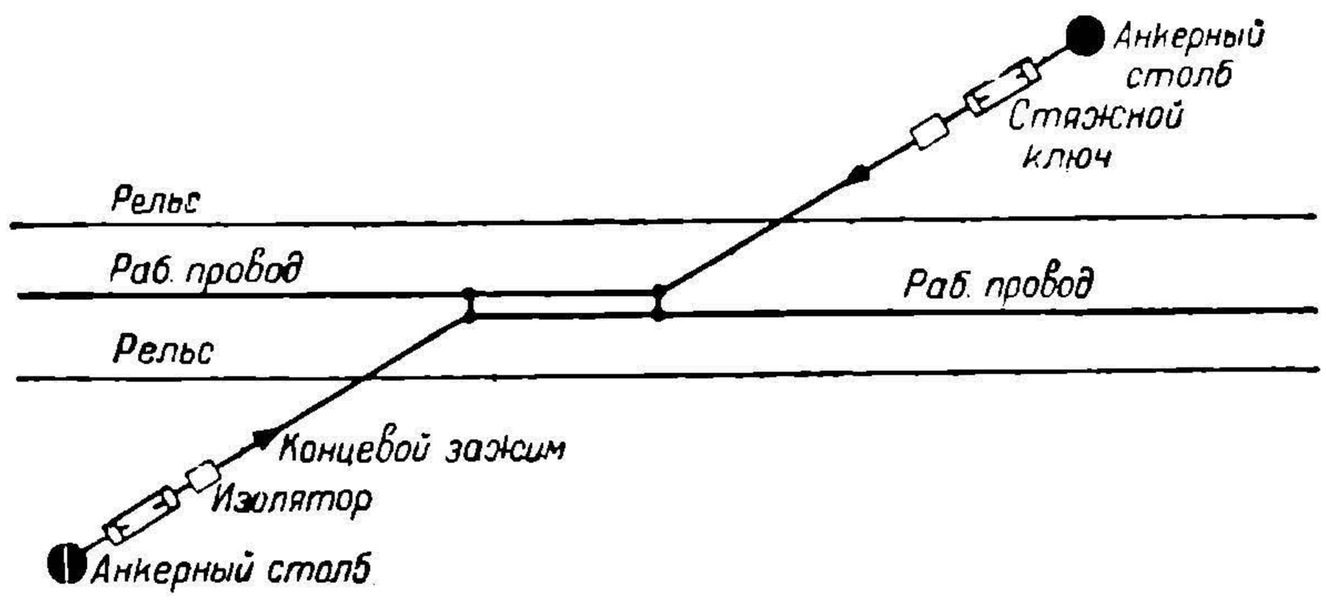


Рис. 550. Схема анкеровки контактного провода на прямом участке.

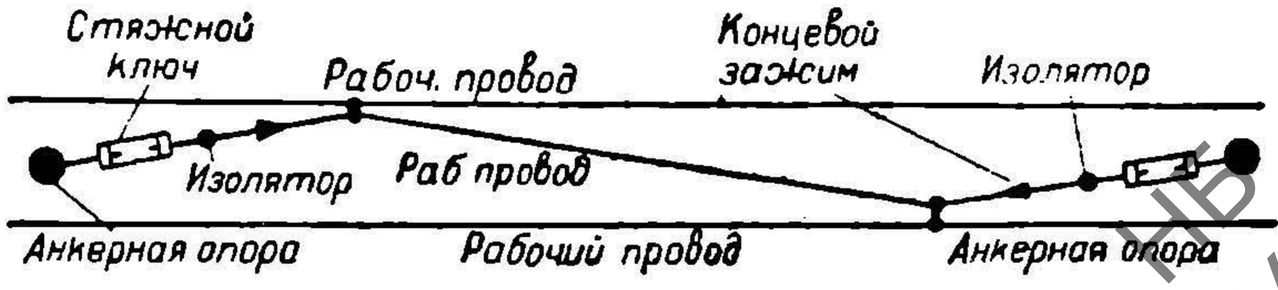


Рис. 551. Анкеровка контактного провода на переходах с одного пути на другой.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

стки, что дает возможность при авариях отключать только неисправные участки, не приостанавливая движения на всей линии. Кроме того, такая система позволяет постепенно включать или выключать нагрузку от электрической станции или подстанций. В качестве участкового делителя, иначе называемого секционным изолятором, в трамвае служит делитель с деревянным промежутком, подобно изображенным на рис. 552 и 553. При монтировке делителей приходится считаться с их относительно большим весом и трудностью крепления подведенных к ним проводов. В некоторых случаях приходится прибегать к двойной анкеровке, как показано на рис. 554. Для натяжения провода и регулировки этого натяжения употребляются специальные натяжные ключи (рис. 555). В качестве материала для поперечных и натяжных тросов обычно применяют оцинкованный стальной трос или специальную проволоку, диаметром в пределах от 4 до 10 mm, причем для поперечных тросов наиболее подходящим является диаметр 5 mm, а для оттяжных — 6 mm. Разрывное усилие материала троса около 80—110 kg/mm². Контактный провод подвешивается таким образом, что в плане получается зигзагообразная линия.

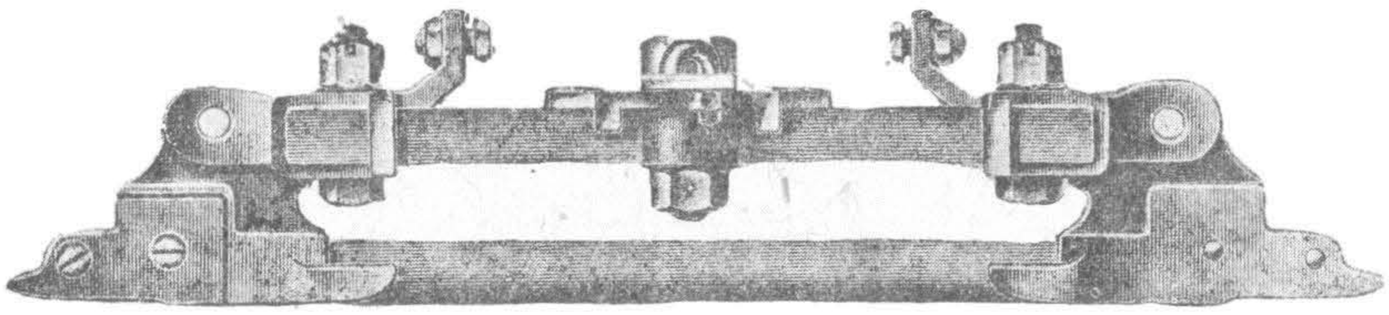


Рис. 552. Участковый делитель трамвайного типа.

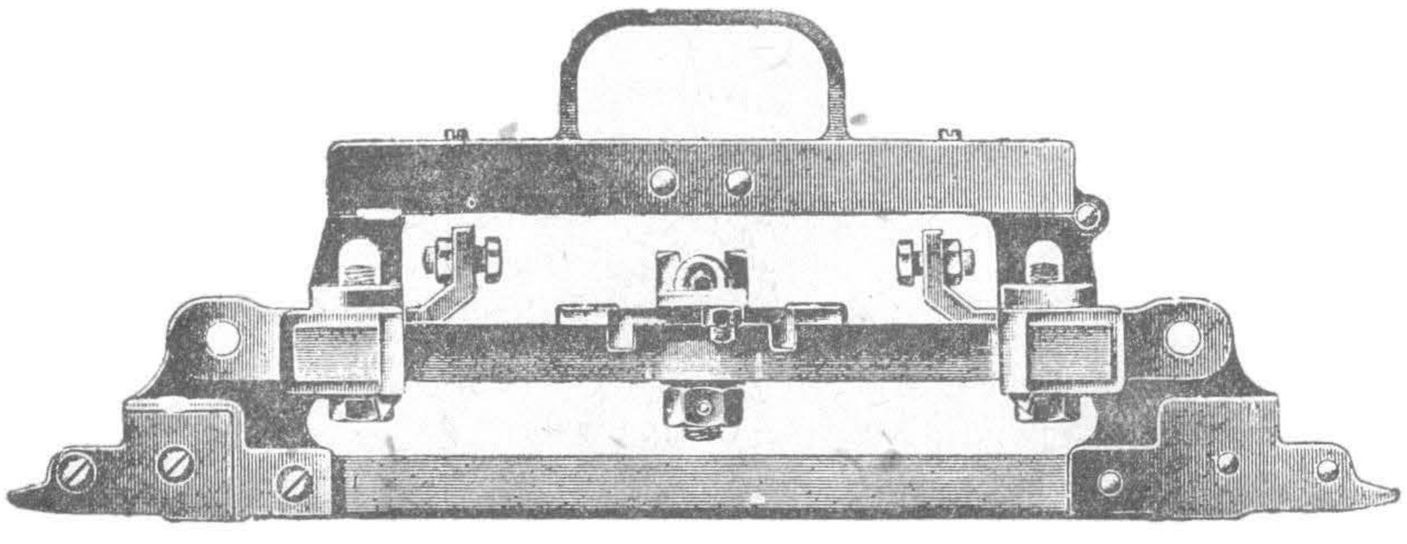


Рис. 553. Участковый делитель контактного провода

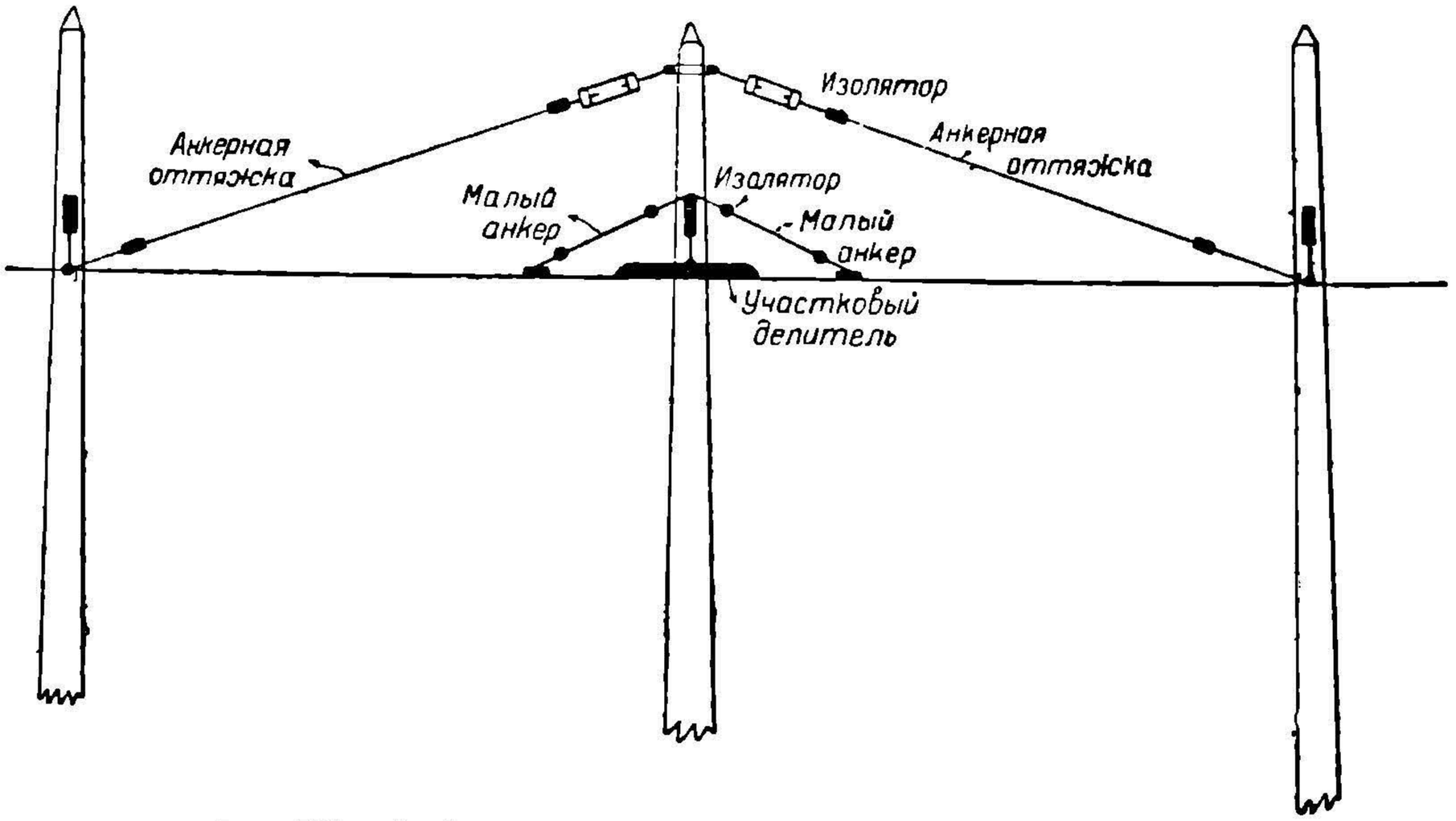


Рис. 554. Двойная анкеровка проводов у участкового делителя.

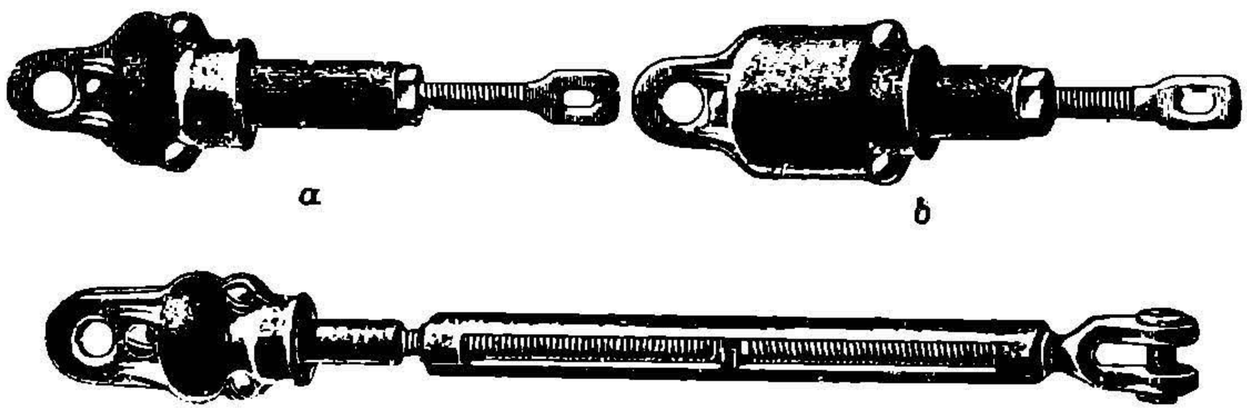


Рис. 555. Натяжной ключ.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Изгибы провода в плане делаются чаще всего через 3—8 пролетов. Зигзагообразный способ подвешивания провода дает более равномерный износ дуги токоприемника по всей ее длине. На прямых участках пути разбивка провода производится примерно так, как изображено на рис. 556. Величина отклонения провода в плане от осевой линии пути берется в зависимости от типа токоприемника Для трамвая, у которого полная длина дуги бюгеля — порядка 1100—1 200 mm, а рабочая часть — около 900—1 000 mm, отклонение провода от оси пути может быть от 300 до 450 mm. При роликах зигзаг, естественно, не применяется.

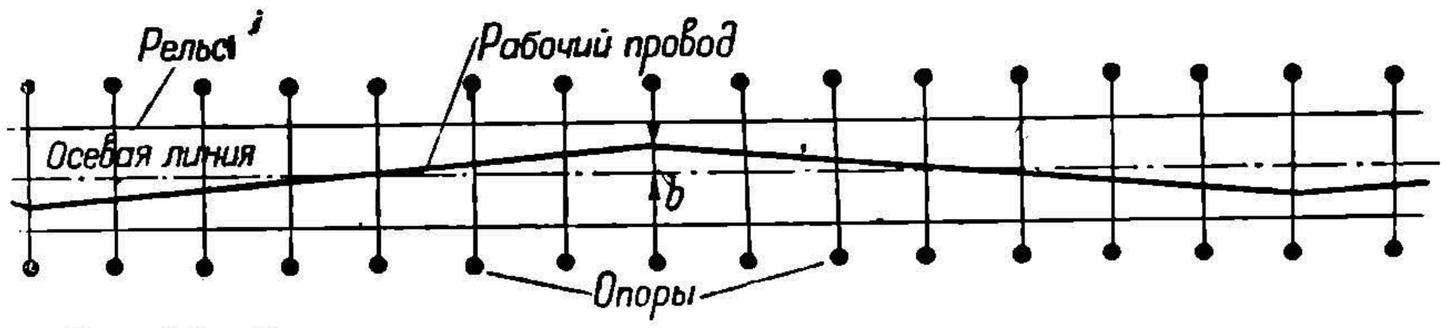


Рис. 556. Расположение контактного провода в плане при зигзаге.

Разбивка провода на кривых участках пути производится с таким расчетом, чтобы токоприемник не мог соскакивать с провода. Провод на кривой разбивается по сторонам многоугольника, вписанного между двумя концентрическими предельными окружностями, отстоящими от осевой линии пути на e_1 и e_2 (рис. 557). Предельные окружности дают такое положение контактного провода, при котором ролик или дуга находятся с ним еще в соприкосновении. Так как на кривой токоприемник благодаря своему естественному стремлению имеет тенденцию отклоняться на внешнюю сторону кривой, то предельные окружности должны быть расположены несимметрично относительно осевой линии, т. е. $e_1 > e_2$. Радиусы предельных окружностей дугового токоприемника с достаточной для практики точностью могут быть определены из выражений:

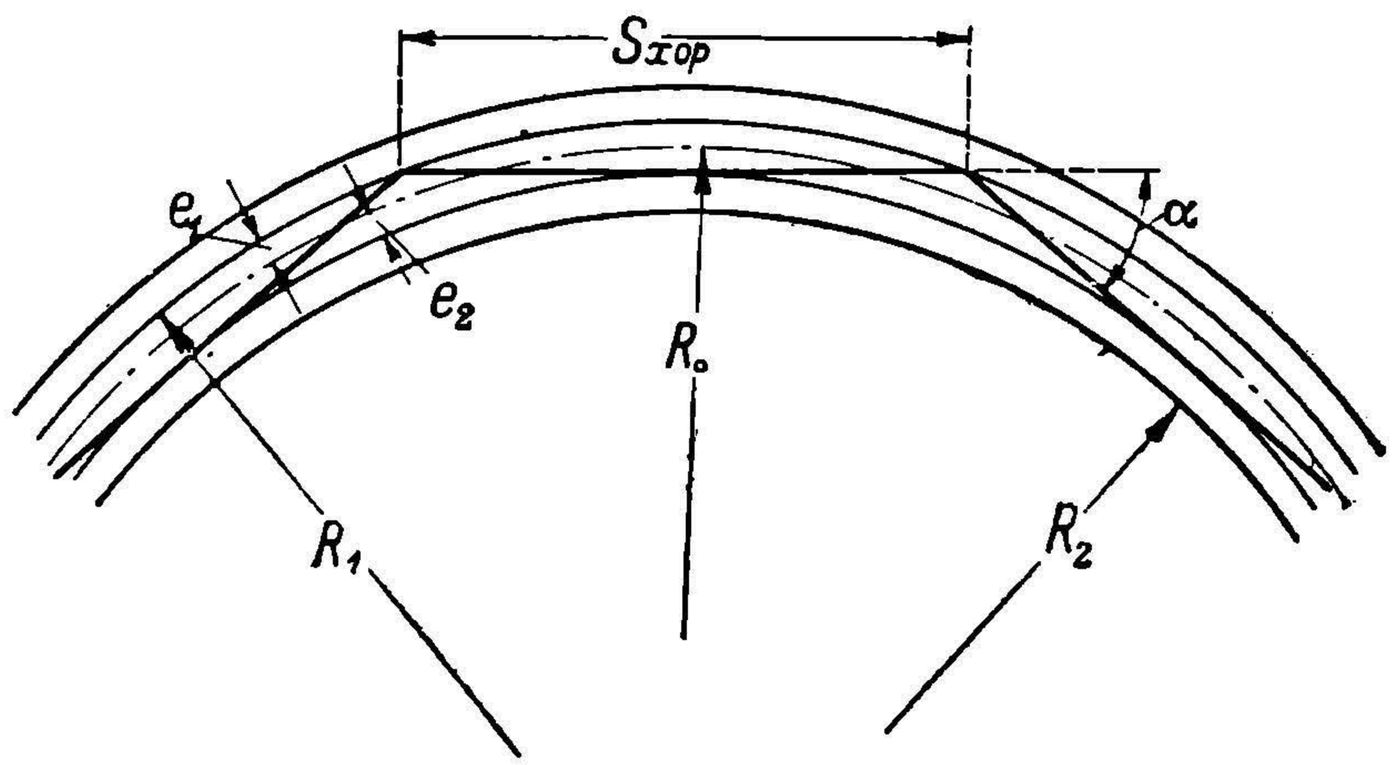


Рис. 557 Схема разбивки контактного провода на кривой.

$$\left.\begin{aligned} R_1 &= R_0 + e_1 \\ R_2 &= R_0 - e_2 \end{aligned}\right\}, \tag{479}$$

где

$$e_1 = e_2 + \delta$$

при

$$\delta = 40 - 50 \text{ mm}.$$

Расстояние между вершинами многоугольника или точками подвеса провода ориентировочно можно определить также по формуле:

$$S_{хор} = 2{,}8\sqrt{R_0 L}, \tag{479-а}$$

где L, рабочая длина дуги токоприемника, определяется выражением:

$$L = e_1 + e_2.$$

Для ролика допускаемый вынос, естественно, должен быть значительно меньше причем радиусы предельных окружностей для него могут браться равными:

$$\left.\begin{aligned} R_1 &= R_0 + a \\ R_2 &= R_0 - 0{,}2a \end{aligned}\right\}, \tag{480}$$

где

$$a \cong 300 \text{ mm}.$$

Величина стороны многоугольника часто определяется согласно выражению:

$$S_{хор} = 1{,}4\sqrt{R_0} \tag{480-а}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Угол перегиба провода на кривой для ролика, в целях уменьшения опасности его соскакивания, нормально подчиняют требованию:

$$\alpha \leqslant 11^{\circ}.$$

Особо следует обратить внимание на разбивку провода для стрелочных переводов. При дуге эта разбивка производится с помощью соответственно выбранной анкеровки и не требует особого усложнения самой контактной системы. Значительно сложнее дело обстоит при роликовом токоприемнике. Прохождение его по стрелочным переводам может быть более или менее удовлетворительно только при применении специальных воздушных стрелок (рис. 558). Как видно из данного рисунка, стрелки имеют направляющие грани, с помощью которых ролик направляется по

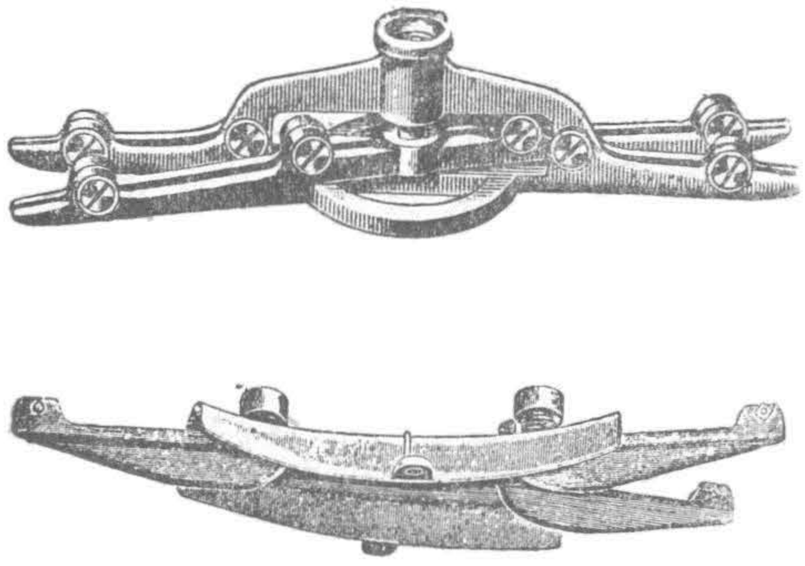


Рис. 558. Воздушные стрелки при роликовом токособирателе.

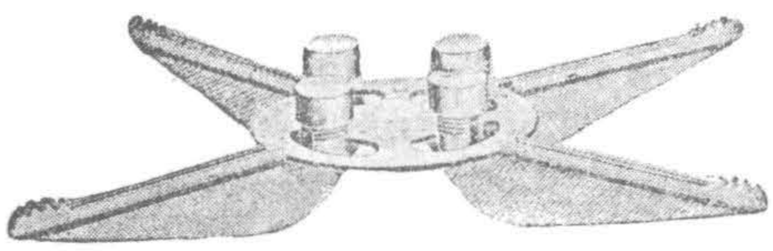


Рис. 559. Воздушная крестовина при роликовом токособирателе.

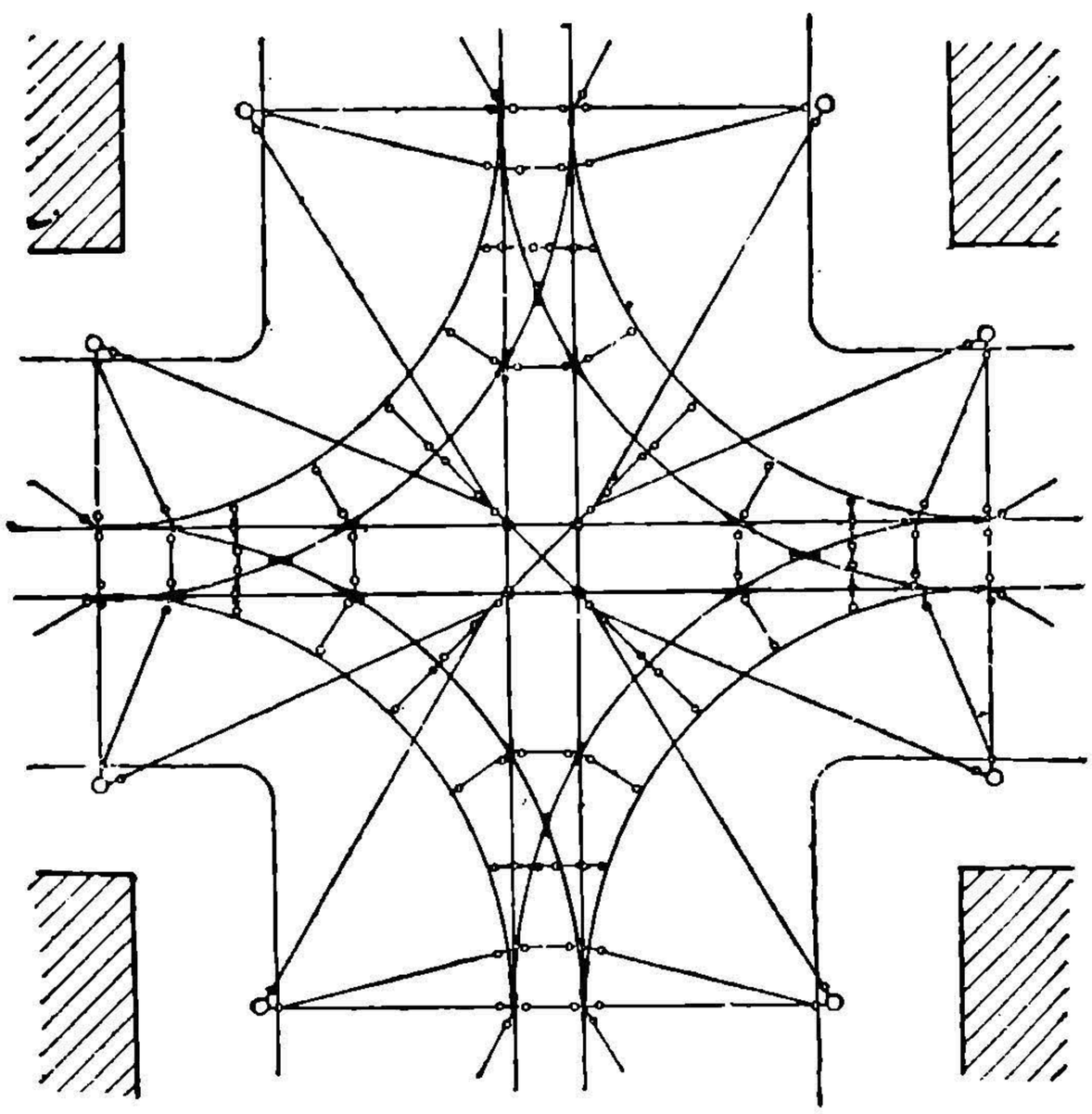


Рис. 560. Разбивка контактного провода при сложном разветвлении путей.

нужному пути, пробегая без них только небольшой участок, на протяжении которого он не успевает потерять свое правильное направление. То же, что о стрелках, следует сказать и о крестовинах, применяемых при пересечениях отдельных путей. Для ролика здесь также необходимы довольно тяжелые и сложные конструкции с направляющими ребрами (рис. 559).

При разветвлениях путей разбивка провода часто приобретает очень сложный характер. На рис. 560 приведена одна из таких схем для промежуточного участка трамвайного пути со сложным разветвлением. Рис. 561 дает представление о разбивке провода для кольца. При выполнении подобного рода схем следует стремиться к уменьшению числа опор, присоединяя к одной и той же опоре как можно больше отдельных оттяжек. При этом, однако, нужно помнить, что каждая отдельная оттяжка должна итти по направлению того усилия, которое она принимает на себя. При группировке нескольких оттяжек в одну нужно придерживаться того же правила. Объединяющая оттяжка должна итти по направлению равнодействующей всех усилий отдельных оттяжек ее составляющих. Направления оттяжек и точек присоединения их к опорам при проектировании приходится определять, пользуясь методами теоретической механики и начертательной геометрии.

3. Цепные подвески контактного провода.

Простая трамвайная подвеска, вследствие относительно большого расстояния между пунктами, поддерживающими провод, дает значительный провес, сильно колеблющийся с изменением температуры. В механическом отношении эта подвеска также

НБ УЛУНТ (ДІТ)

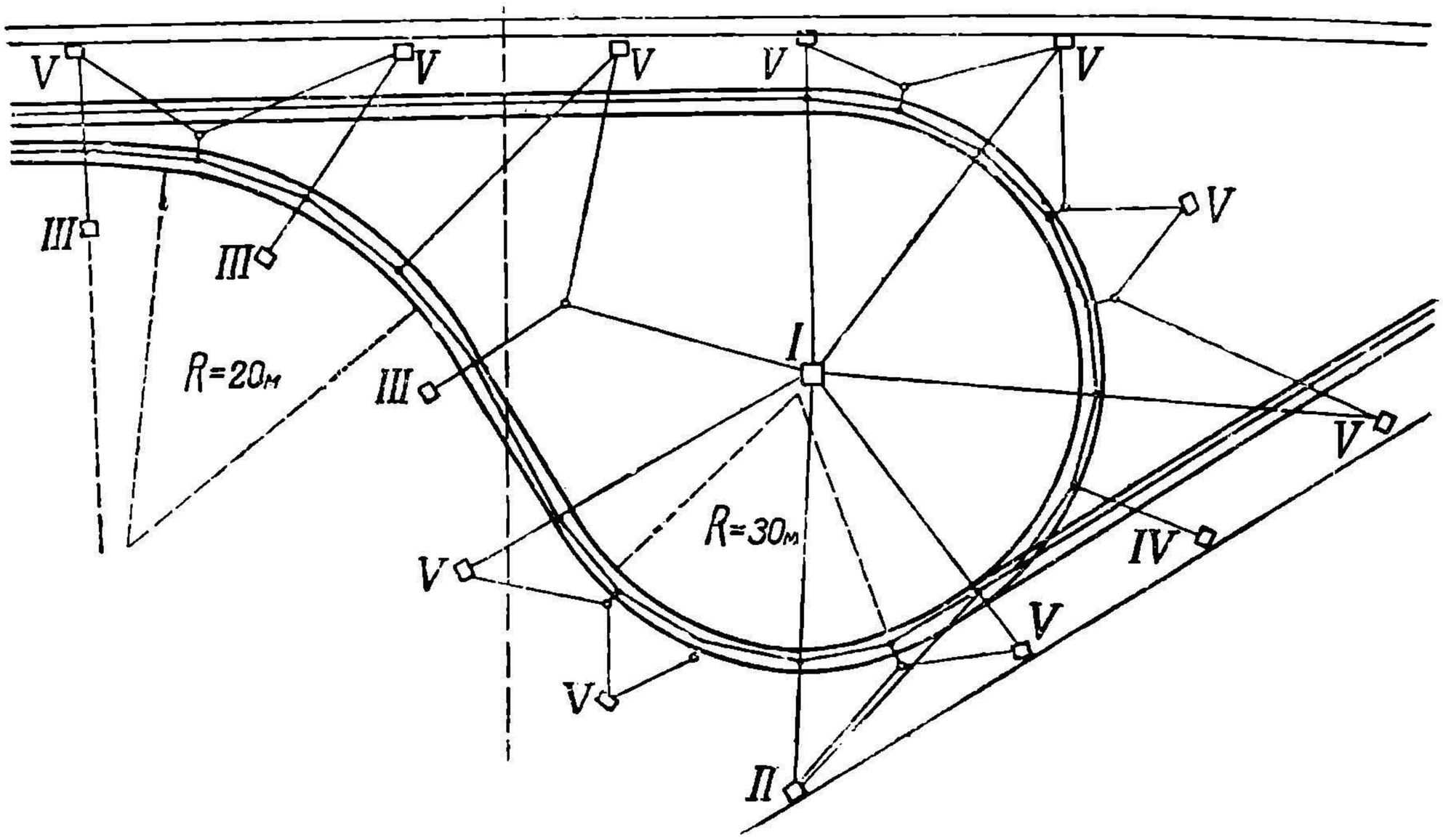


Рис. 561. Разбивка контактного провода на кольце.

не отличается высокими качествами. Кроме того, при высоких напряжениях встречаются большие затруднения со стороны изоляции. Главная область применения простых подвесок — трамваи, индустриальные железные дороги и вообще пути, на которых движение идет с относительно небольшими скоростями.

Вследствие указанных недочетов простой подвески в железнодорожной практике при больших скоростях движения, больших токах и высоких напряжениях применяют так называемые цепные системы подвесок. Сущность их конструкции заключается в том, что вдоль пути протягивается особый опорный или, как его иначе называют, несущий трос, присоединяемый через соответствующие изоляторы к опорам, и уже к этому опорному тросу подвешивается рабочий контактный провод. Так как расстояния между точками подвеса рабочего провода к тросу могут быть взяты относительно небольшими, то и провес его может быть получен сравнительно небольшим (рис. 562).

При анализе работы цепной подвески необходимо отличать указанный провес самого контактного провода от провеса всей системы, определяемого провисанием троса. Провес последнего может достигать больших значений. Однако, это обстоятельство непосредственно не отражается на токособирании, так как для надежного съема тока важна, главным образом, правильная линия контактного провода. Особенно важно, чтобы она не имела больших перегибов в точках подвеса.

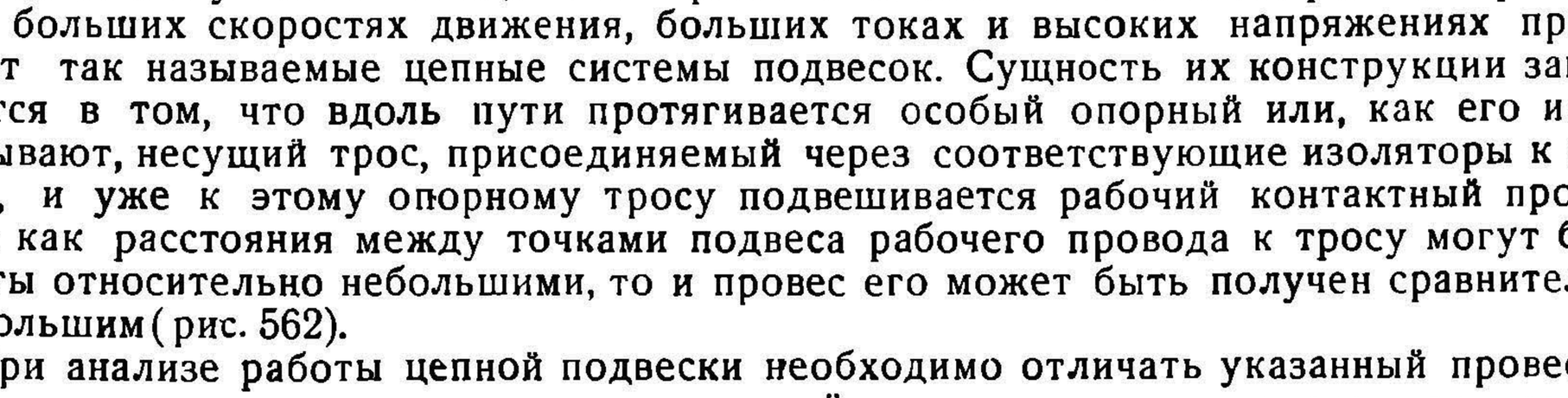


Рис. 562. Схема простой цепной подвески.

При конструировании цепной подвески принципиально наиболее желательно иметь контактный провод расположенным во всех точках подвески на одинаковой высоте от рельсового пути. Этого можно достигнуть соответствующим подбором расстояний между точками его подвеса и троса. Однако, такое положение провода, называемое обычно горизонтальным практически возможно только при одной какой-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

либо температуре. При изменении ее трос меняет свою стрелу провеса, и одновременно с этим контактный провод выходит из горизонтального положения. Получающуюся при этом общую стрелу его провеса необходимо отличать от местных,

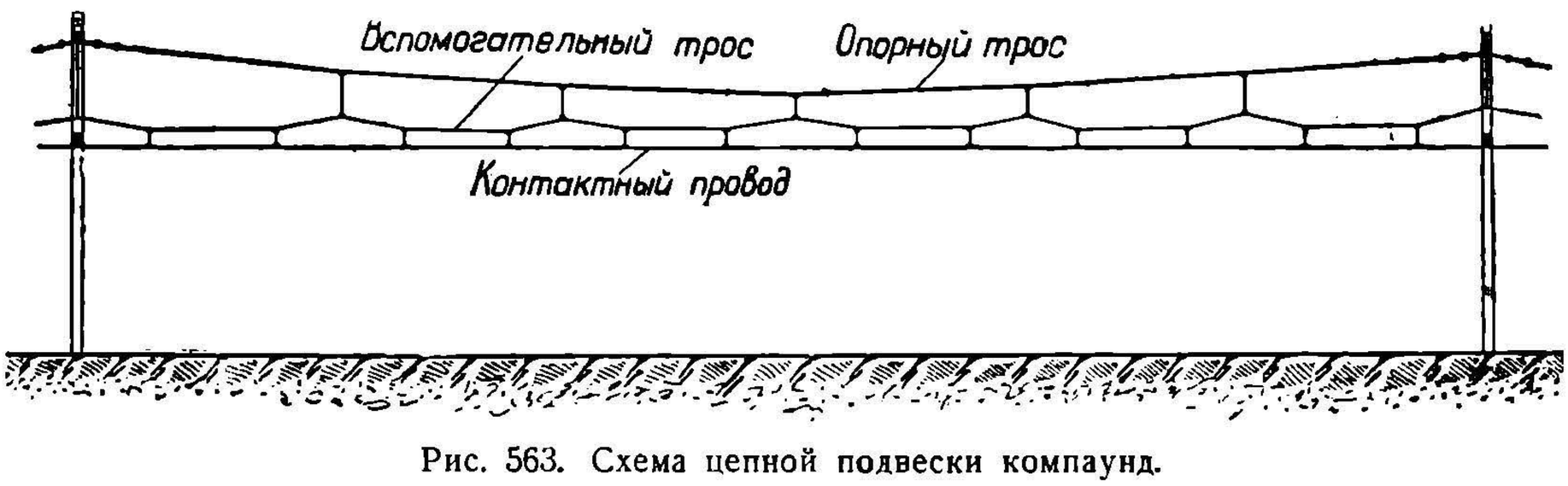


Рис. 563. Схема цепной подвески компаунд.

получающихся, как было уже отмечено, между каждыми двумя смежными точками его подвеса. Следует иметь в виду, что для токособирания преимущественно имеют значение именно местные провесы провода. Относительно небольшие значения их и дают преимущества цепным подвескам.

В некоторых случаях, вместо одноцепной подвески, применяется так называемая подвеска компаунд. В этой системе (рис. 563), кроме основного опорного троса, имеется вспомогательный, подвешенный к основному. Контактный провод подвешивается к вспомогательному тросу. При таком способе подвески достигаются лучшая регулировка системы и выравнивание провеса провода.

Некоторые преимущества компаундная подвеска может также дать, если общее сечение рабочих проводов получается чрезмерным и требует специальных усиливающих проводов. При компаундной подвеске избыток сечения, не укладывающийся в контактный провод, можно покрыть с помощью вспомогательного троса. Недостаток компаундных подвесок — в более высоких и тяжелых опорах.

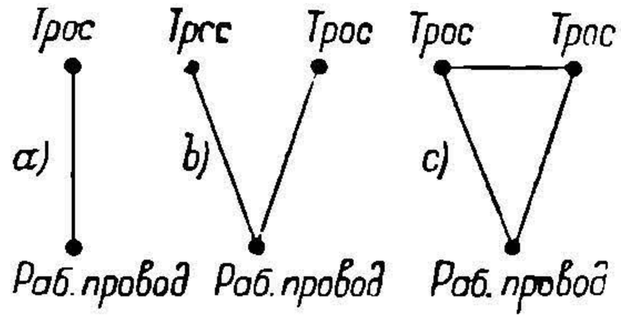


Рис. 564. Положение струн при подвесках ординарной, duplex и triplex.

Цепные подвески, в зависимости от числа опорных тросов, могут быть разделены на ординарные, duplex и triplex (рис. 564). При ординарной системе вдоль пути тянется только один опорный трос. При duplex их берется два. При triplex имеются также два продольных троса, и, кроме того, в каждом месте подвеса дается поперечная стяжка между обоими тросами. Наибольшее распространение имеет ординарная система. Duplex и triplex, как системы более дорогие и не дающие особых преимуществ, применяются очень редко. Следует также иметь в виду подразделение подвесок на отвесные и косые. Первые, получившие доминирующее распространение, имеют трос и провод в одной отвесной плоскости. У вторых эта плоскость наклонена к отвесу (рис. 565).

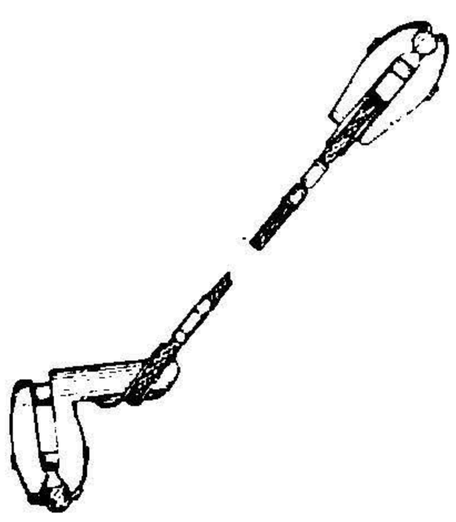


Рис. 565. Положение контактного провода и троса при наклонной подвеске.



Рис. 566. Детали подвески жесткого типа.

При чрезвычайно большом количестве отдельных конструкций цепных подвесок прежде всего необходимо разбить их на отдельные классы. Как показывает опыт, одним из наиболее важных факторов, определяющих работу цепных подвесок, является степень их эластичности и приспособляемости к меняющимся условиям работы, зависящим от изменения температуры и от давления токоприемника. В соответствии с этим, все типы цепных подвесок можно разделить на две основные группы: жесткие и эластичные, причем последние в свою очередь рационально подразделить на простые и автоматически-натяжные. Первая группа представляет такую систему, при которой, вместо провода, подвешивается целое жесткое сооружение, или в ко-

НТБ УГУНТ (ДІІТ)

торой провод скрепляется с опорными тросами жесткими подвесками (рис. 566). В обоих этих случаях контактный провод или совсем не прогибается под действием токоприемника, или прогибание провода получается чрезвычайно незначительным. В первой стадии развития цепных подвесок считали, что такая система имеет преимущества перед другими. Но опыты с очевидностью показали, что такие жесткие системы весьма нецелесообразны, так как при них быстро срабатываются и провод, и контактная поверхность токоприемника.

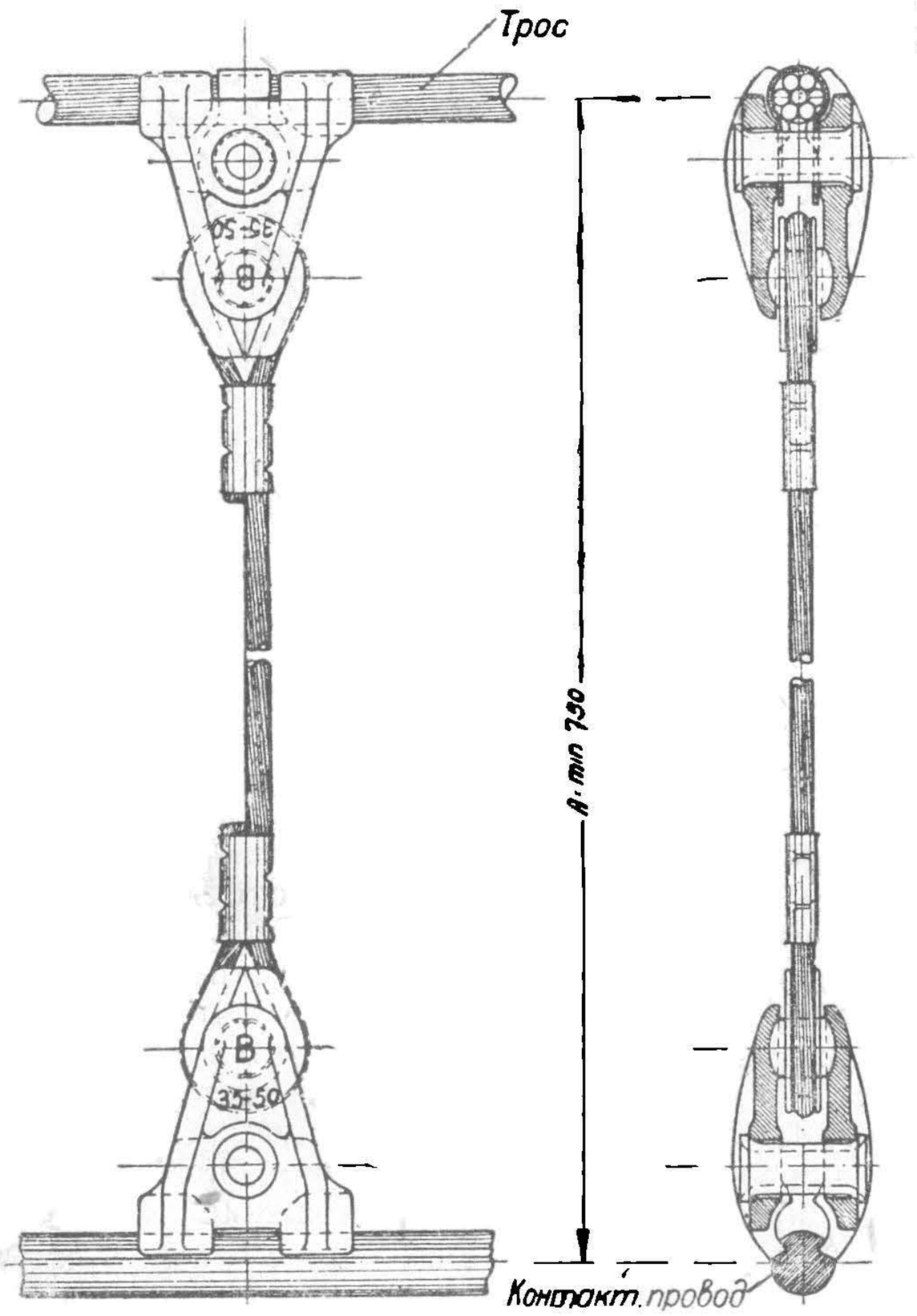


Рис. 567. Струна гибкого типа.

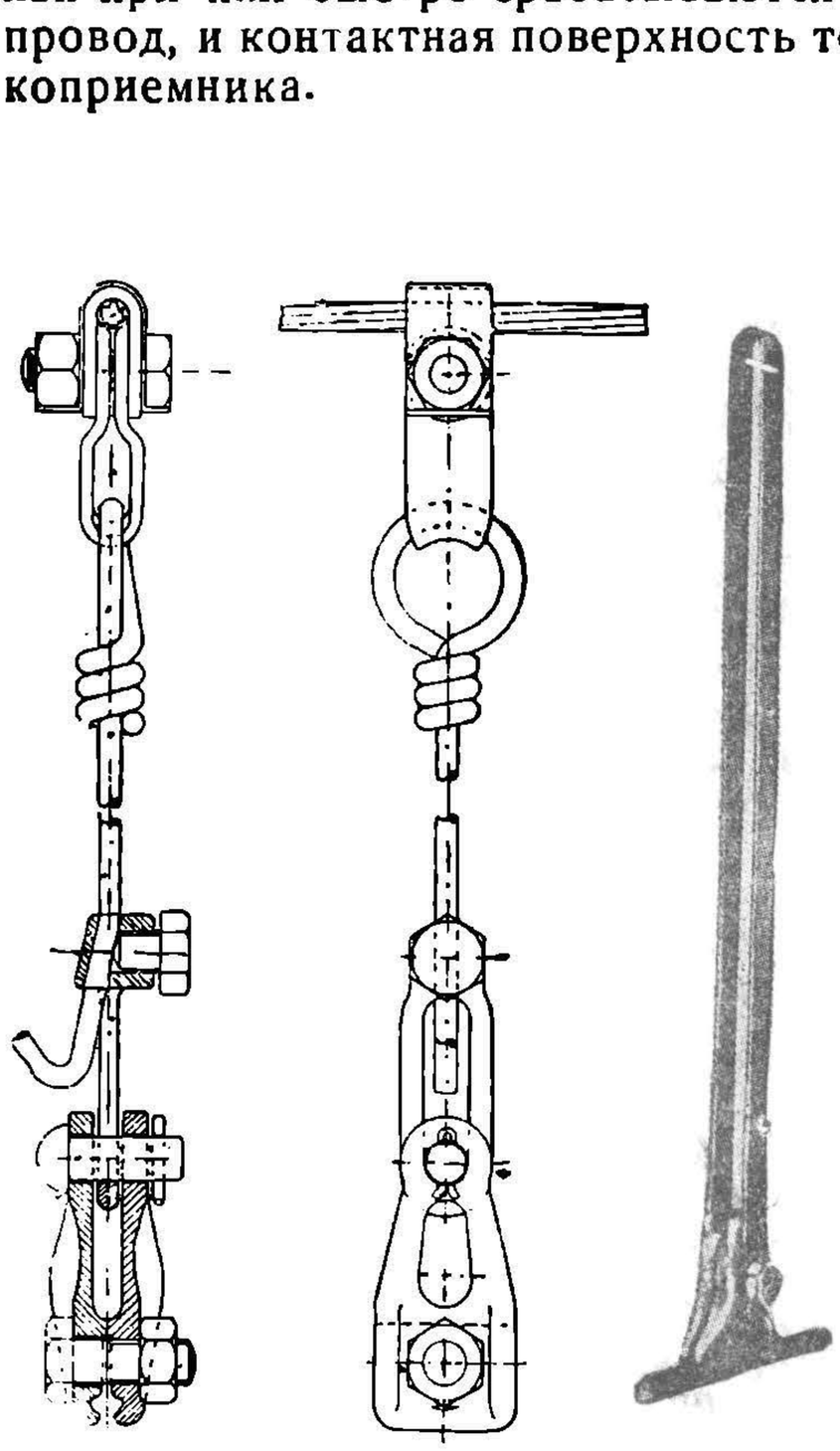


Рис. 568. Струна со свободным вертикальным перемещением.
Рис. 569. Струна скользящего типа американского образца.

Характерной особенностью второй системы подвески является эластичный метод подвешивания контактного провода к опорному тросу. Так называемые струны, с помощью которых контактный провод подвешивается к тросу, здесь выполняются в двух основных видах. Первый в основе имеет гибкий трос с нижней и верхней наглухо прикрепляемыми к проводу и тросу клеммами (рис. 567 и 568). Второй тип струн показан на рис. 569 и 570. Здесь они наглухо прикреплены только к контактному проводу, свободно опираясь на трос.

Эластичное подвешивание важно с двух точек зрения. Прежде всего оно предотвращает чрезмерное жесткое набегание токоприемника на провод в местах держательных клемм. При эластичных струнах провод под действием токоприемника приподнимается несколько вверх, обеспечивая этим до известной степени упругость контакта поверхностей. При этом очень важно, что здесь провод приподнимается и в месте нахождения держательных клемм, благодаря чему и в этих, наиболее опасных местах, сработка провода не имеет такого резко выраженного характера, как при жестких системах, когда токоприемнику, чтобы приподнять провод, приходится преодолевать давление провода и троса. Второе преимущество эластичного подвешивания сказывается при температурных колебаниях. Нужно иметь в виду, что правильное взаимное положение контактного провода и троса, особенно при различных их материалах, возможно только при какой-либо одной температуре. При изменениях ее вследствие различных температурных удлинений провода и троса могут

НБ УДУНТ (ДІІТ)

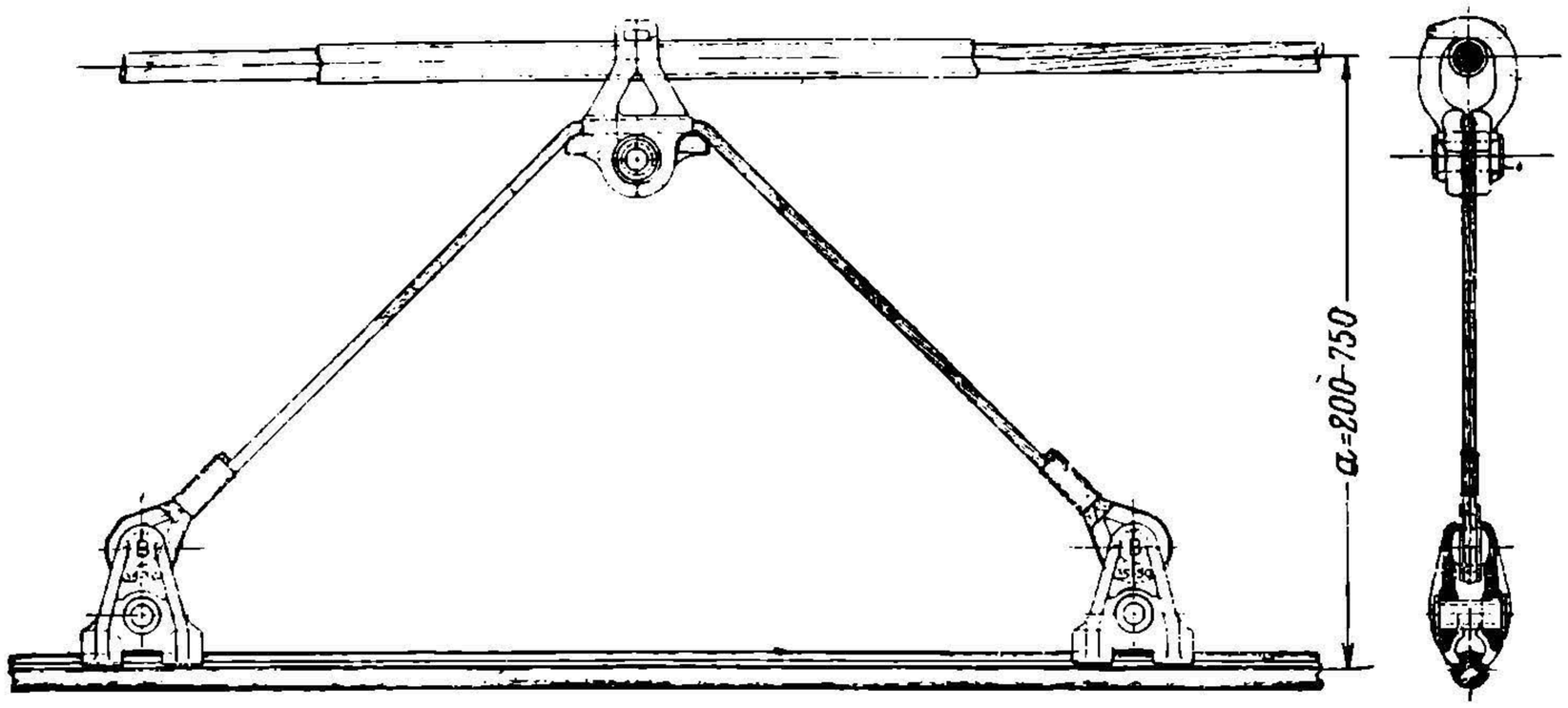


Рис. 570. Скользящая струна германских ж. д.

образоваться добавочные напряжения в них. Подвеска по большой части получает искаженный вид, с перекосом струн. В отношении уменьшения искажения следует ожидать наилучших результатов от струн типа рис. 569 и 570. Однако, наряду с этим такой тип струн имеет существенный недостаток. Прежде всего из-за большого трения передвижение их происходит недостаточно свободно. Кроме того, в случаях, когда струны приподнимаются, легко образуются вольтовы дуги между тросом и струнами. В результате нередки случаи перегорания струн и тросов. Указанное обстоятельство объясняет, почему в настоящее время, особенно в Европе, преобладает тип кабельных струн. В случае же применения свободных струн теперь имеется тенденция прибавлять к ним в местах, где нужно ожидать меньшего искажения контактной системы, глухие кабельные струны, назначение которых — принимать на себя ток при разрыве контакта в свободных струнах.

Как следует из сущности конструкции, простые эластичные подвески наиболее удовлетворительно могут работать только при какой-либо одной температуре. При значительных пределах ее изменения провисание провода может получиться чрезмерным. В таких случаях прибегают к так называемой сезонной регулировке. Натяжение системы регулируется по отдельным периодам года.

Обычно цепные подвески имеют у своих опор боковые оттяжки или фиксаторы (рис. 571), что придает контактному проводу правильное положение по отно-

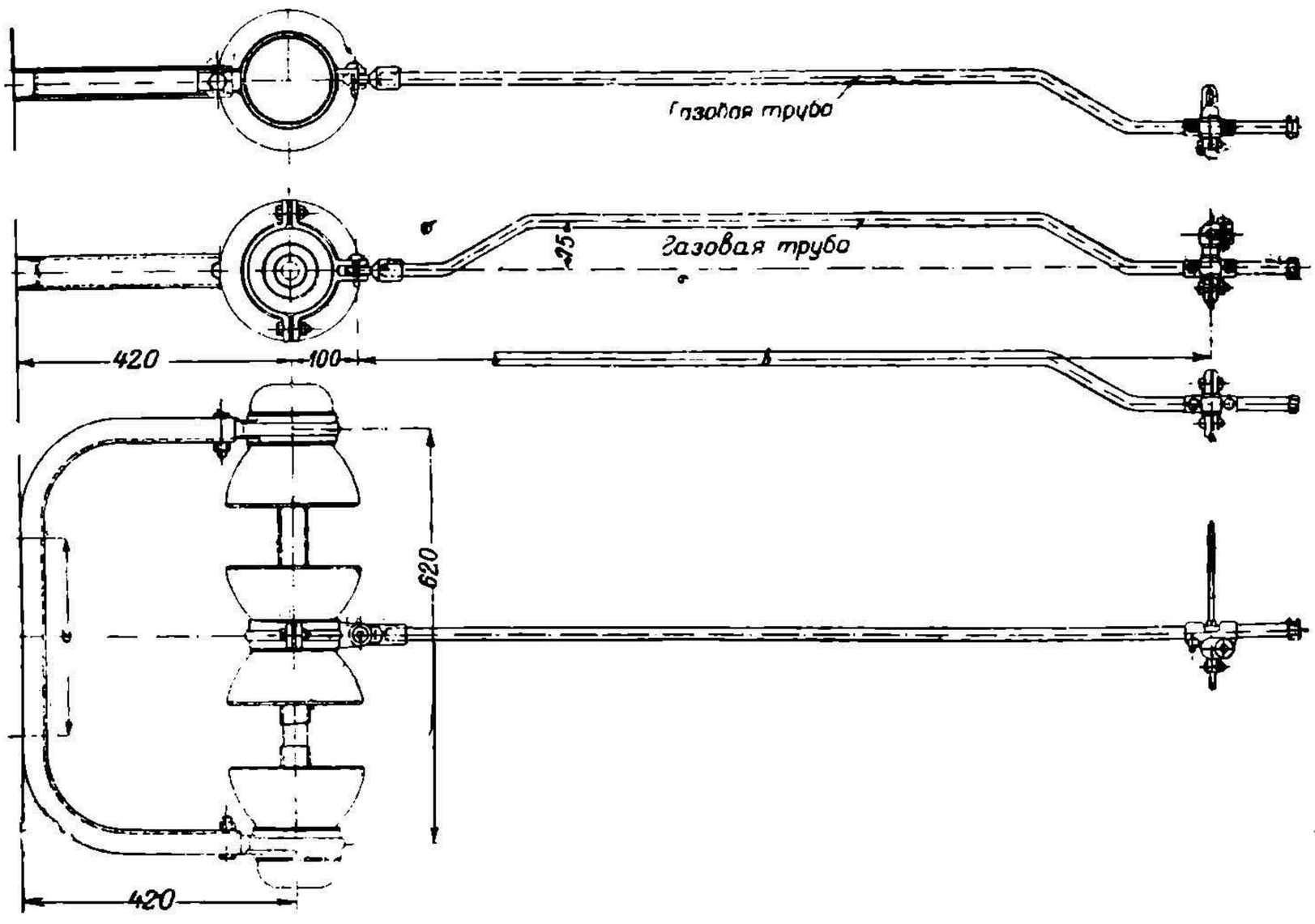


Рис. 571. Боковые фиксаторы контактного провода.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

шению к пути, а также обеспечивает соответствующее зигзагообразное течение провода. Кроме того, такие оттяжки препятствуют вибрациям провода от прохождения токоприемника и от воздействия ветра.

Боковые оттяжки конструируются эластичными, для чего употребляются в большинстве случаев газовые трубы, которые в этом случае скрепляются с изоляторами через шарнир. При цепной подвеске зигзаг нормально дает отклонение контактного провода в 200—600 mm в ту или другую сторону от оси пути. Необходимо отметить, что при зигзагообразном расположении провода получаются более значительные ветровые отклонения, чем без зигзага. Так, например для немецкой (объединенной) подвески при пролете 73 m без зигзага отклонение составляет 600 mm, а при зигзаге — 750 mm (допустимое отклонение в Германии — 750 mm). При последней величине отклонения без устройства зигзага можно было бы увеличить пролет с 73 до 80 m, т. е. получилась бы экономия на количестве опор. В Америке зигзаг по большей части не применяется. Провод тянется по оси путей. Американцы полагают, что равномерность сработки токоприемника может быть обеспечена поперечным перемещением его, вызываемым неизбежной боковой качкой подвижного состава. Опыты с подобными подвесками производятся и у нас в СССР. Цепные подвески имеют одиночную и двойную изоляцию (рис. 572 и 573). Величина расстояния между соседними струнами колеблется от 4 до 12,5 m. Пролет варьирует от 45 до 70 m. В качестве материала для провода употребляется почти исключительно твердотянутая медь сечением от 80 до 107 mm^2. Для опорного троса берется гальванизированный стальной или бронзовый трос сечением от 30 до 80 mm^2. Применение такого дорогого материала, как бронза, объясняется стремлением предохранить трос от вредных воздействий воздуха и особенно дыма. В некоторых случаях и опорный трос делается из твердотянутой меди, чем достигается увеличение проводимости системы. Иногда применяются биметаллические тросы.

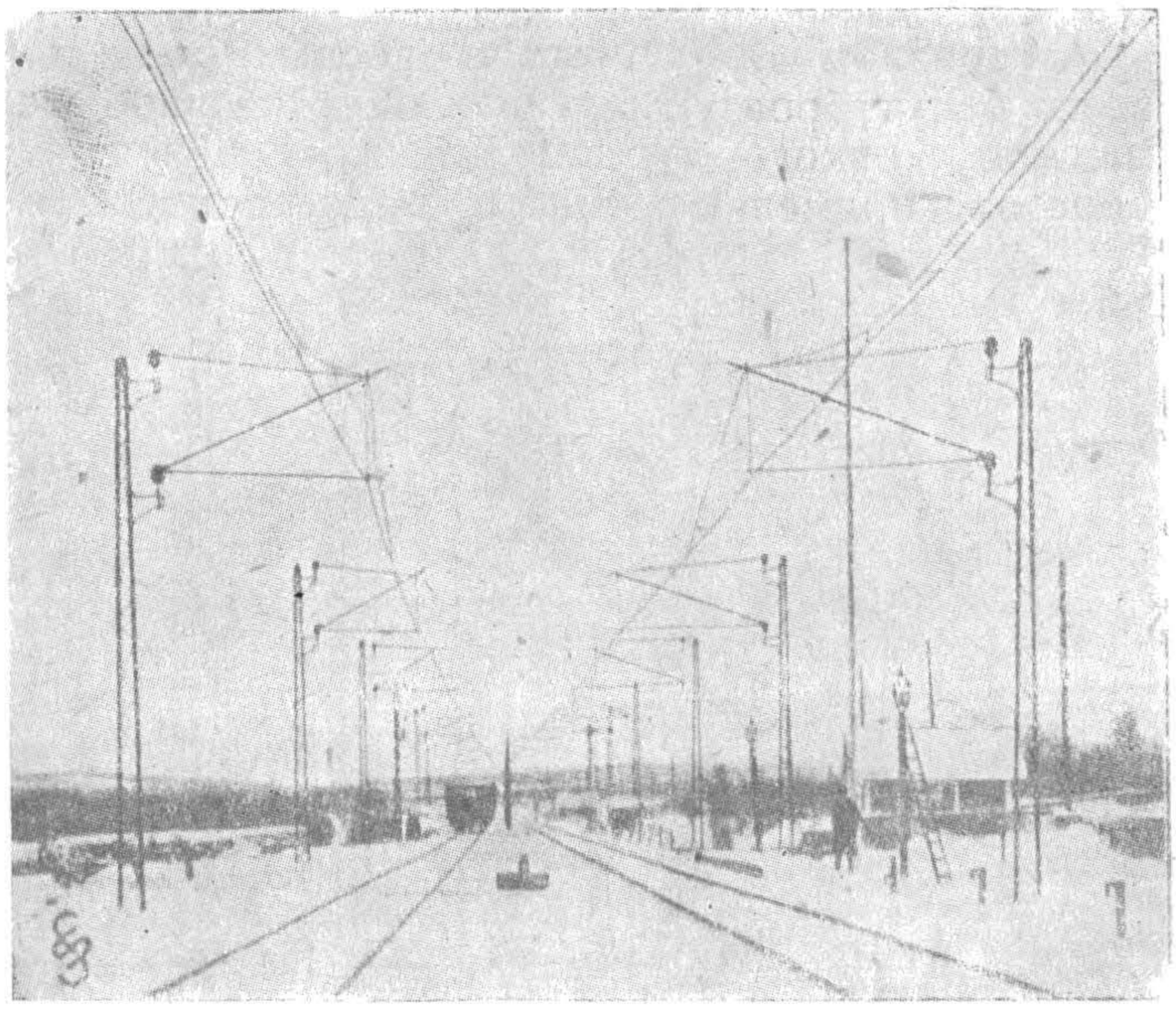


Рис. 572 Цепная подвеска с однорядной изоляцией при стержневых изоляторах.

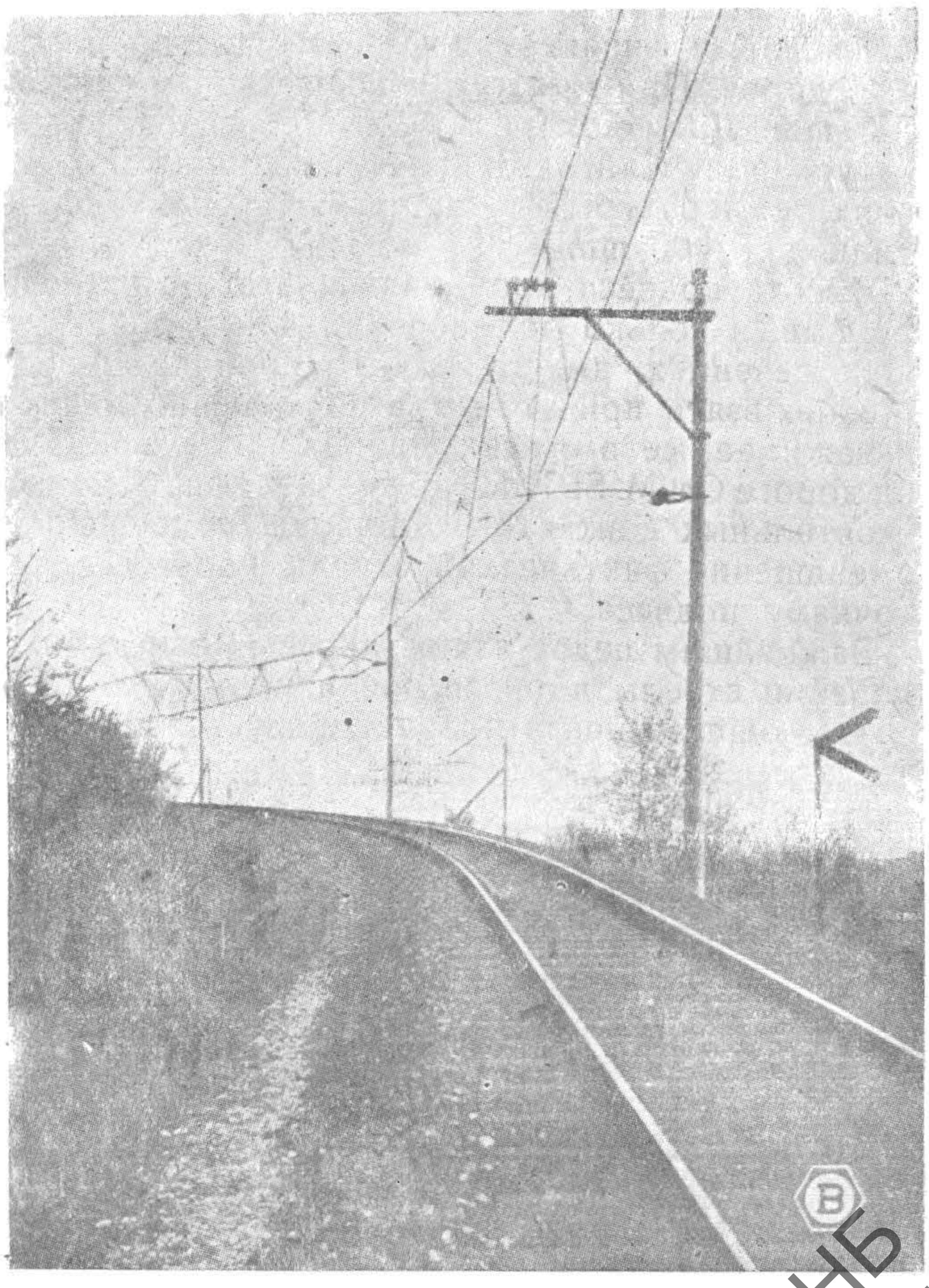


Рис. 573. Подвеска с двухрядной изоляцией при изоляторах Diabolo.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Материалом для арматуры цепных подвесок (зажимов и прочих деталей) чаще всего берут бронзу, латунь и оцинкованное железо. Имеются также попытки применения ковкого чугуна. Для соединения отдельных частей арматуры, главным образом, применяют винты. В последнее время для держательных клемм заме-

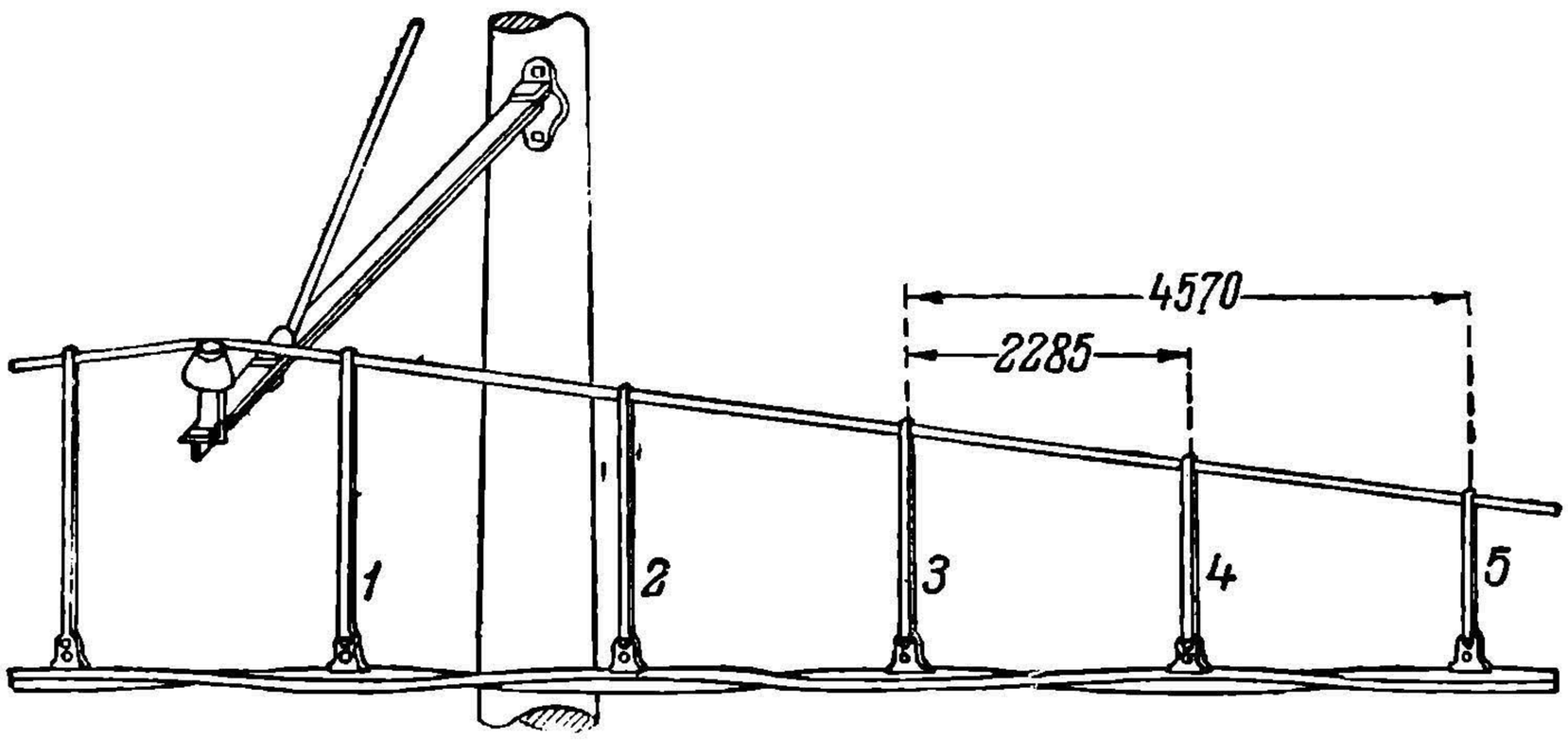


Рис. 574. Подвеска с двумя контактными проводами дороги Ch..M. St. P. R.

чается тенденция брать заклепки, так как винтовые скрепы после более или менее длительной эксплоатации трудно поддаются разъему, и их все равно приходится разрезать.

Типичным примером эластичной цепной подвески может служит система Вестингауза, построенная этой фирмой для пробного участка Южно-французских железных дорог. При пролете в 50 m средний провес опорного троса получился равным 660 mm. Для пролета в 60 m провес оказался около 945 mm. При средней температуре получались наиболее благоприятные результаты. При наибольших колебаниях температуры в ту и другую сторону колебания высоты подвеса провода доходили до $\pm$ 200 mm.

Высота подвеса провода для этого типа цепной подвески в среднем равна от 5,5 до 7 m, и только под мостами или в тоннелях ее уменьшают до 4,5 m. При больших сечениях, вместо одного провода нередко приходится тянуть два провода. Можно взять при этом два совершенно идентичных провода, идущие параллельно и зажимаемые в общих двойных клеммах. Но можно, как это например, сделано на дороге Ch. M. St. P. R., применить конструкцию типа рис. 574. Здесь имеются два самостоятельных контактных провода, подвешенные к одному тросу, но волны их для уменьшения фактической стрелы провеса сдвинуты на половину расстояния между точками подвеса.

Важнейшим недостатком простых эластичных подвесок является значительное колебание стрелы провеса при изменении температуры. Одним из средств, несколько смягчающих данный недочет, является конструкция, примененная на государственных швейцарских железных дорогах (рис. 575). Как видно из схемы, здесь применен принцип перекрещивания контактного провода и троса. Ввиду того, что в данном случае применена компаундная подвеска, контактный провод переходит в вспомогательный трос и обратно. При одноцепной подвеске, как, например, предлагает фирма BBC, контактный провод может перекрещиваться с главным опорным тросом, а не со вспомогательным, как это имеет место в предыдущем случае.

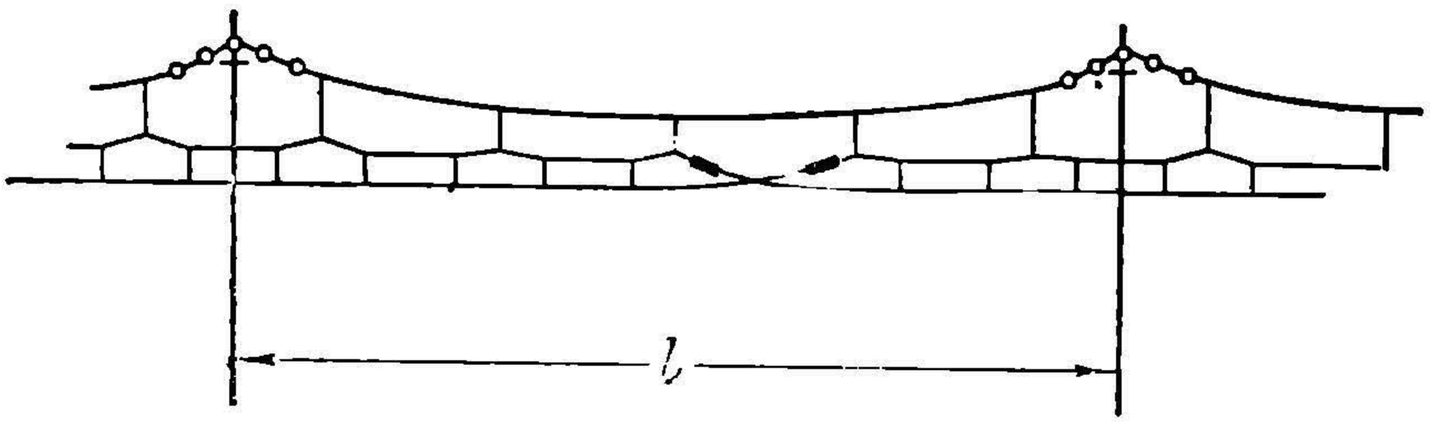


Рис. 575. Цепная подвеска швейцарских ж. д. с переходом контактного провода в трос.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

При конструировании швейцарской подвески был принят пролет между опорами в 56 m, и перекрещивание было взято через каждые 400 m. Контактный провод взят медный, сечением в 107 mm², опорный трос и вспомогательный — стальные; первый имел 19 жил, диаметром каждая по 2,5 mm, а второй — 7 жил, диаметром каждая по 4 mm. Наибольшая стрела провеса при данной подвеске определилась в 101 mm. Более благоприятные условия в отношении стрел провесов при перекрещивании проводов объясняются тем, что здесь система контактного провода и троса дает при относительно небольшом провисании самого провода больший провес от троса. Если же обратиться к теории работы провода, то оказывается, что чем больше абсолютный провес, тем меньшее влияние на изменение стрелы провеса оказывает колебание температуры. Этим объясняется, почему эта система менее чувствительна к температурным колебаниям.

Вторым большим осложнением в работе цепных подвесок являются опасные боковые отклонения контактного провода под действием ветра. Это послужило одной из побудительных причин для разработки так называемых наклонных или косых систем подвесок. Преимущество их сказывается также и в том, что при них на кривых можно избегнуть боковых оттяжек.

Один из первых опытов применения разбираемой системы был произведен американцами на Пенсильванской железной дороге и затем на дороге Norfolk-Western (рис. 576). Наклонные подвески были там применены только на кривых участках пути, что при многопутности линии сильно облегчило конструкцию и придало системе большую упругость, причем контактный провод здесь взят с боковой фиксацией, хотя, как было уже отмечено, имеются подвески и без таковой.

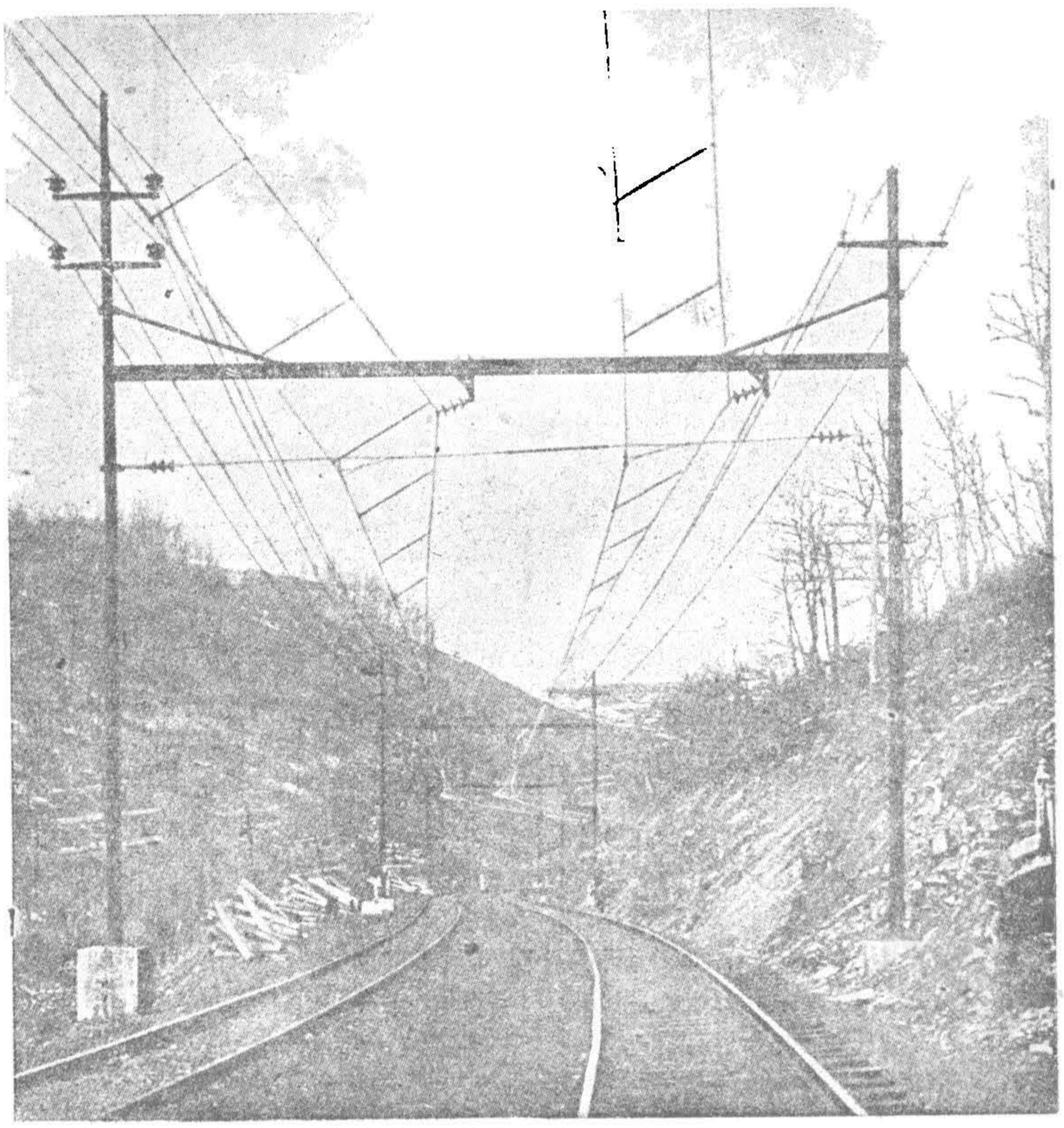


Рис. 576. Наклонная подвеска на кривых американского типа.

Из Америки указанная система в несколько измененном виде перешла во Францию, а за последнее время ею много начали заниматься в Германии. В результате дальнейшего изучения и применения косой подвески выяснилась целесообразность применения этой системы не только на кривых участках пути, но и на прямых. Опыты и теория подтвердили высказанное выше положение, что при таких системах могут получаться значительно меньшие ветровые отклонения от центральной оси пути, чем при обычных отвесных подвесках, и поэтому эти системы в Германии получили наименование противоветровых.

Систему с наклонными подвесками можно разбить на два типа: подвески с одинаково направленными волнами контактного провода и троса по отношению к оси пути (рис. 577) и подвески с волнами контактного провода и троса, идущими в разные стороны от оси пути (рис. 578). Первая система не дала хороших результатов для прямых участков пути, оказавшись даже менее выгодной, чем подвеска отвесная. Этот тип теперь признано рациональным применять только на кривых, где результаты получаются в достаточной степени благоприятными. Второй тип противоветровых подвесок с расходящимися волнами дает хорошие результаты и для

НБ УДУНТ (ДІІТ)

прямых. По данным опытов Buchhold'a при одних и тех же боковых ветровых отклонениях наклонная подвеска дает возможность значительно увеличить пролет.

Из средств, направленных к уменьшению эффекта ветровых отклонений, следует отметить также применение промежуточных оттяжных опор (рис. 579). Последние

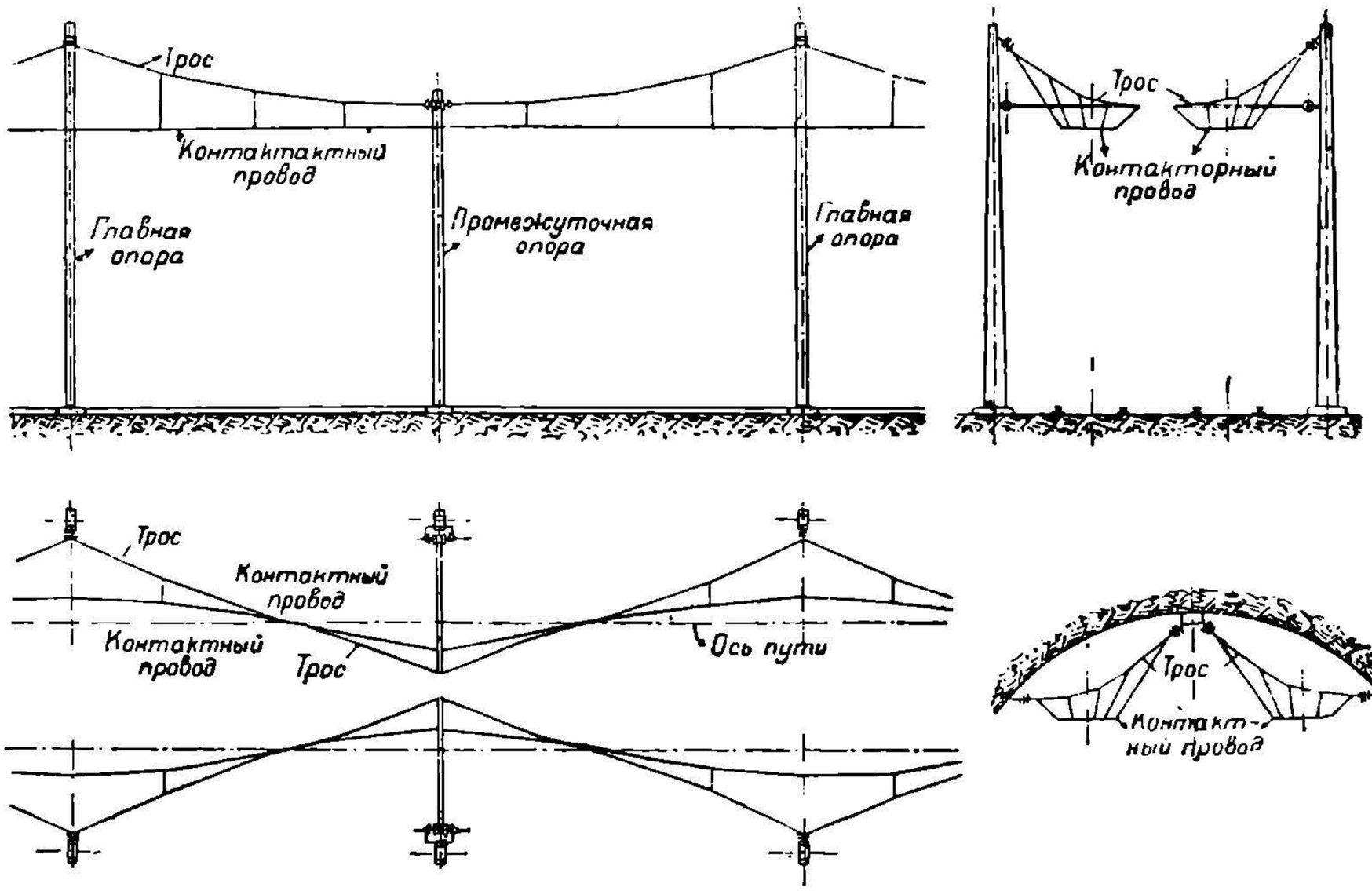


Рис. 577. Наклонная подвеска с одинаковым направлением волн провода и троса по отношению к оси пути.

помещаются между основными опорами. Они не несут вертикальной нагрузки, а назначаются только для противодействия боковым отклонениям. При наличии таких опор, которые могут быть относительно легкими и дешевыми, пролет между главными опорами можно сильно увеличить, доводя его до 100—150 m. Из схем подвесок с противоветровыми опорами предпочтительна схема *a* рис. 579. При ней ветровые отклонения получаются значительно меньше, чем при схеме *b*. По данным Buchhold'a для немецкой подвески, при пролете в 125 m, схема *b* дает боковое отклонение в 710 mm, а схема *a* — всего только 580 mm.

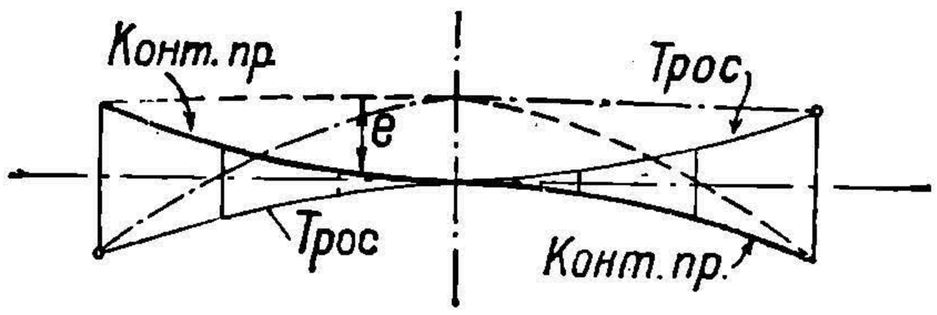


Рис. 578. Наклонная подвеска с расходящимися волнами контактного провода и троса.

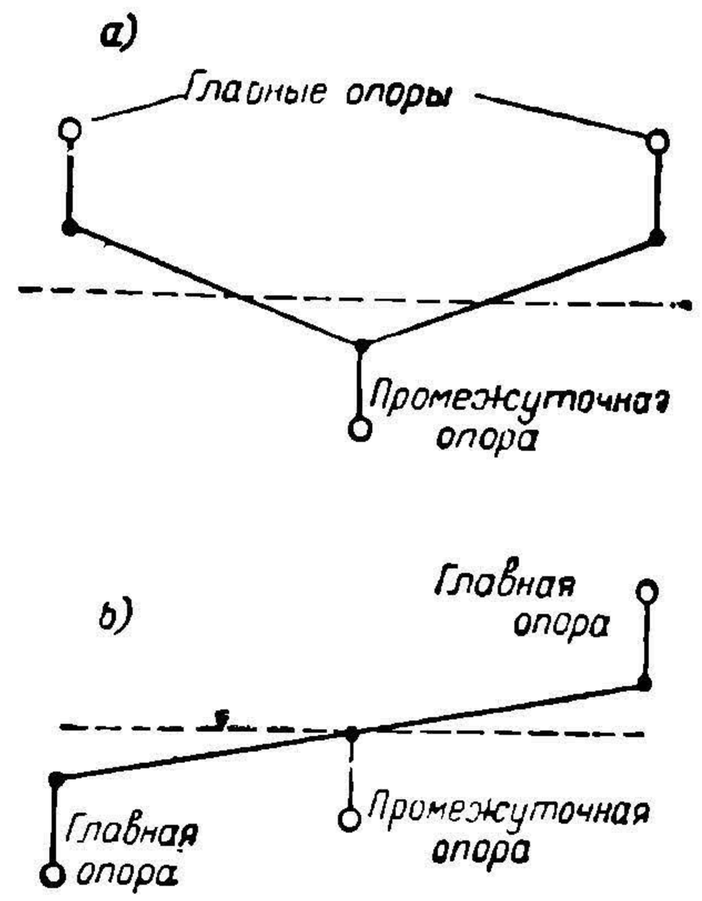


Рис. 579. Схема подвески с промежуточными опорами.

Несмотря на ряд мероприятий по улучшению простых эластичных цепных подвесок, работа их все-таки оставляет желать лучшего. Этим объясняется появление в практике подвесок с автоматическим натяжением проводов. Характерным свойством работы подвесок этого типа является приспособляемость их к температурным изменениям. Достигается это автоматической регулировкой натяжения в проводе и его провеса с помощью особых грузов, производящих натяжение провода посредством блочной или рычажной системы (рис. 580). В некоторых случаях, вместо груза, автоматиче-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ское натяжение достигается пружинными устройствами. Все конструкции подвесок с автоматическим натяжением можно разбить на три подгруппы. К первой относятся подвески, в которых автоматически натягивается только рабочий провод, а трос закрепляется наглухо. Таковы, например, подвески SSW, Bergmann'a, австралийских железных дорог, объединенная германская и целый ряд других.

Вторая подгруппа заключает в себе подвески, при которых и провод, и трос оттягиваются одним грузом. По этой системе выполнены подвески AEG и Vedovell. Эта подгруппа работает особенно благоприятно в том случае, когда провод и трос

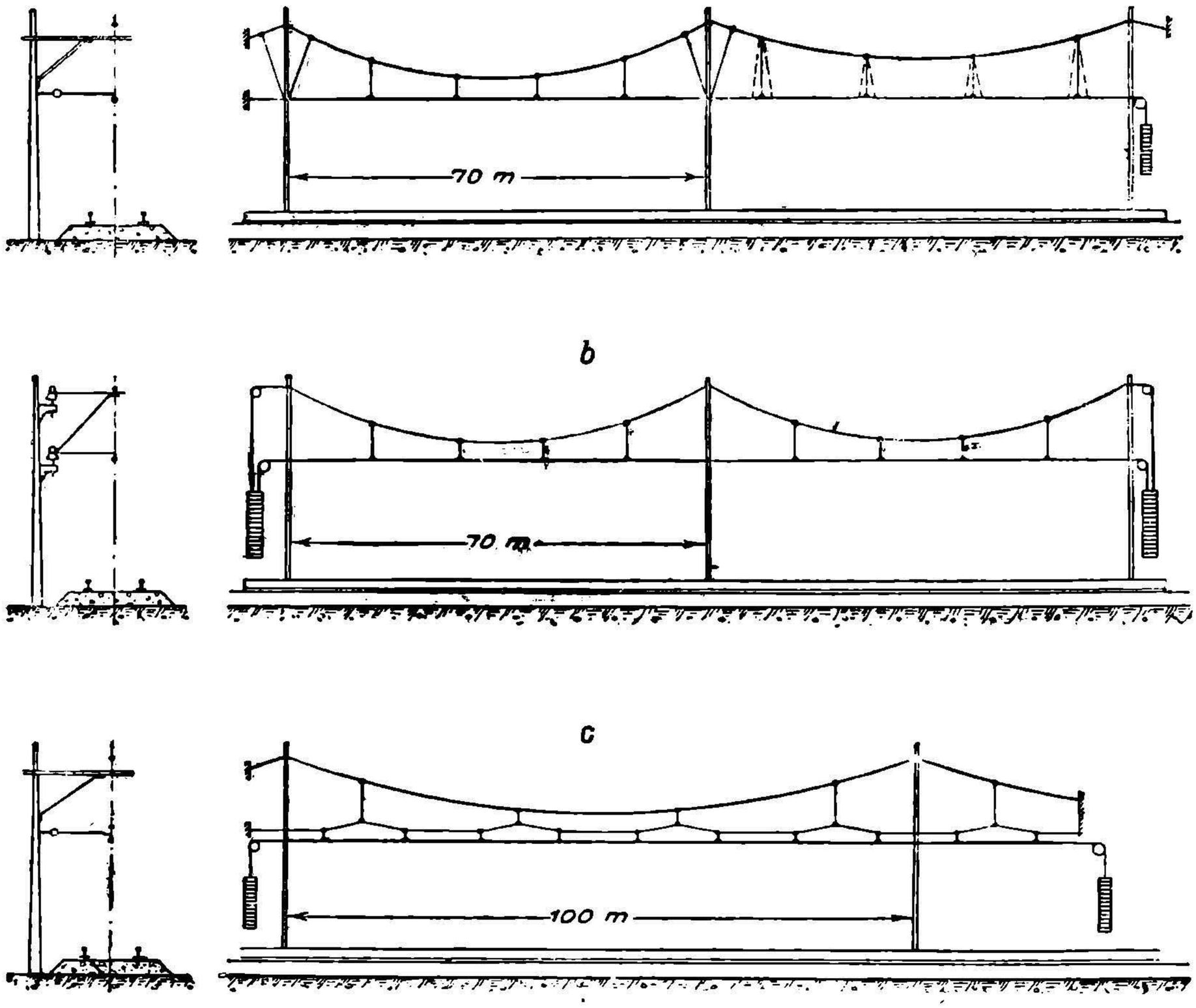


Рис. 580. Схемы цепных подвесок с автоматическим натяжением.

сделаны из одинакового материала. Например, на шведских железных дорогах провод и трос взяты из твердотянутой меди. В таком случае при температурных изменениях провод и трос изменяют свою длину при одинаковых температурных коэфициентах удлинения, и благодаря этому положение струн искажается в очень небольшой мере (рис. 572).

Последнюю подгруппу составляют подвески, у которых трос и провод оттягиваются самостоятельными блочными системами. Сюда относятся подвески Вестингауза, Bergé и Vedovell, примененные этими фирмами для пробного участка южных железных дорог Франции. С теоретической точки зрения последняя подгруппа подвесок является наиболее совершенной. Недостаток их — в значительной сложности конструкции.

При всех системах третьей группы подвесок величину пролета берут от 70 до 100 m, но для ограничения ветровых отклонений не рекомендуется брать пролет свыше 75—80 m. Расстояние между натяжными пунктами обычно не превосходит 1500 m. Боковые оттяжки и струны берутся в основе такими же, как и при простых эластичных системах. Оттяжные приспособления выполняются нормально с блочными механизмами (рис. 581). Часто применяется двойная блочная система. Первый блок дает направление проводу к опоре. Второй же блок или система

НТБ УГУНТ (ДІІТ)

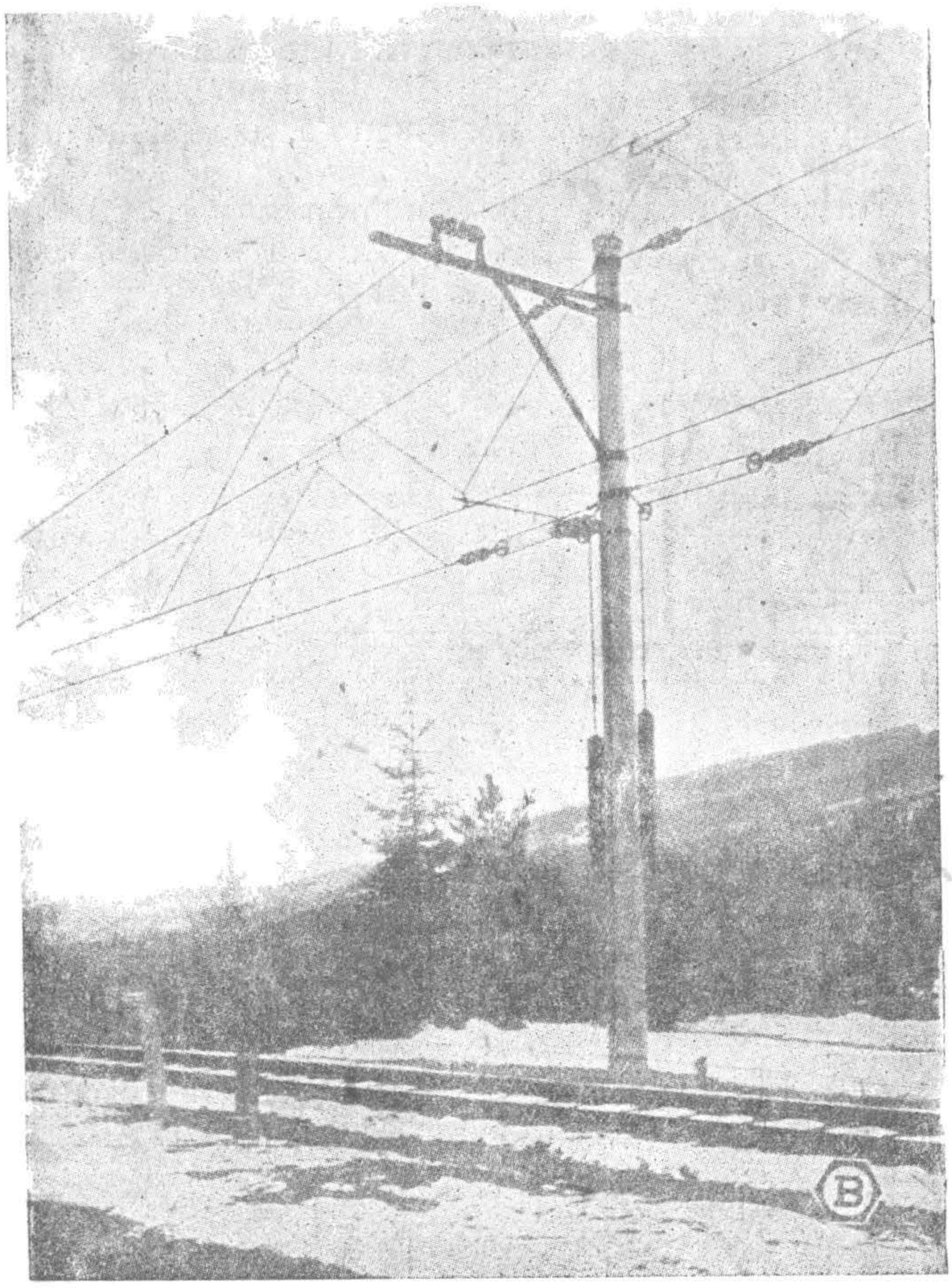


Рис. 581. Общий вид блочного устройства цепной подвески.

блоков дает оттяжному тросу перегиб вниз по вертикали, причем к свободному его концу прикрепляется груз. В некоторых случаях для предотвращения чрезмерных перемещений грузов ставятся грузовые ограничители. Такие приспособления, например, ставятся для ограничения перемещений при низких температурах и гололеде. Блочные натяжные приспособления нормально устраиваются с таким расчетом, чтобы вес грузов соответствовал половине силы тяжения провода.

Ниже приводятся несколько схематических чертежей систем подвесок с автоматическим натяжением. На рис. 582 дана подвеска AEG с фидером и редко применяемым заземленным тросом. Натяжные приспособления поставлены здесь через каждые 1 000—1 500 m. Система Bergmann'a, примененная этой фирмой на силезских железных дорогах, представлена на рис. 583. Расстояние между столбами 100 m, а между натяжными приспособлениями — 1 500 m.

Особого внимания заслуживает объединенная немецкая цепная подвеска (рис. 584). Эта система возникла из совмещения подвесок SSW, AEG и Bergmann'a. Характерные детали объединенной подвески заключаются в следующих особенностях. В местах, где при изменении температуры искажение положения струн невелико, применяются однотросовые подвески (рис. 567). Там, где струны получают большой наклон, применяются свободные струны петлеобразного типа (рис. 570). Клеммы и для троса, и для контактного провода применяются одинаковые. Скрепление двух половинок клемм производится медными полыми круглыми заклепками или заклепками особой формы по системе ВВС. Трос берется или бронзовый, сечением 40 mm², или стальной, сечением 30 mm². Натяжные изоляторы — двухюбочные, и скрепляются они по два. Расстояние между контактным проводом и тросом на опорах колеблется от 1,3 до 2,2 m. Уменьшение этой величины благоприятно действует на понижение высоты столбов и влияние ветра, но неблагоприятно в отношении

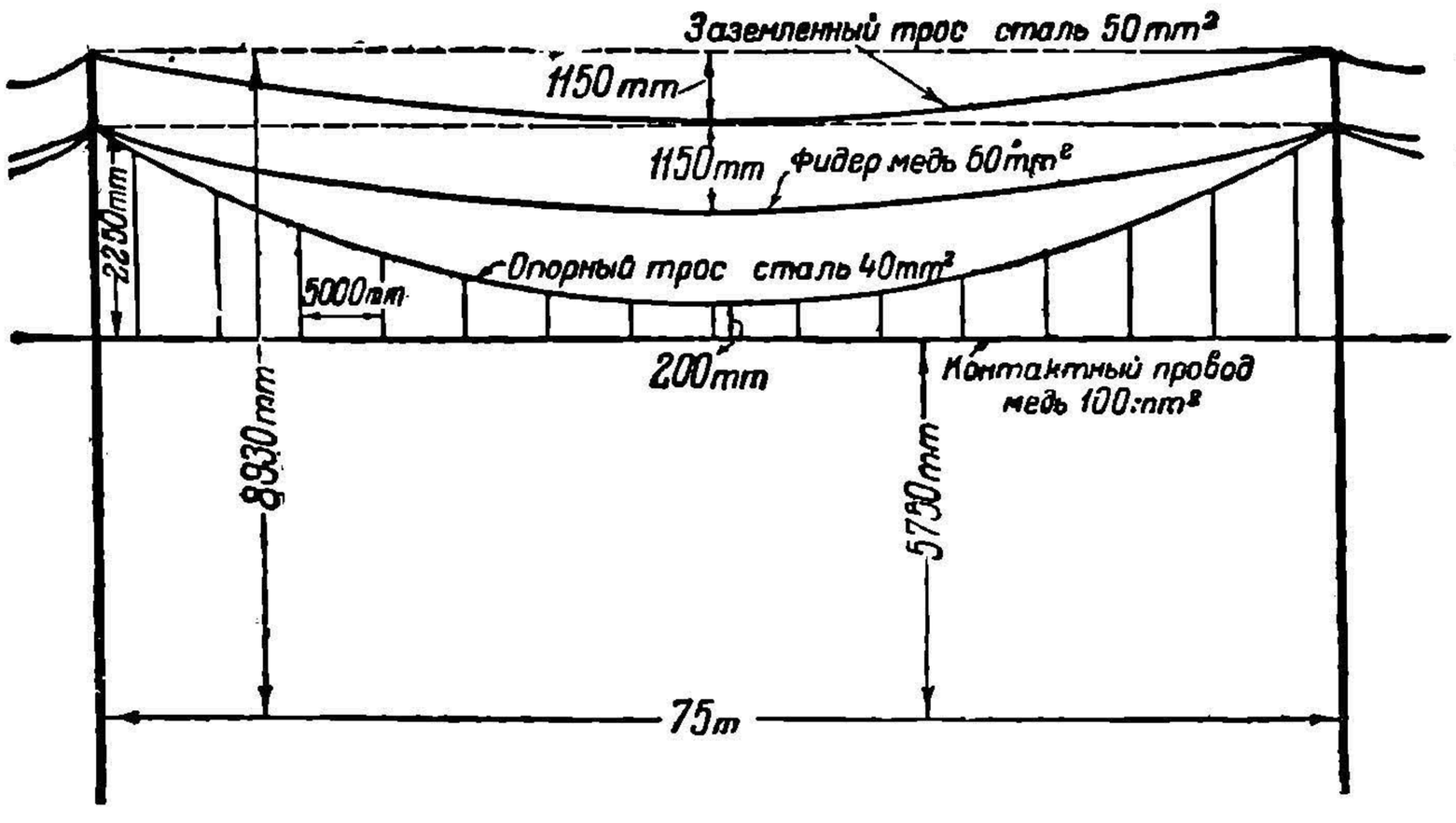


Рис. 582. Система цепной подвески AEG.

НБ УИИНТ (ДІІТ)

перемещения подвесок по длине пролета, так как чем короче струна, тем сильнее искажается их положение. Натяжение контактного провода в объединенной подвеске взято равным 10 kg/mm², давление ветра принято соответственно скорости его 31 m/sec в направлении, перпендикулярном к оси пути.

В СССР подвеска с автоматическим натяжением контактного провода также нашла себе широкое применение. Для большей эластичности струны, выполняемые из медной проволоки, делаются по типу, близкому к указанному на рис. 568. Контактный провод берется из меди кругло-желобчатого профиля сечением 100 mm². Трос — из бронзы или стали сечением 50 — 70 mm². Натяжение проводу дается около 8 kg/mm². Есть тенденция зигзаг делать от 200 до 350 mm. Наибольшее отклонение от оси предположено ограничивать цифрой в ± 450 mm при скорости ветра 30 m/sec. Такая низкая цифра отклонения при рабочей ширине токоприемника в 1300 mm объясняется желанием учесть возможную неточность в монтаже провода, в насадке опорных кронштейнов, а также боковой наклон подвижного состава, обусловленный при движении поезда паразитными его колебаниями. Расстояние между опорами предположено доводить до 90 m, но с тем, чтобы ставить посредине пролета оттяжную опору, единственное назначение которой — не допускать чрезмерных ветровых отклонений.

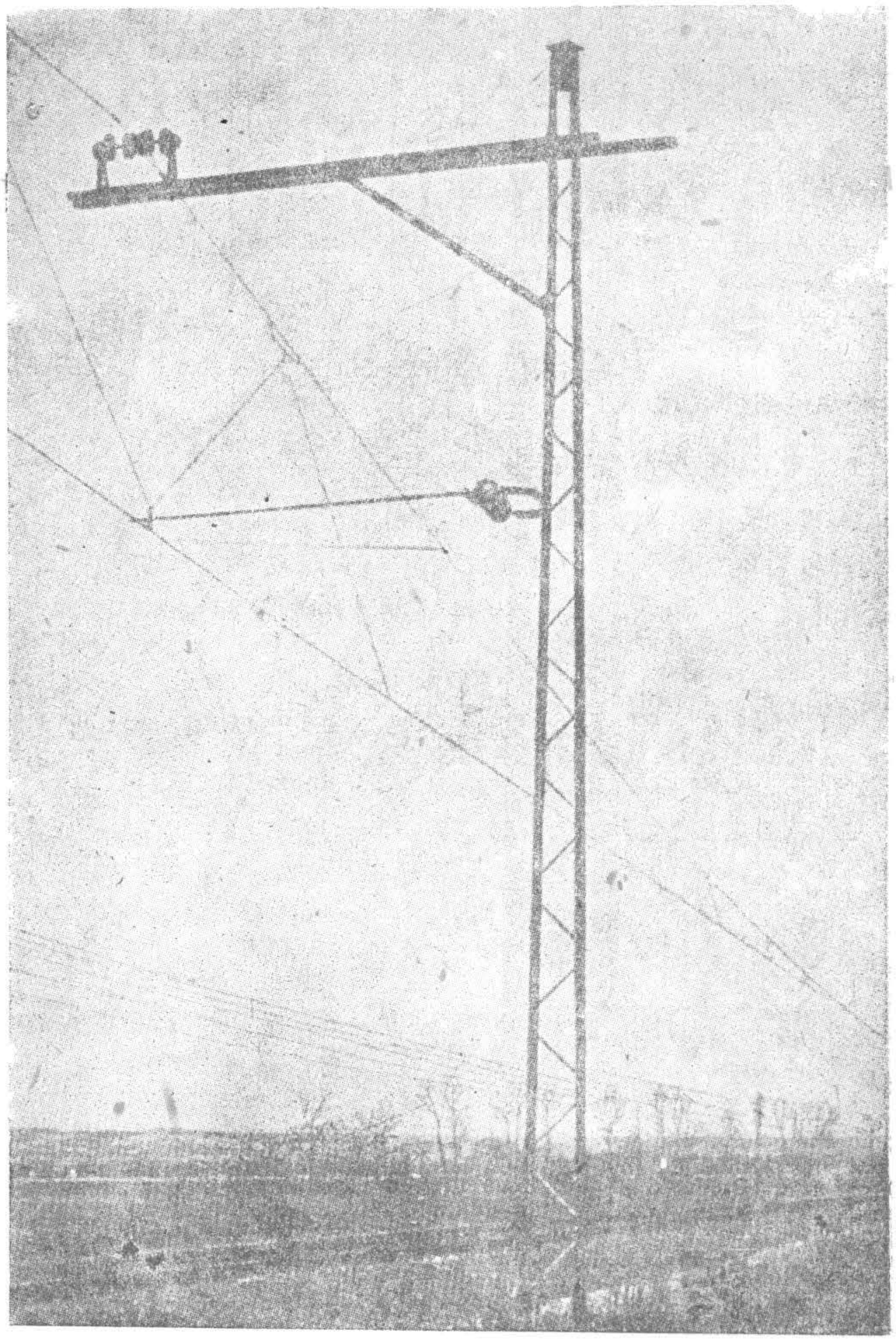


Рис. 583. Система цепной подвески Bergmann'a.

Кроме указанного типа, в СССР в отдельных случаях имеет применение подвеска типа немецкой объединенной с пролетом 70—75 m. Для горных участков с большим количеством кривых иногда берется подвеска без компенсации при пролетах 60—65 m.

Особо следует отметить при цепных подвесках способы участкового деления. В качестве основной конструкции применяется система воздушного деления (рис. 585). Как видно из приведенной схемы, такой участковый делитель расположен в месте анкеровки проводов. Здесь же могут находиться и блочные грузовые компенсаторы при подвесках с автоматическим натяжением. Из схемы видно, что в момент прохождения такого делителя токоприемник перекрывает контактные провода обоих смежных пролетов. Вместо приведенной анкеровки часто применяют схему рис. 586. Преимущество этой системы — в сокращении числа опор, которые можно располагать по одну сторону пути, чего нельзя сделать при предыдущей системе.

Такие системы участкового деления применяются преимущественно на открытых путях, где поезда могут итти с большими скоростями. На станционных путях применяются обычно специальные участковые делители (рис. 587). Последние монтируются предпочтительно на изоляторах того же самого типа, который берется и дл основной подвески. Нужно отметить, что делители такого типа иногда встречаются и на главных путях.

На кривых при цепных подвесках контактный провод прокладывают по двум основным способам, показанным на рис. 588. По первому (*a*) применяется система вертикальных струн, по второму (*b*) — струны наклонные (Л. 25). Особо нужно отме-

НВ УПУНТ (ДІІТ)

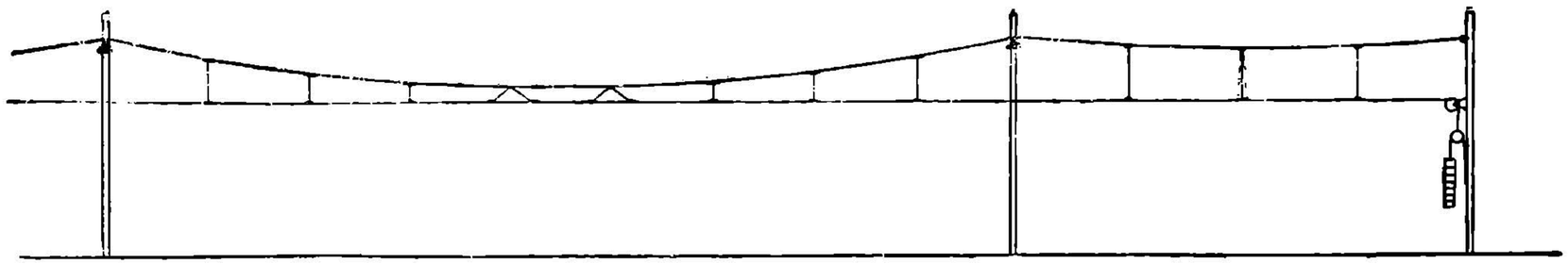


Рис. 584. Система немецкой объединенной подвески.

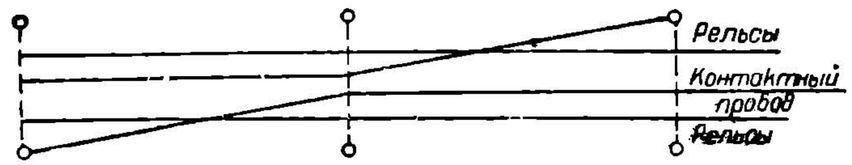


Рис. 585. Схема воздушного деления участков контактного провода с анкеровкой при двухсторонних опорах.

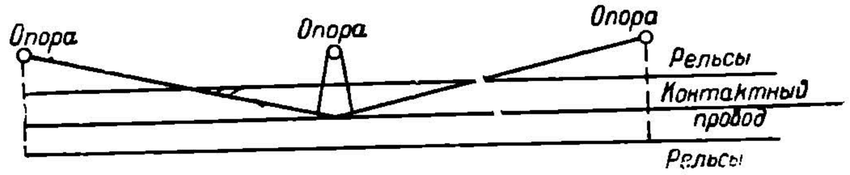


Рис. 586. Схема анкеровки при одностороннем положении опор

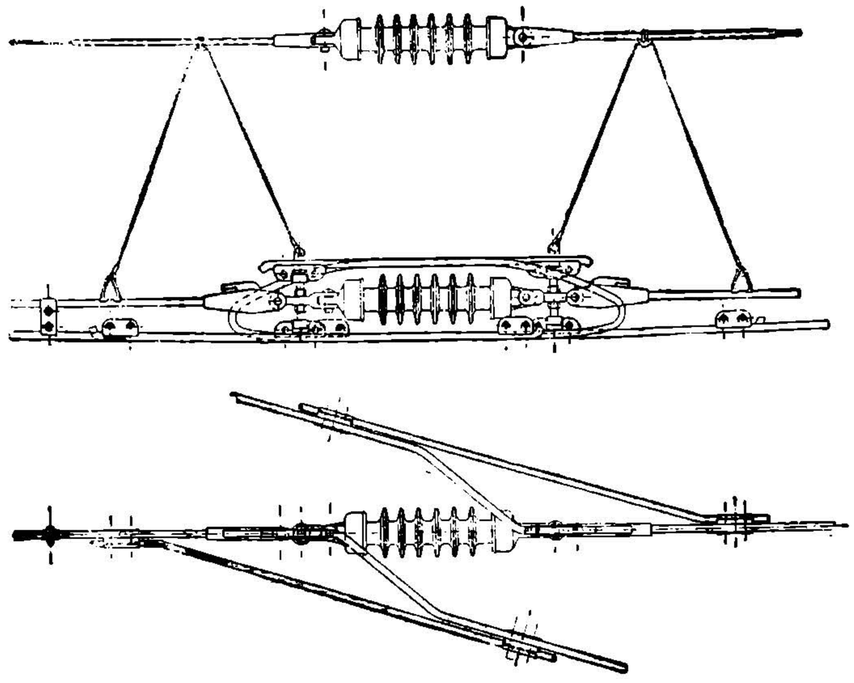


Рис. 587. Участковый делитель для целных подвесок.

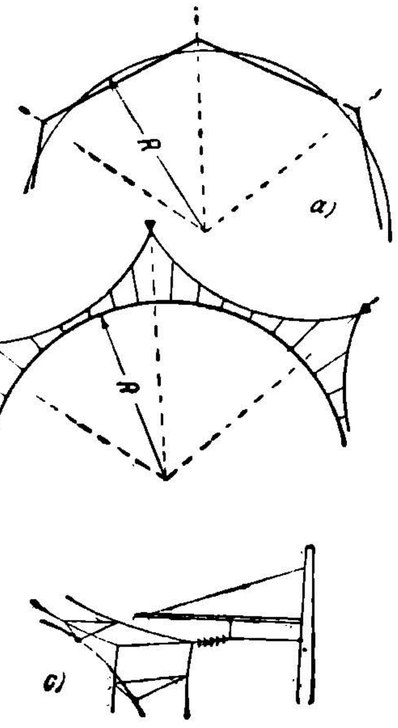


Рис. 588. Схема разбивки провода на кривых при цепных подвесках.

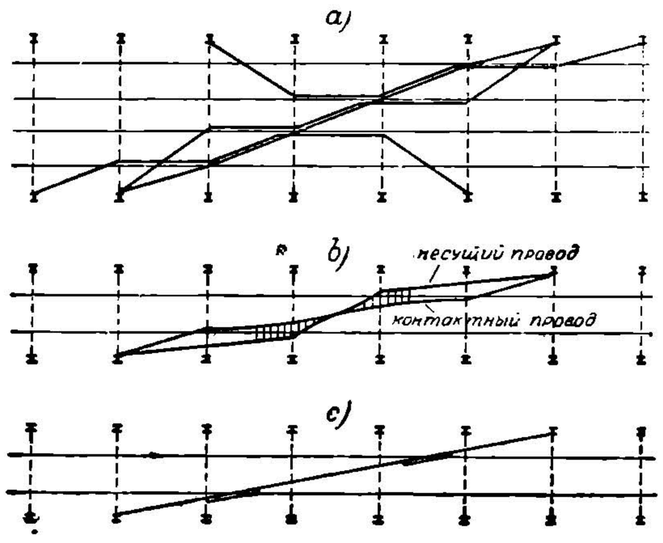


Рис. 589. Схема стрелочных переводов при цепных подвесках.

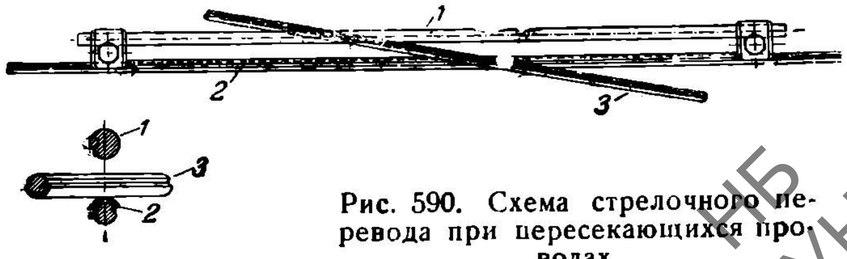


Рис. 590. Схема стрелочного перевода при пересекающихся проводах.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

тить конструкцию подвесок при разветвлениях. Примером могут служить схемы разбивки провода на стрелочных переводах (рис. 589). Под литерами *a* и *b* показаны нормальные схемы непересекающихся проводов при вертикальных и наклонных струнах. Рис. 589-*c* дает картину стрелочного перевода при пересекающихся проводах. Для пояснения последней схемы приведен рис. 590. На первый взгляд может показаться, что токоприемник при прохождении такого места должен вызывать удары по отношению к нижнему проводу. Однако, при соответствующем подборе расстояний между проводами *1* и *2* токоприемник достаточно плавно проходит через провод *2*. Данная система работает настолько удовлетворительно, что она в Германии иногда применяется даже на главных путях, где поезда движутся с большими скоростями.

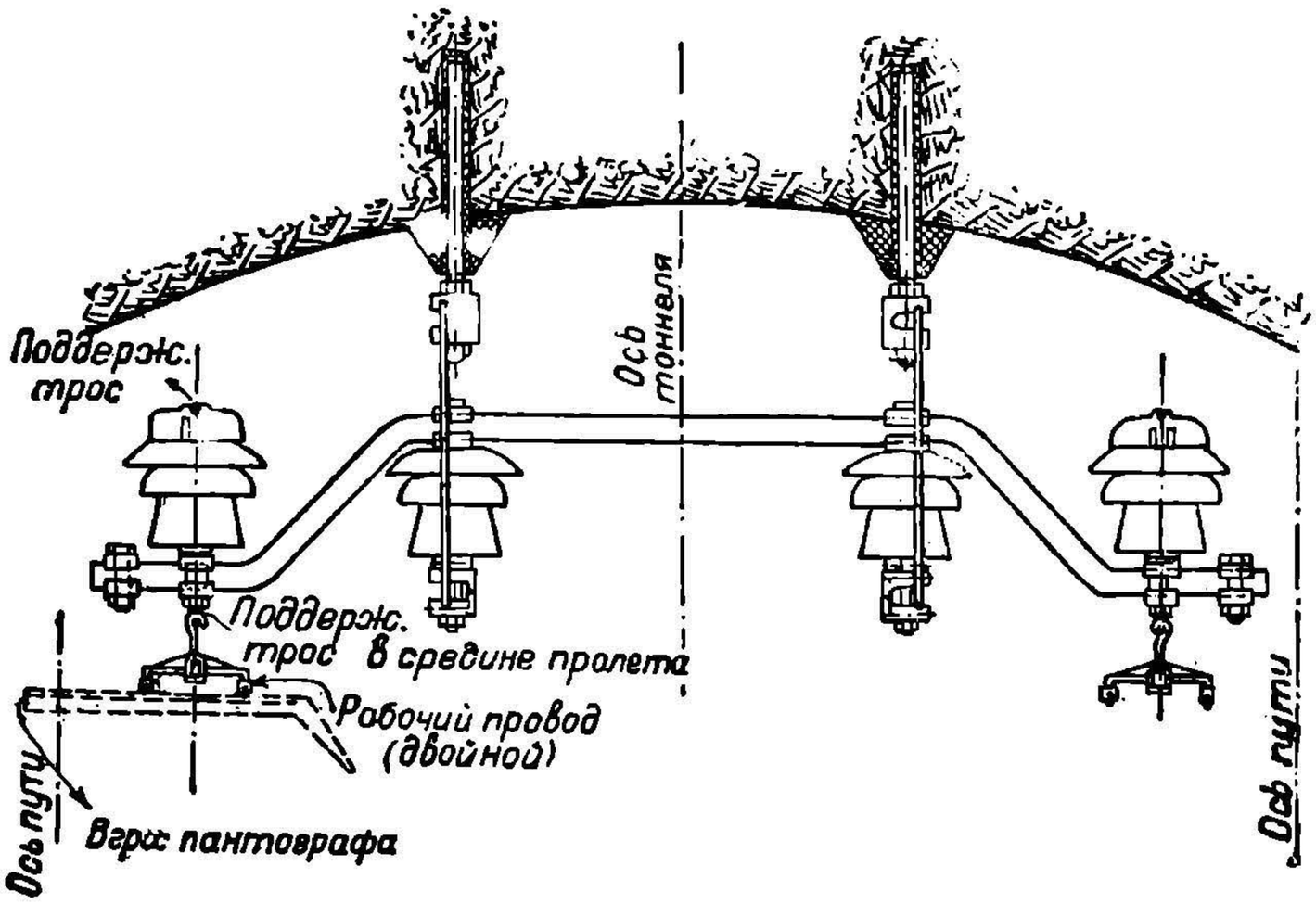


Рис. 591. Подвеска контактного провода в тоннелях.

Значительные трудности приходится преодолевать при конструировании подвесок в тоннелях. Здесь в большинстве случаев приходится отказываться по габаритным условиям от нормального типа цепных систем, прибегая даже иногда к простым подвескам. Примером подвески в тоннеле может служить схема, приведенная на рис. 591. Точно так же часто приходится отказываться от нормальных цепных подвесок при прохождении низких мостов.

Сложную конструкцию получают подвески при трехфазной тяге. Главные осложнения получаются в местах крестовин и стрелок. При двух воздушных проводах, находящихся под разными потенциалами во избежание перекрытия их одной и той же дугой токоприемника приходится в определенных местах вводить изолированные вставки, сильно усложняющие всю конструкцию подвески (рис. 592). Указанными причинами объясняется, почему при трехфазной тяге цепные подвески встречаются относительно редко. Даже при больших скоростях при них предпочитают работать на простых системах.

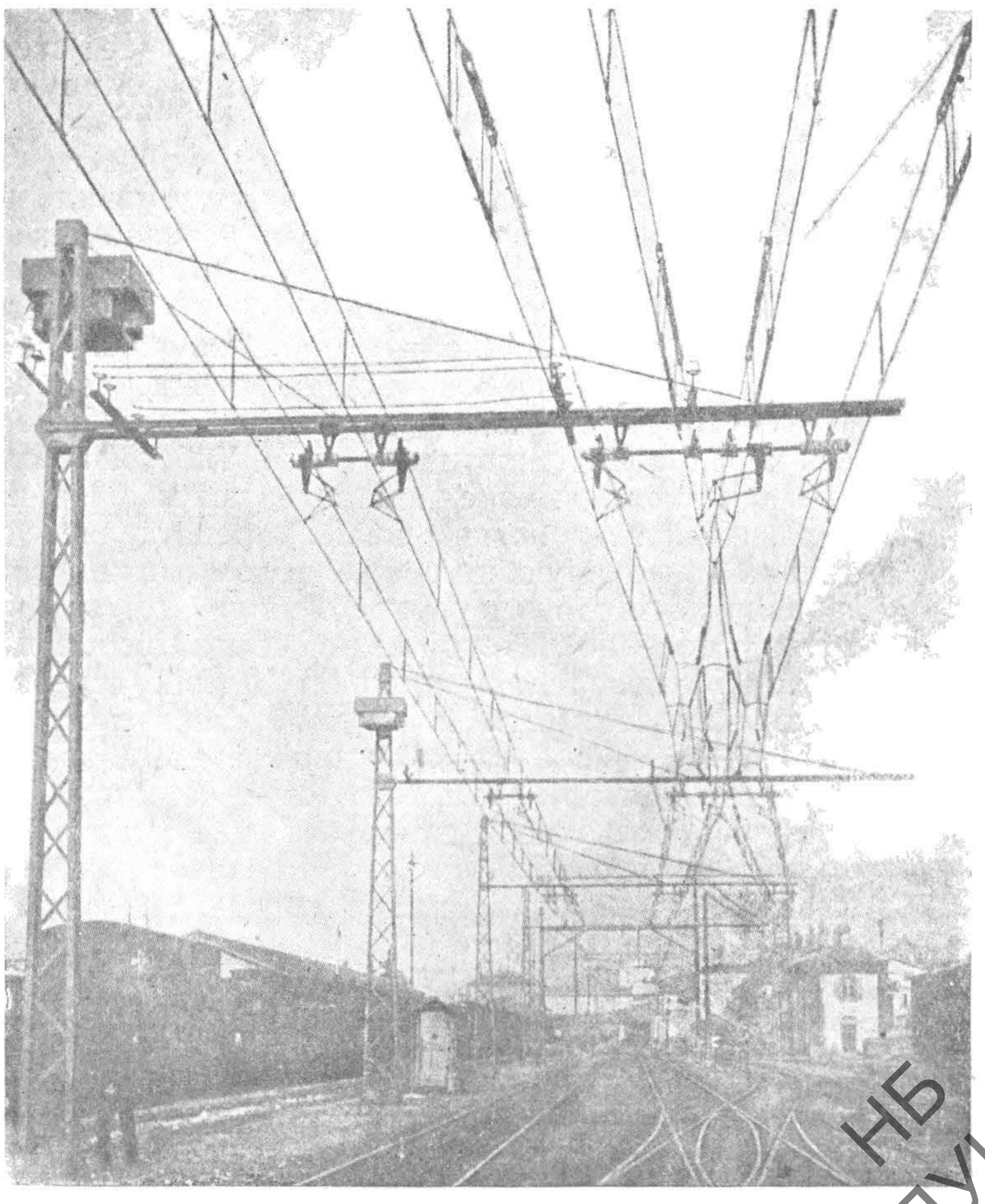


Рис. 592. Общий вид контактного провода при трехфазном токе.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

4. Изоляционные материалы и типы изоляторов.

Очень важным вопросом при конструировании контактных систем является вопрос выбора изоляционных материалов. В отношении изолирующих свойств наиболее высокими качествами обладает фарфор, особенно в отношении высокого удельного сопротивления пробою, причем влажность воздуха не оказывает почти никакого влияния на эту величину. Влияние это, если и обнаруживается, то только на поверхностном слое. Но наряду с этим фарфор имеет относительно небольшое сопротивление разрывающему усилию. Так как, с другой стороны, фарфор обладает достаточно большим сопротивлением сжатию, то фарфоровые изоляторы для больших напряжений рекомендуется конструировать так, чтобы напрягаемые части работали исключительно на сжатие. Нужно, однако, иметь в виду, что теперь фарфор вырабатывается с достаточной прочностью на разрыв. Ввиду этого в настоящее время имеется большое количество фарфоровых изоляторов, работающих на растяжение. Фарфоровые изоляторы сравнительно дороги и применяются, главным образом, в железнодорожной практике

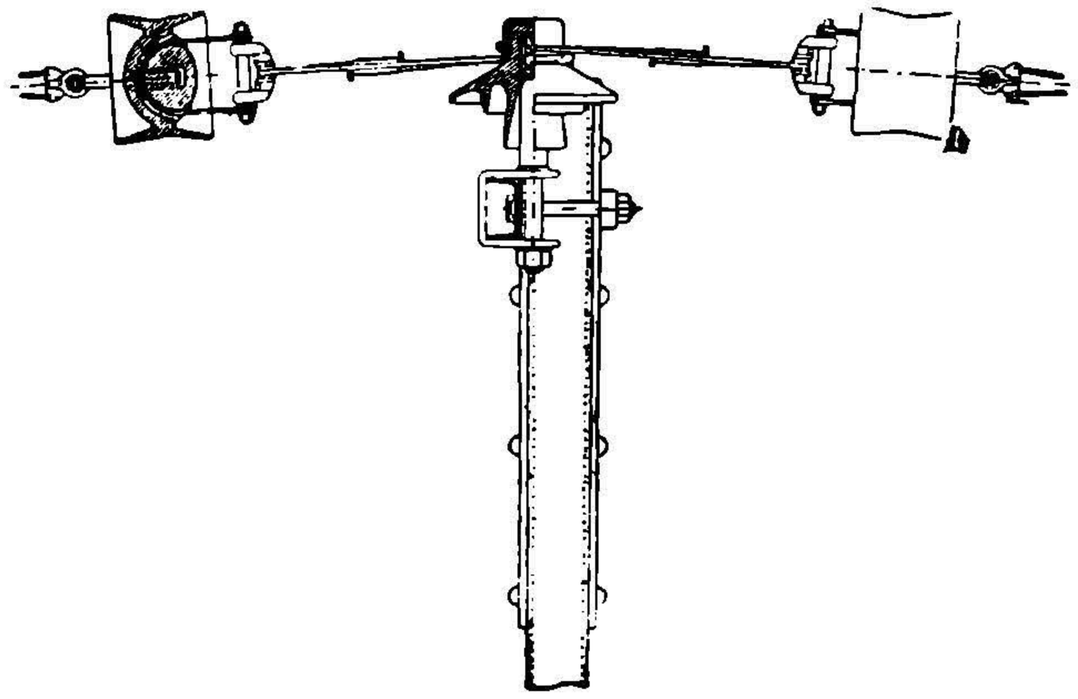


Рис. 593. Система цепной подвески со штыревыми изоляторами.

Следует отметить попытку вместо фарфора употреблять стекло высокого качества. Недостатком последнего является гигроскопичность. Значительно лучшими свойствами обладает стеатит. Преимущество его — в высоком сопротивлении на разрыв. По своим изолирующим свойствам стеатит близок к фарфору, несколько уступая последнему только в отношении мокрого разряда.

В трамвайном деле основными изолирующими материалами служат различные композиции. В основу их в том или другом виде входит каучук, причем наиболее часто встречается так называемый металло-резиновый или металло-каучуковый состав, представляющий собой твердую композицию каучука. К таким сортам относятся стабилит, летин, оконит — все они в качестве основного материала содержат каучук. Например, состав оконита таков: каучука — 49,6%, серы — 5,3%, голландской сажи — 3,2%, окиси цинка — 15,5%, окиси свинца — 26,3%, кремнезема — 0,1%. Кроме каучуковых составов употребляется иногда амброин, состоящий из окаменелых копалов и силикатов. В виде амброина выделывается также состав ирозит. Большим распространением пользуются бакелит и ригилит. Хороший состав, неподверженный воздействию влаги, представляет собой эбурин. Вполне удовлетворительным изолирующим материалом может служить дерево. В Америке этот сорт изоляции в широком употреблении. Опыты показывают, что сухое выдержанное дерево, особенно некоторые его сорта (hicoric и буковое дерево), представляют прекрасный материал для изоляции. Обычно дерево, употребляемое для изоляции, тщательно просушивается и затем подвергается пропитыванию маслом или парафинированию. Большое достоинство дерева — значительная прочность на разрыв. Деревянные изоляторы выполняются в простой форме и могут благодаря своей длине выдерживать относительно большие напряжения. Они применяются, главным образом, в качестве оттяжных. Ряд американских железных дорог применяют деревянные оттяжные изоляторы, даже при напряжениях до 6600V. В Европе не употребляют деревянных изоляторов и пользуются деревом только для участковых делителей трамвайного типа.

Большая осмотрительность нужна при разработке конструкции изоляторов для контактной системы. Условия работы изоляторов на железных дорогах сильно утяжеляются благодаря тому, что им, помимо больших тяжений, приходится очень часто выдерживать значительные добавочные напряжения, вызываемые ударными эффектами токоприемника. Изоляторы для контактных линий в основе разделяются на опорные и оттяжные. Выше были уже приведены типы изоляторов для трамваев. При цепных подвесках, предназначаемых для условий железнодорожного транс-

НБ УГУНТ (ДІІТ)

порта, трамвайный тип изоляторов является непригодным, будучи слабым как с точки зрения механической, так и с точки зрения электрической прочности.

Наиболее простым и дешевым опорным изолятором является штыревой (рис. 593). Применяется он преимущественно в Америке. При простоте его изготовления и дешевизне, он, однако, недостаточно стоек в работе. Изготовляется он обычно из фарфора.

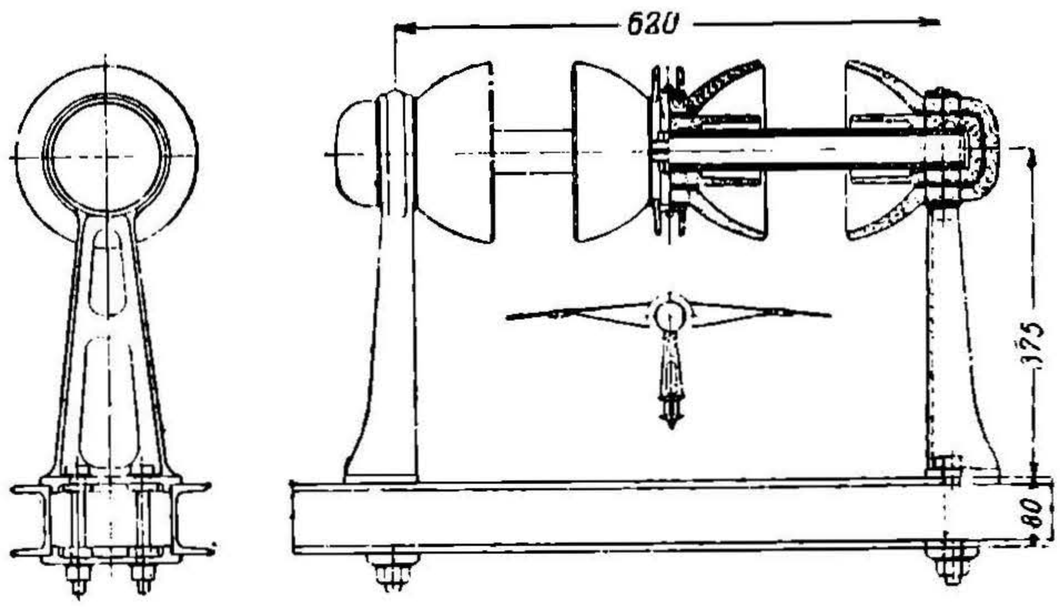


Рис. 594. Опорный изолятор типа Diabolo.

На рис. 594 приведен железнодорожный опорный изолятор, носящий название Diabolo. Этот тип в Германии пользовался очень большим распространением и еще до настоящего времени такими изоляторами там оборудовано много путей. Недостатки их — большая стоимость и тяжесть. Теперь этот тип изолятора применяется редко. Выполняется он из фарфора, работающего на сжатие.

Большим распространением теперь начинают пользоваться различного рода подвесные изоляторы. Рис. 595 дает представление об изоляторах типа „мотор-изолятор". Двухъюбочные типы применяются в особо ответственных случаях, например на станционных путях при наличии дыма. На рис. 596 представлен изолятор, носящий название „Kugelkopf". В Германии он теперь очень распространен. Особо заслуживают внимания ребристо-стержневые изоляторы, получающие теперь благодаря хорошим изолирующим свойствам широкое применение (рис. 597). Эти типы начали входить в практику с того времени, как научились делать изоляционный материал, удовлетворительно работающий на растяжение. Подвесные изоляторы выполняются преимущественно из фарфора. Однако, имеются типы—главным образом подвесные — и из стеатита.

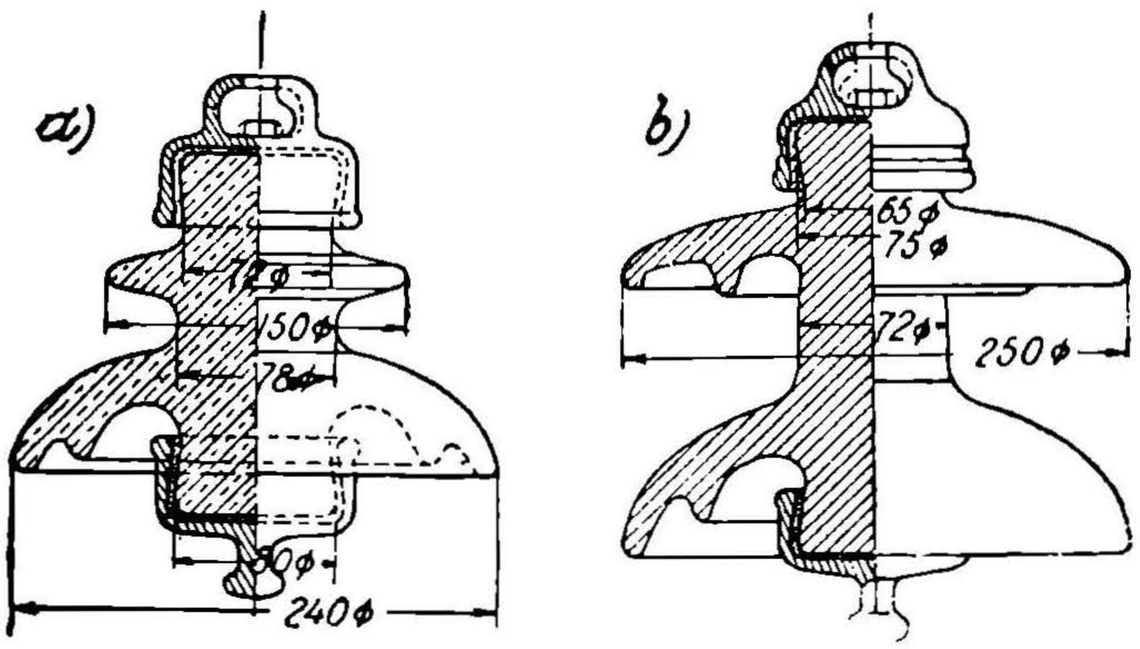


Рис. 595. Мотор-изолятор.

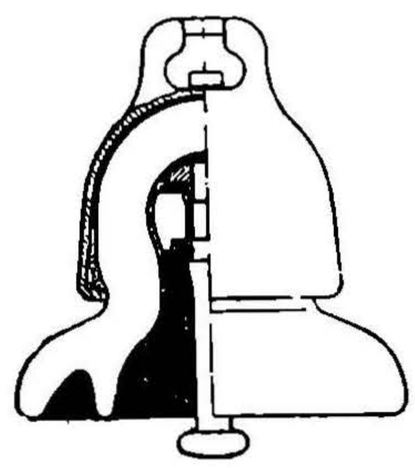


Рис. 596. Изолятор типа Kugelkopf

Переходя к оттяжным изоляторам, прежде всего полезно отметить тип Hewlett'a (рис. 598), одно время пользовавшийся большим распространением в Германии. Отрицательная сторона этого типа в том, что в каналы легко попадает дождевая вода и, кроме того, с них вследствие трения металлической ленты стирается довольно быстро глазурь. В результате имеют место частые пробои изоляции, сопровождаемые перегоранием металлических лент и, что всего неприятней, падением

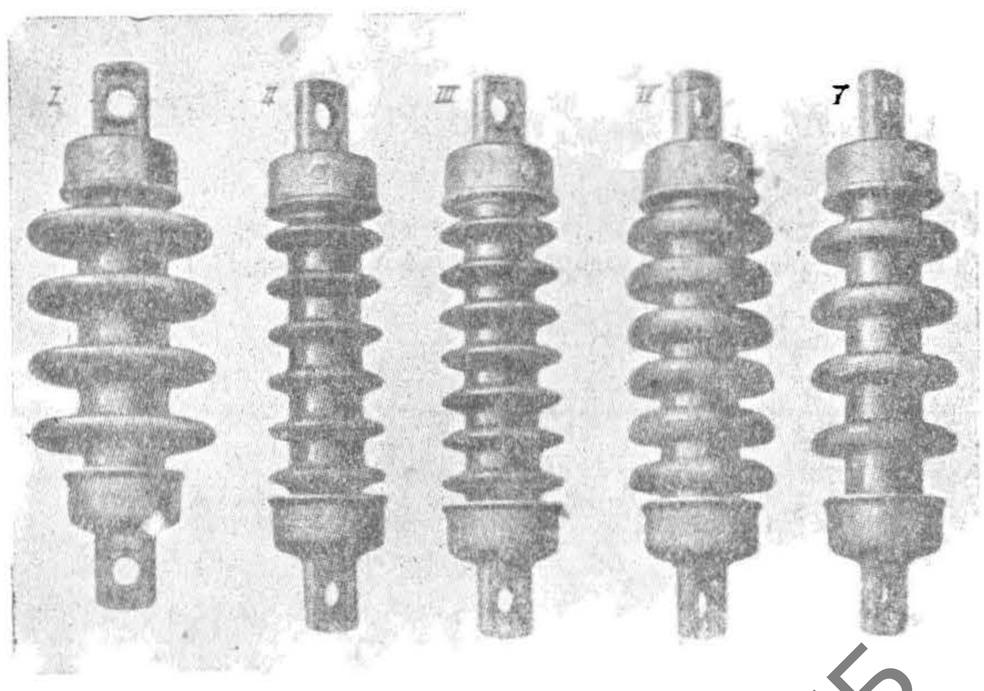


Рис. 597. Ребристо-стержневые изоляторы.

НБ УЛУНТ (ДІТ)

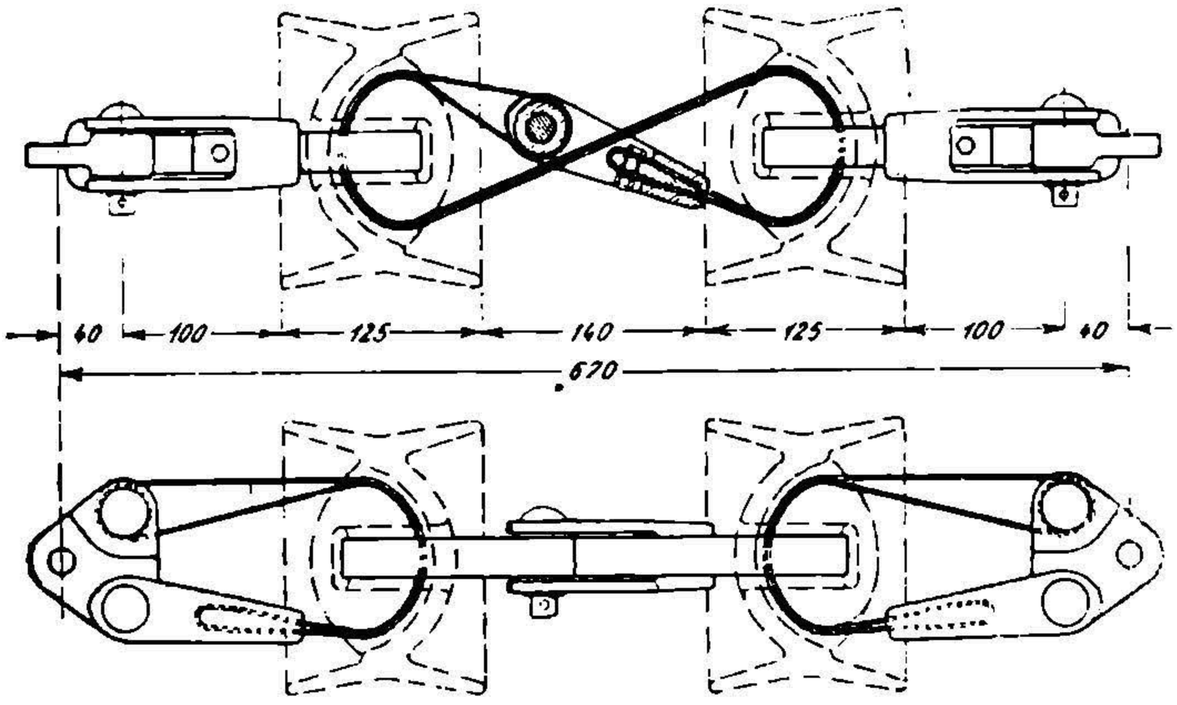


Рис 598. Оттяжные изоляторы типа Hewlett'a.

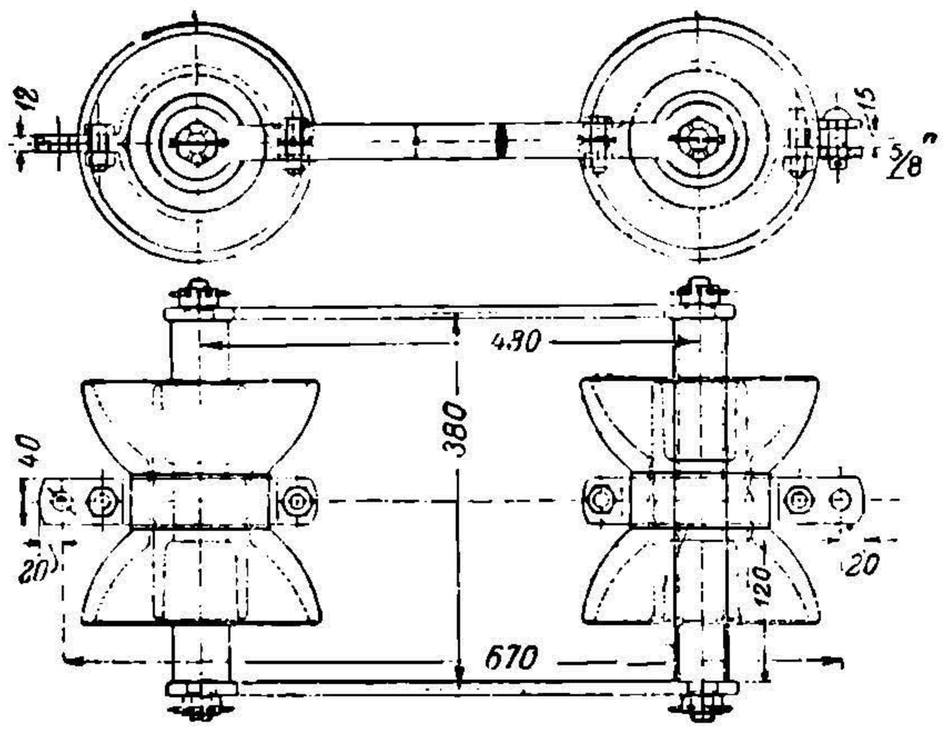


Рис. 599. Оттяжной блок изоляторов немецких ж. д.

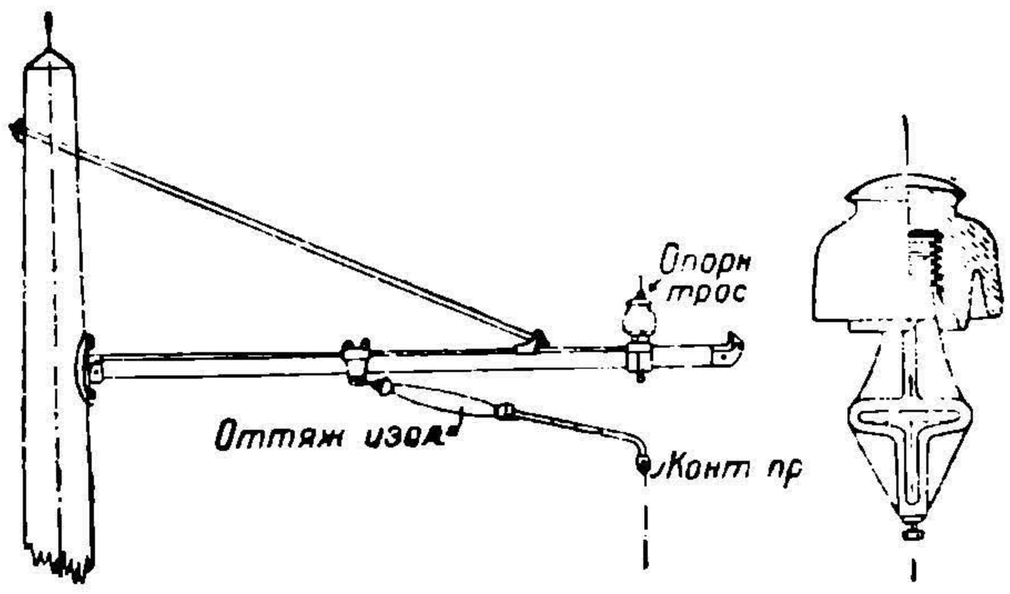


Рис. 600. Консоль деревянной опоры с деревянным оттяжным изолятором.

проводов. Гораздо более надежна система немецкого оттяжного блока (рис. 599).

В целях уменьшения числа отдельных типов изоляторов в настоящее время имеется тенденция брать одни и те же изоляторы в качестве и опорных и оттяжных. В этом отношении особенно удобны подвесные типы, при которых отмеченная тенденция почти всегда проводится в жизнь. В качестве примера оттяжного деревянного изолятора американского типа может служить приведенный на рис. 600.

5. Опоры и системы поперечного крепления проводов.

Опоры в настоящее время применяются деревянные, железные и железобетонные.

Преимущество деревянных столбов заключается в относительной их дешевизне, а также легкости. Монтаж их также значительно дешевле и проще других систем. Дерево для столбов необходимо брать по возможности сухим. Только что срезанное дерево содержит до 40% влаги. Через месяц обычно количество влаги уменьшается до 30% и через год до 20%. Для защиты столбов от проникновения в них сырости рекомендуется подвергать дерево перед употреблением пропитке хлористым цинком, хлористой ртутью, креозотом или вообще каким-либо антисептическим веществом, предохраняющим его от сырости и различных грибков. Перед пропиткой дерево тщательно просушивают, затем подвергают в особых котлах действию вакуума (около 1/5 atm), после чего ведут пропитку в тех же котлах под давлением в 6—8 atm. Срок работы деревянных опор зависит от сорта дерева и колеблется от 4 до 30 лет. В табл. 84 приведены данные относительно длительности службы деревянных опор.

ТАБЛИЦА 84.

Срок службы деревянных опор.

Сорт дерева	Непропитанные столбы	Пропитанные столбы
Ель и пихта	4— 6 лет	8—14 лет
Сосна	8—10	9—12
Лиственница	12—15	15—30
Дуб	12—25	20—30

Употребляют также для опор еще более прочные сорта дерева, например кедр или бамбук.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Очень полезно перед установкой деревянной опоры просмаливать или подвергать обжигу зарываемую часть опоры. Иногда деревянные столбы ставят на рельсовые ноги или даже на специальные основания (рис. 601), что значительно удлиняет срок их службы. Установленный столб целесообразно покрывать краской.

В некоторых случаях для усиления деревянной опоры снабжают ее оттяжкой из стального троса.

На рис. 602 изображена схема установки деревянного столба, причем значения различных величин обычно следующие. Полная высота столба $H = 8 — 12$ m, диаметр столба внизу $D = 22 — 30$ cm, диаметр столба вверху $d = 18 — 22$ mm, глубина котлована

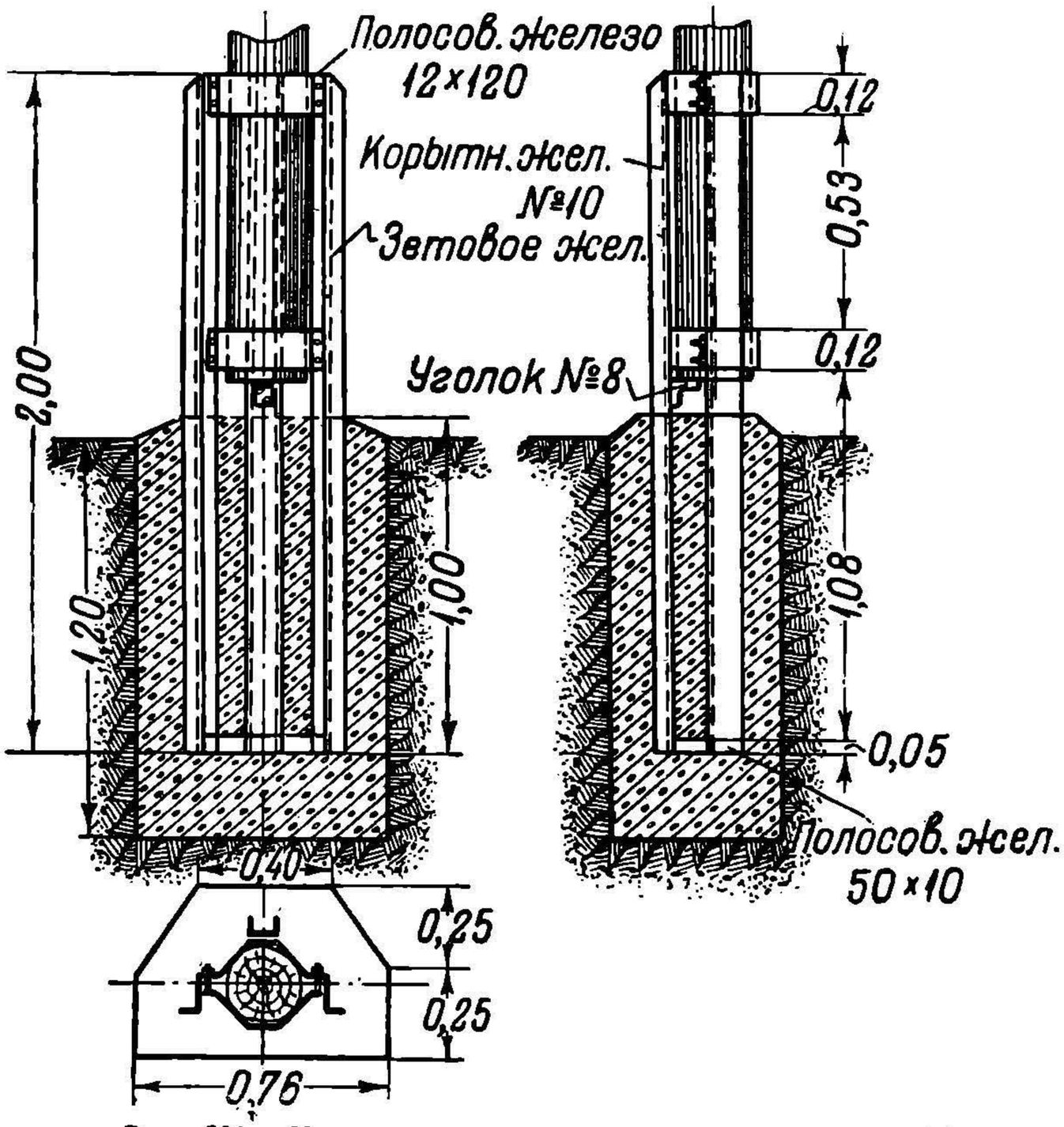


Рис. 601. Усиленное основание для деревянных опор.

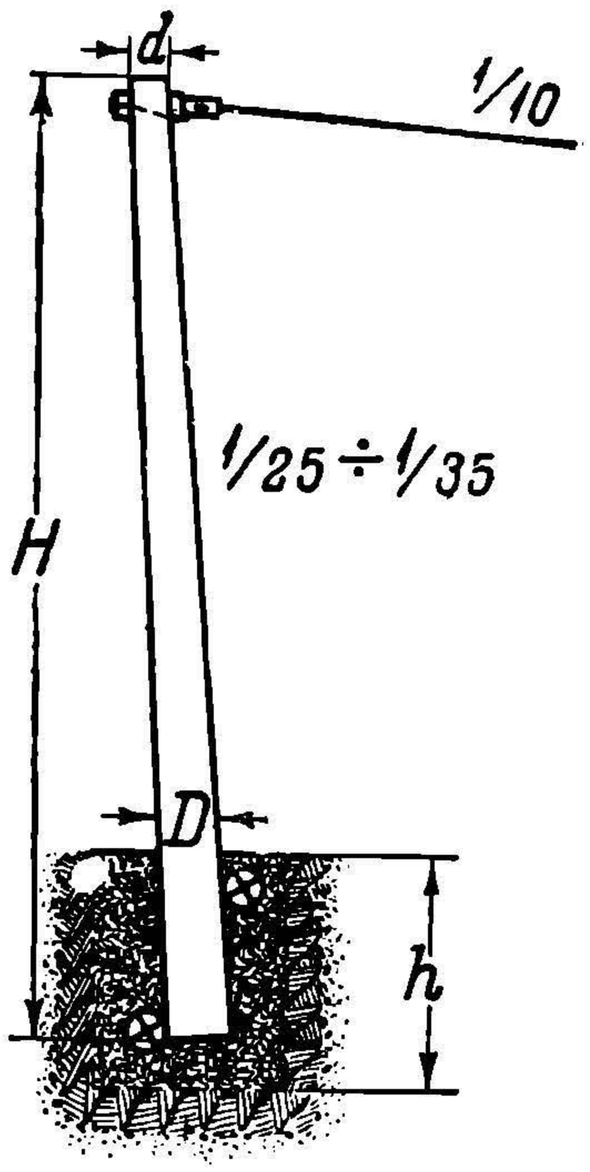


Рис. 602. Общий вид установки деревянной опоры.

$h = 1{,}5 — 2$ m, наклон столба — от 1 : 50 до 1 : 25, наклон оттяжки — до 1 : 10, допустимое напряжение — от 70 до 120 kg/cm²; утончение столба, т. е. изменение диаметра на единицу высоты столба – 1 : 100. Наиболее ходовые размеры столбов: длина 10—11 m (5 саж.), диаметр в верхнем отрубе — 17—20 cm, (4—4½ вершка) С увеличением длины стоимость столба значительно возрастает.

Большое применение в практике железных дорог и трамвая имеют металлические решетчатые опоры, которые конструируются из уголкового или из швеллерного железа (рис. 603). Реже делаются опоры из таврового железа. Решетчатые опоры иногда устраивают съемного типа, т. е. фундамент опоры выполняется отдельно, и после его установки верхняя часть опоры прикрепляется к нему болтами. Сопротивление на изгиб решетчатых столбов составляет от 7 до 15 kg/mm².

Большим распространением в трамвайном деле пользуются трубчатые опоры (рис. 604). Последние разделяются на два основных типа: со швами и без швов. Наличие швов ослабляет прочность опор примерно на 90%. Такие опоры выдерживают напряжение на разрыв порядка 30—40 kg/mm².

Высокими качествами отличаются трубчатые опоры без швов. Из них наибольшего внимания заслуживают опоры манесмановского типа. Эти столбы вырабатываются путем вальцовки труб из стальных болванок. Вальцовка производится при красном и белом калении, причем из вальцовки выходят отдельные звенья труб длиною от 4 до 6 m, с разрывным усилием в 50—60 kg/mm². Другой способ производства трубчатых опор, по системе Erhart'a, основан на холодной обработке

НЕБ УКУНТ (ДІІТ)

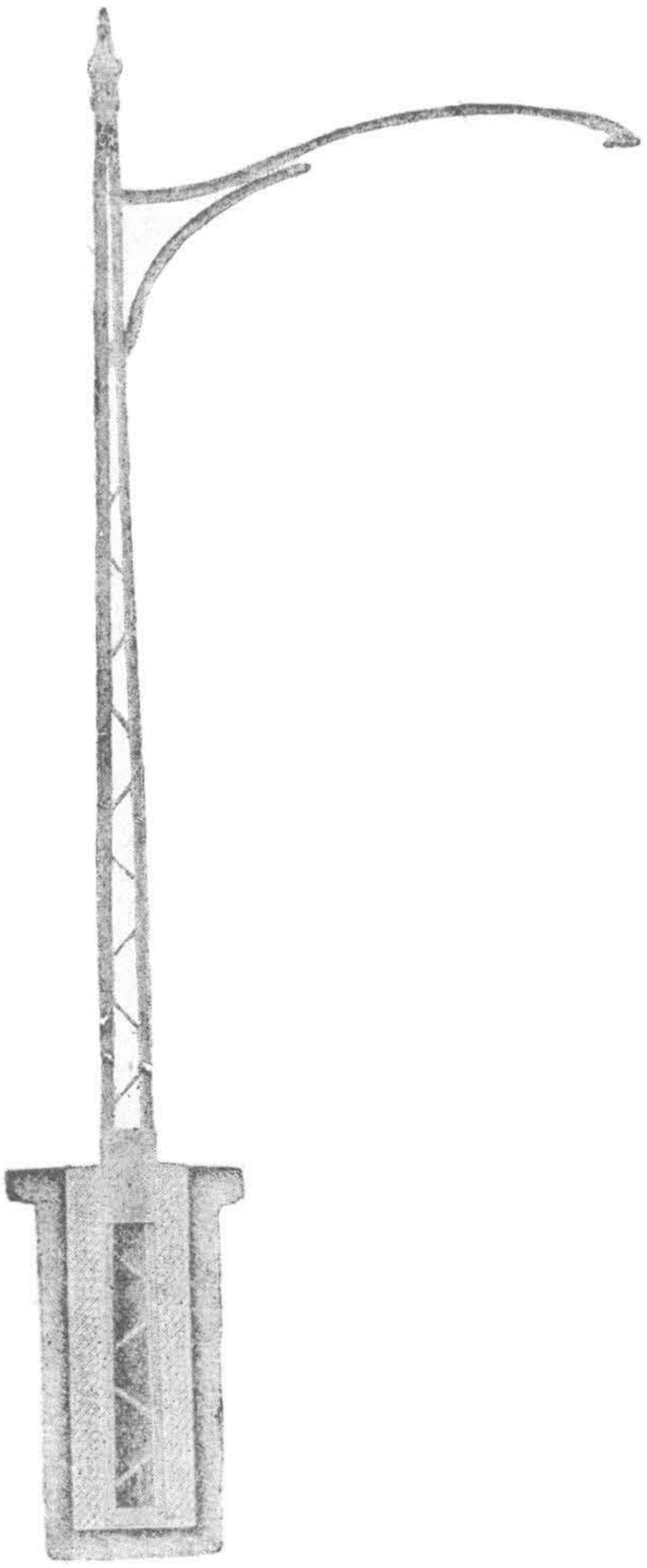


Рис. 603. Общий вид решетчатой опоры из швеллерного железа.

стальных болванок. Толщина стенок при таком производстве доводится до $3^1/_2$ mm при длине отдельных звеньев в 3 m. Метод этот, ввиду его большой стоимости, теперь выходит из практики. Отдельные звенья трубчатых опор соединяют, надевая их одно на другое. Трубе, входящей внутрь, дается некоторое уширение. Внешняя же, охватывающая ее, при монтаже подогревается, чем обеспечивается при надевании ее на внутреннюю плотное между ними соединение. В общем трубчатые опоры имеют красивый и изящный вид, особенно если они украшены фигурной арматурой (рис. 604).

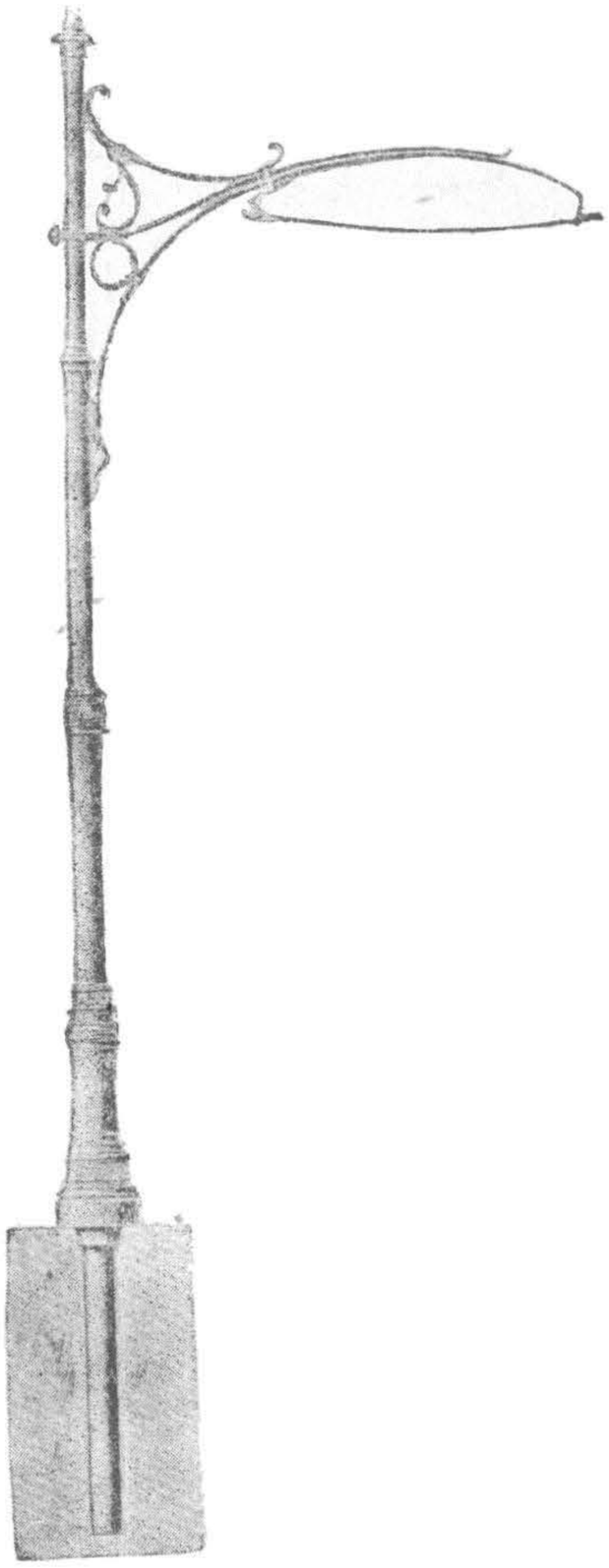


Рис. 604. Общий вид трубчатой опоры.

Тросы и оттяжки прикрепляются к железным столбам с помощью особых колец или хомутов, в которые завинчиваются натяжные крюки. Для этих крюков напряжение на разрыв может быть взято до 250 kg и выше. Наклон оттяжек для железных и трубчатых столбов — от 1:10 до 1:12. Основание для железных и трубчатых столбов делается обычно бетонным с глубиной погружения от 1,5 до 2 m. Ширина бетонного слоя доводится до тройной ширины или диаметра опоры. Столбы ставятся с наклоном около 1:45.

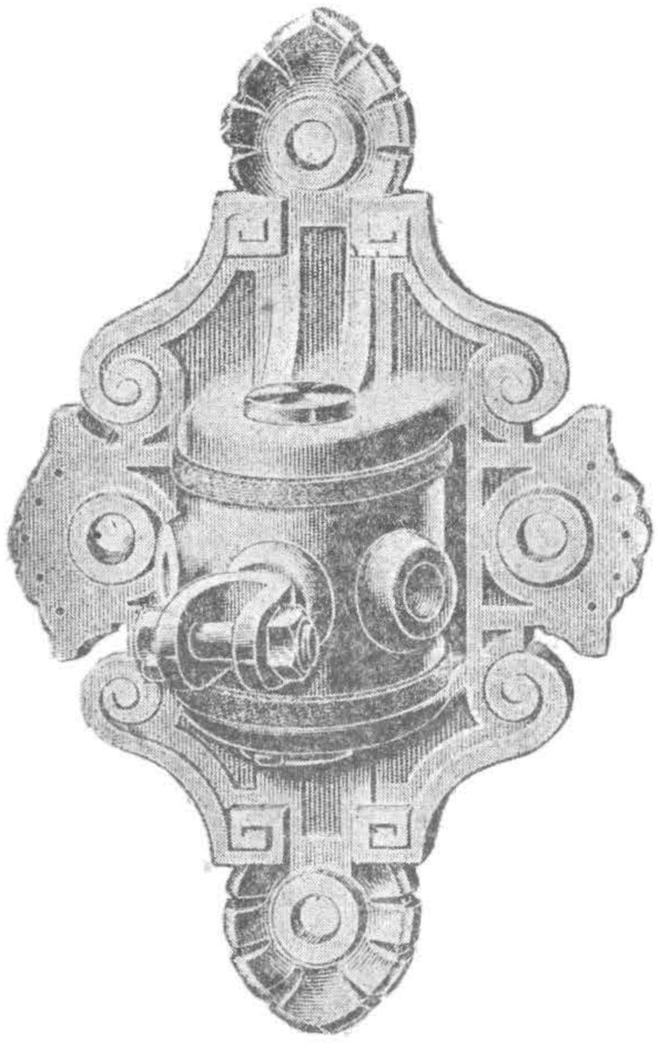


Рис. 605. Стенная розетка для подвески контактного провода.

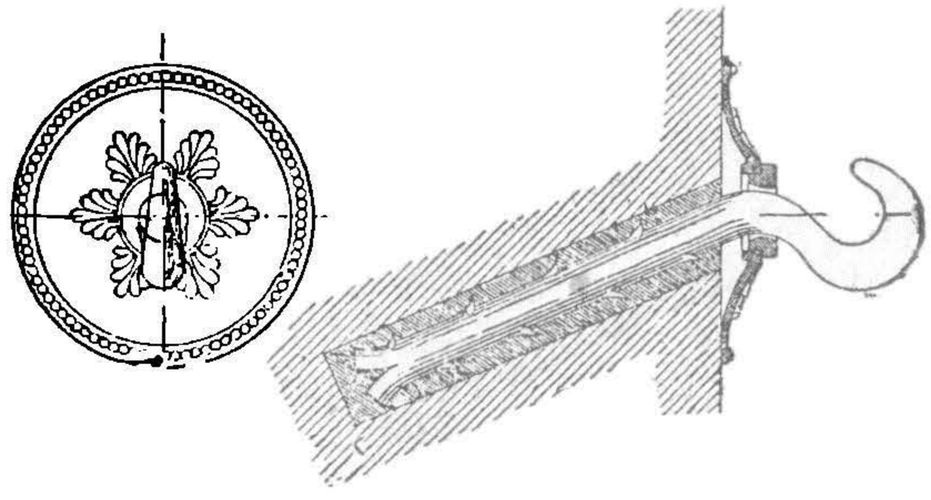


Рис. 606. Крюк для крепления к стенам контактной подвески.

Кроме указанных систем, в последнее время начали входить в употребление, главным образом на железных дорогах, железобетонные столбы трубчатой формы.

НБ УИУНТ (ДІІТ)

Отзывы о применении таких столбов вполне удовлетворительны. Эти столбы были установлены, между прочим, на Силезских железных дорогах в Германии. Опыты, производимые с ними в Швеции, также дали положительные результаты. Недостаток их — в трудности транспорта и монтажа, так как перевозить их и монтировать

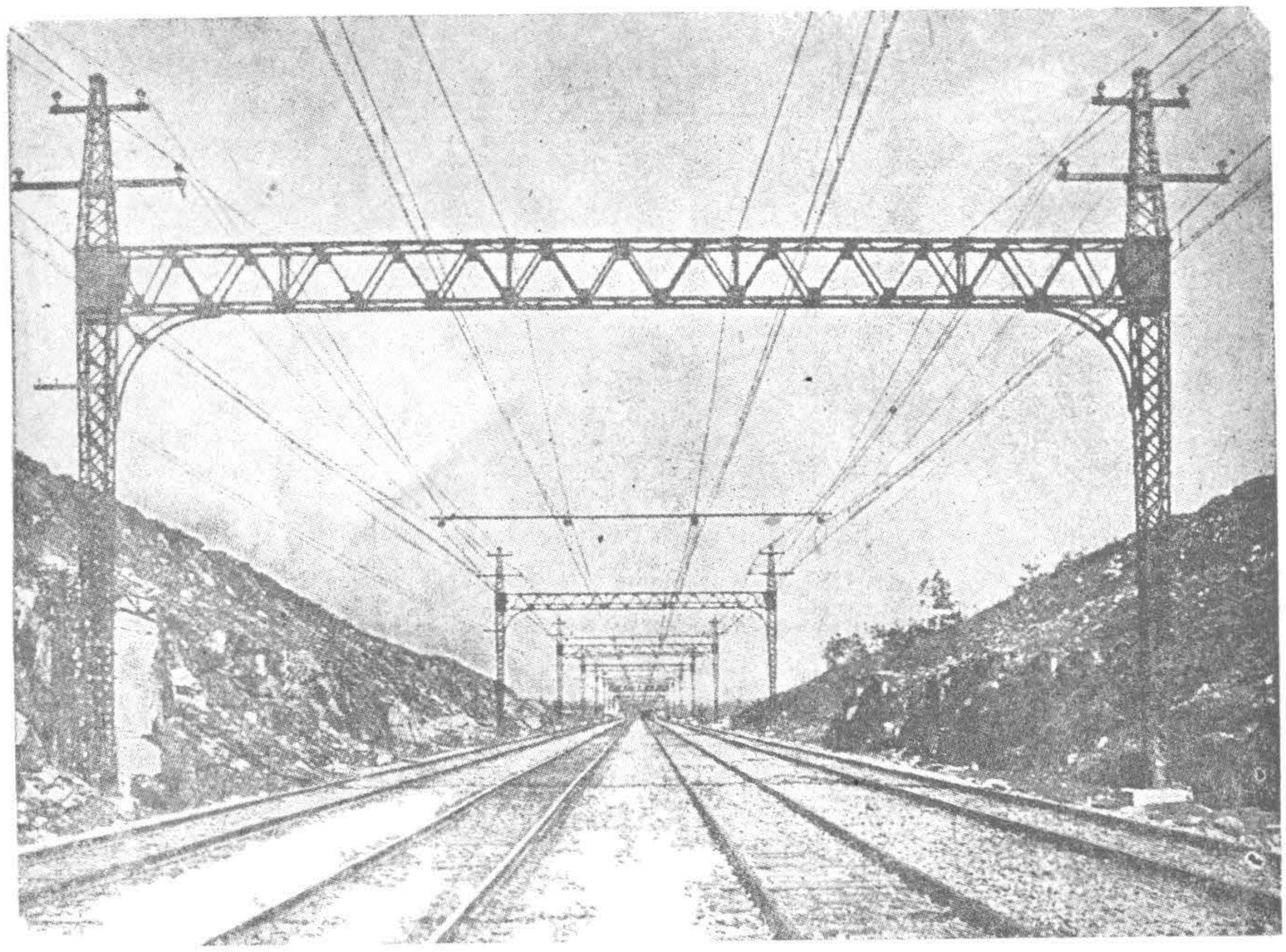


Рис. 607. Цепная подвеска на поперечинах в виде фермы.

по отдельным частям, как, например, клепаные, не представляется возможным.

В тех случаях, когда на улицах нельзя поставить столбы, натяжные тросы часто укрепляются в стенах каменных зданий. Для этой цели применяются или особые стенные розетки, или крюки причем для розеток с четырьмя болтами натяжение троса может доходит до 250—500 kg и даже до 1 000 kg (рис. 605 и 606).

Крепление опорных изоляторов к опорам производится различным образом. Первые системы цепных подвесок крепились чаще всего с помощью жестких поперечин при постановке столбов с обеих сторон пути. Поперечины делались из швеллерных балок или даже представляли собой целые ферменные конструкции (рис. 607). Недостаток таких поперечных конструкций — их тяжесть, а главное, очень пло-

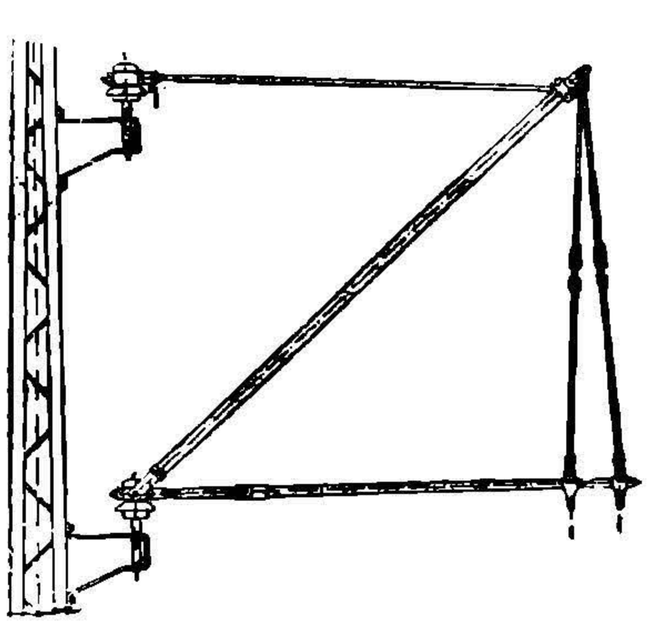


Рис. 608. Система кронштейнов для подвески при штыревых изоляторах.

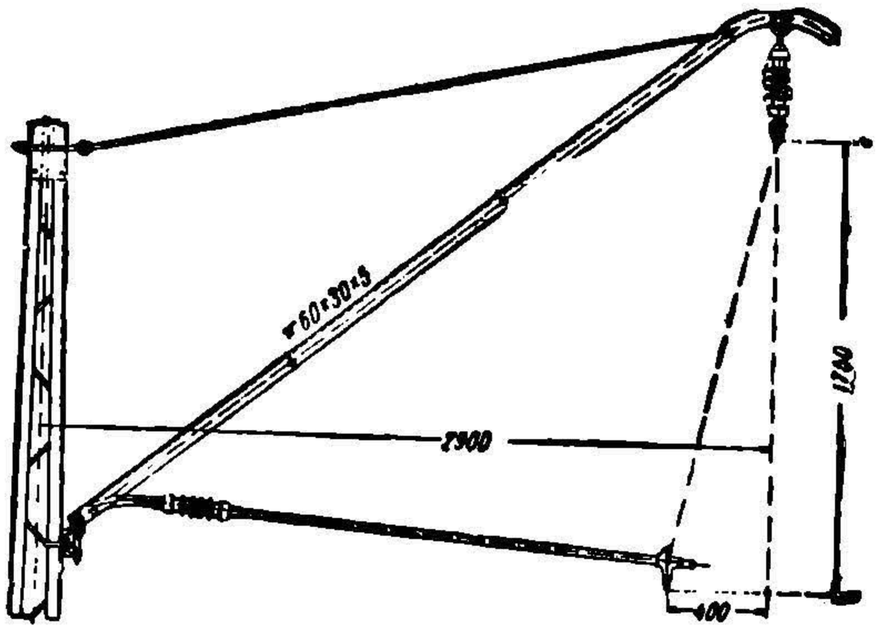


Рис. 609 Система кронштейнов для подвески при ребристо-стержневых изоляторах.

хая видимость вдоль пути, что весьма затрудняет своевременное пользование сигналами. Ввиду этих затруднений теперь предпочитают осуществлять подвеску с помощью кронштейнов при постановке для каждого пути опор с одной стороны.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Кронштейны, применяемые в условиях электрических железных дорог, выполняются самых разнообразных конструкций. Во многих случаях, как, например, на шведских железных дорогах, кронштейны имеют возможность поворачиваться, что особенно рационально, когда трос и контактный провод имеют автоматическое натяжение.

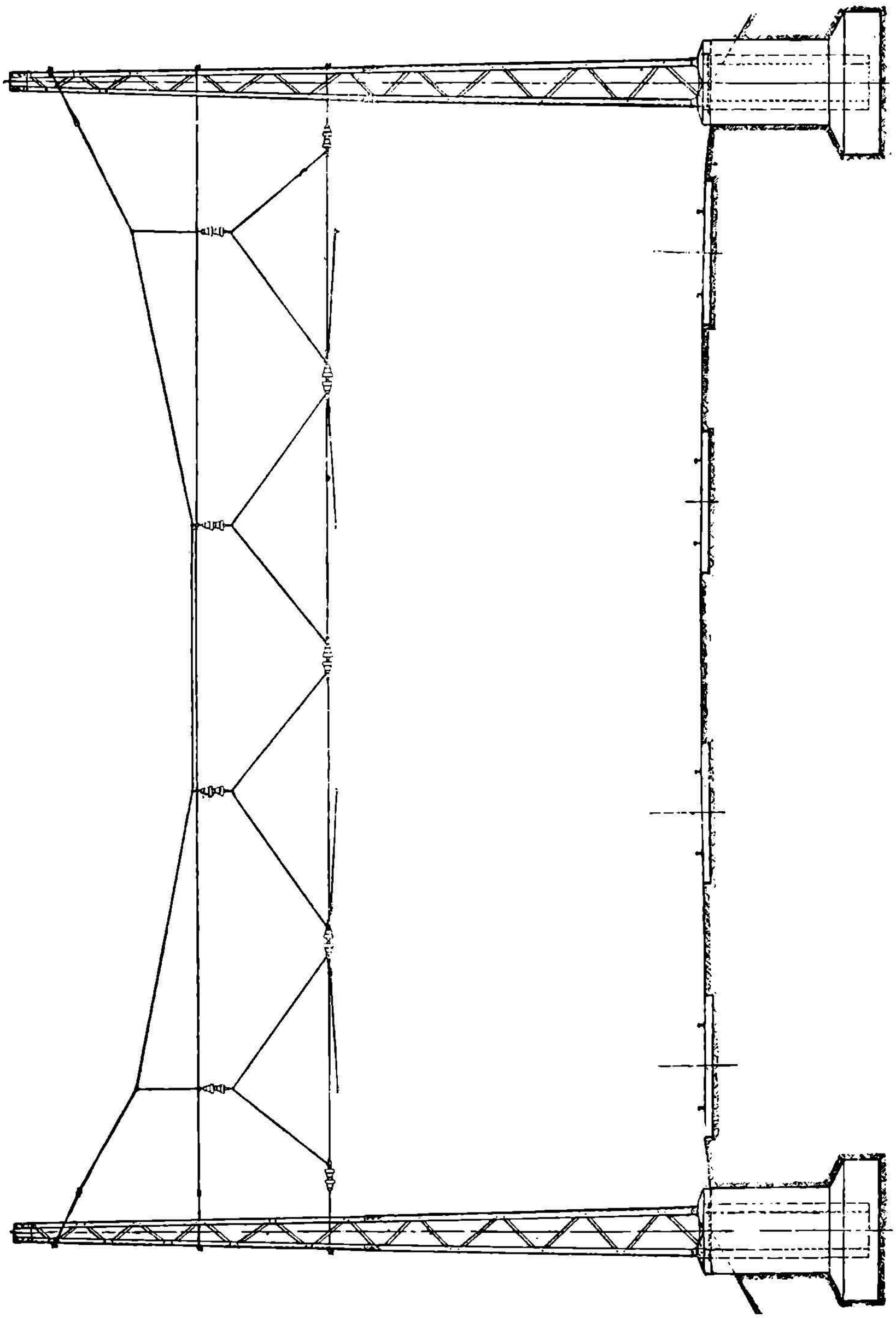


Рис. 610. Подвеска на гибких поперечинах.

При поворотных кронштейнах значительно облегчается работа опоры в случае обрыва проводов, и, кроме того, вся система получается более эластичной (рис. 608 и 609).

Значительным распространением пользуются гибкие поперечины, состоящие из тросов (рис. 610). Такая конструкция очень удобна с точки зрения видимости сигналов, но при ней значительно утяжеляются опоры. Подобные системы особенно рациональны при большом количестве путей. Применяются они очень часто на стан-

НВ УДУНТ (ДІІТ)

циях, где перекрывать пути жесткими поперечинами часто не представляется возможным по габаритным условиям и по условиям видимости сигналов.

Следует обратить внимание, что опоры контактной системы часто используются и для подвески к ним вспомогательных фидеров, а иногда и для линии передачи, питающей данную дорогу.

6. Токоприемники при верхнем контактном проводе.

Для токособирания в зависимости от того или другого типа подвески применяются различные системы токоприемников. Основное задание при конструировании токоприемника заключается в придании ему возможно большей эластичности при одновременном достижении надежного контакта.

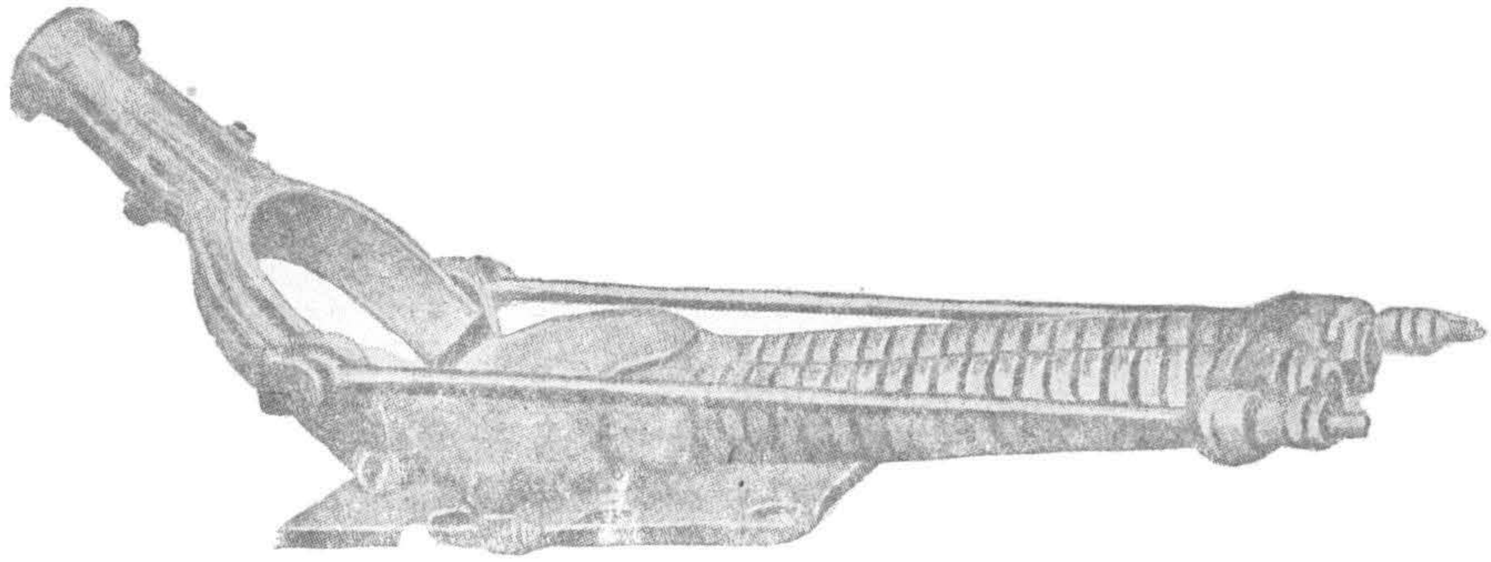


Рис. 611. Основание для роликового токоприемника.

Система роликового токоприемника дана на рис. 538 и 611. Основание роликового токоприемника должно обеспечивать надлежащее нажатие ролика на провод и в то же время оно должно в случае нужды делать возможным круговой поворот штанги. Давление роликового токоприемника на контактный провод колеблется от 9 до 20 kg. Нормальный угол наклона штанги приемника к горизонтали — около 30°. Как уже отмечалось выше, ролик иногда заменяется башмаком (рис. 540).

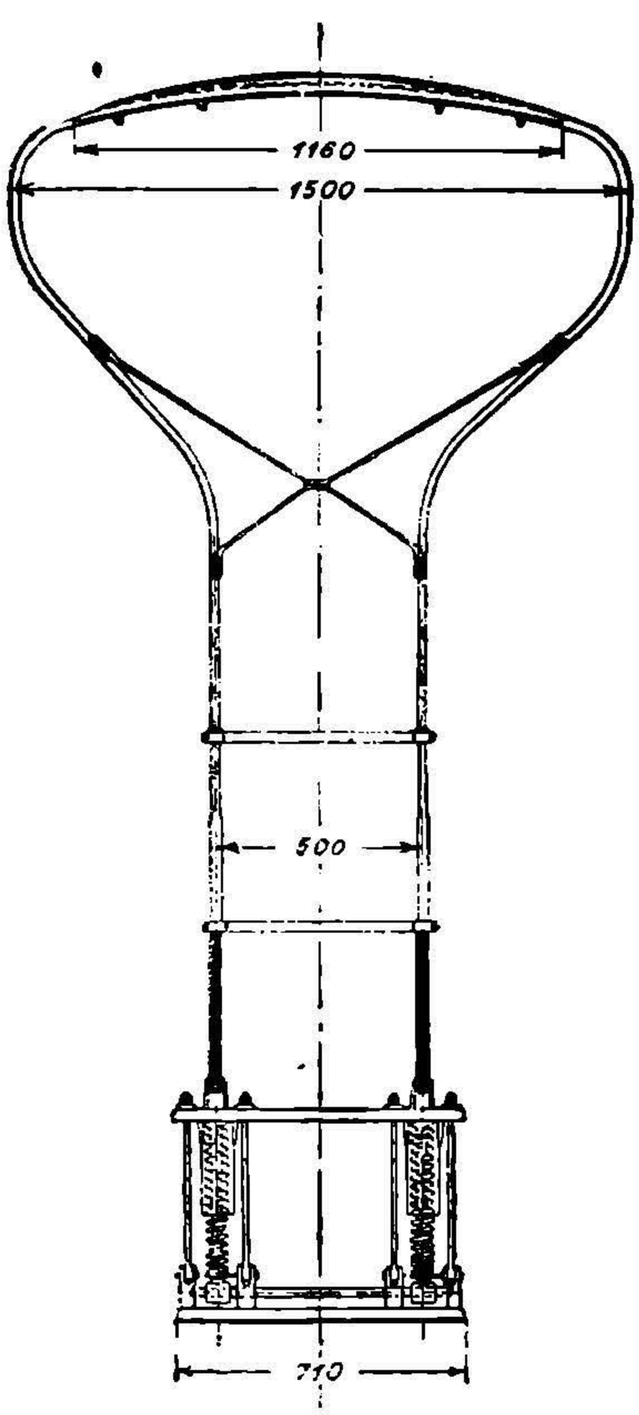


Рис. 612. Бюгельный токоприемник системы AEG.

Простейшим типом токоприемника с контактной дугой является бюгель. Конструкций таких токоприемников очень много, причем они, главным образом, различаются по конструктивному выполнению оснований. Пружины для бюгельных оснований берутся спирального типа и располагаются горизонтально (рис. 539) или вертикально (рис. 612). Последний тип, как имеющий два ряда пружин, дает особенно хорошие результаты.

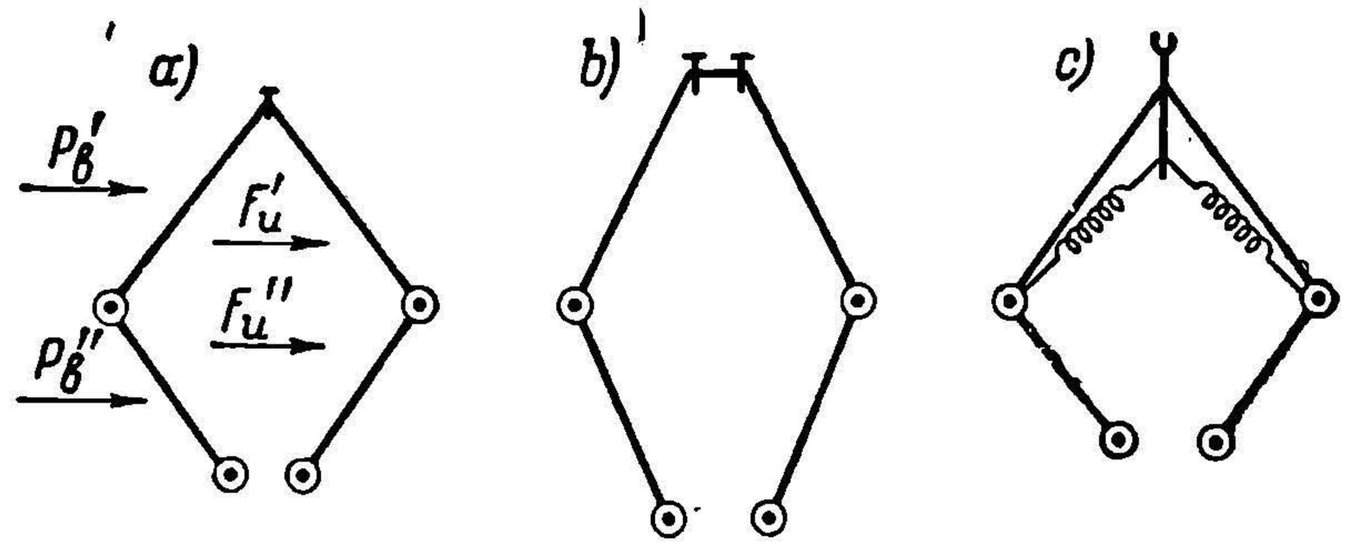


Рис. 613. Схемы токоприемников типа пантографа.

Давление дуги бюгеля на контактный провод берется от 4 до 7 kg. Угол наклона к горизонтали около 45°. Бюгель применяется, главным образом, в трамвайной практике.

Для условий железнодорожного движения приходится прибегать к более совершенным типам токоприемников. Основной недостаток бюгеля в том, что вследствие одностороннего действия на него сопротивления воздуха и неуравновешенного действия инерции при

РВ УРУНТ (ДІТ)

движении дуга имеет склонность отскакивать от провода. Кроме того, бюгель и по механическим своим качествам мало пригоден для скорого движения и тяжелых поездов. Для таких условий приходится переходить к более совер-

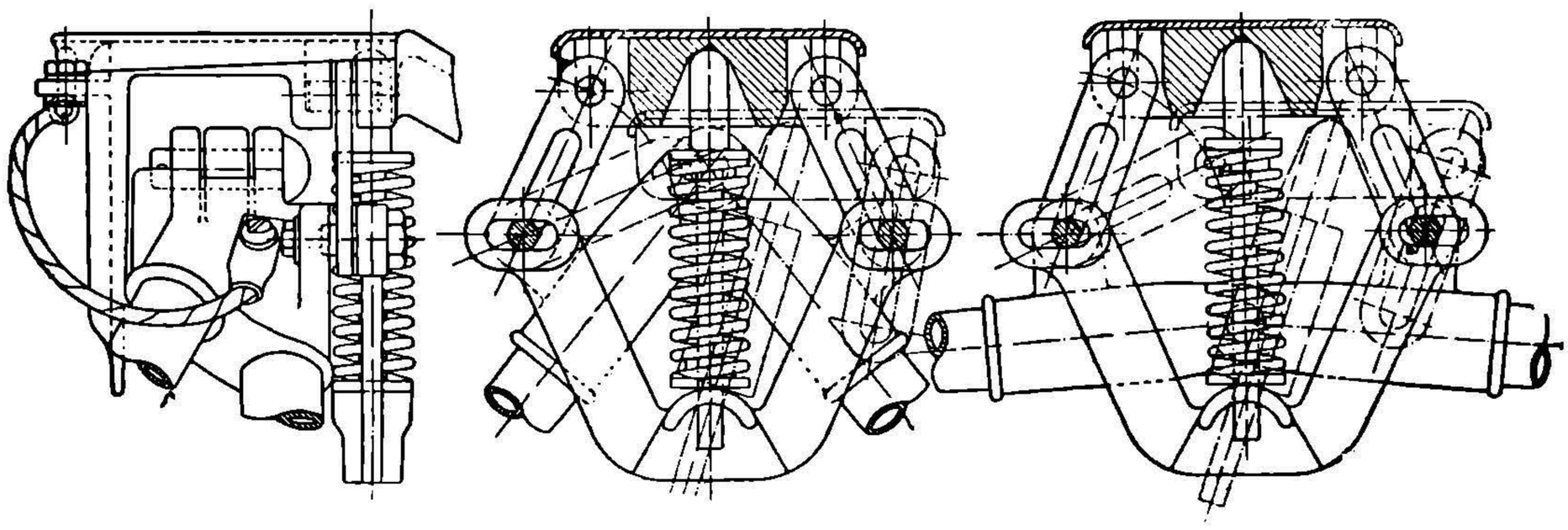


Рис. 614. Система пружинного крепления контактной лыжи пантографа к его раме.

шенным токоприемникам, получившим в виду устройства своей рамы название пантографов. На рис. 613 приведены схемы современных пантографов. Как видно из рис. 613, силы давления ветра $P_в$ и силы инерции F_u, вызываемые движением поезда, практически дают по отдельным звеньям составляющие, которые в отношении подъема и опускании пантографа взаимно компенсируются. Пантограф на рис. 613-а принадлежит к американскому типу. Он имеет мощную дугу, называемую лыжей. Иногда, при особенно больших токах, применяют две лыжи (рис. 613-b). Дуга в американском пантографе крепится или наглухо к раме или же с помощью коротких спиральных пружин (рис. 614). Токоприемник рис. 613-с принадлежит к числу пантографов с особо легкой контактной дужкой, пружинно соединяемой с рамой.

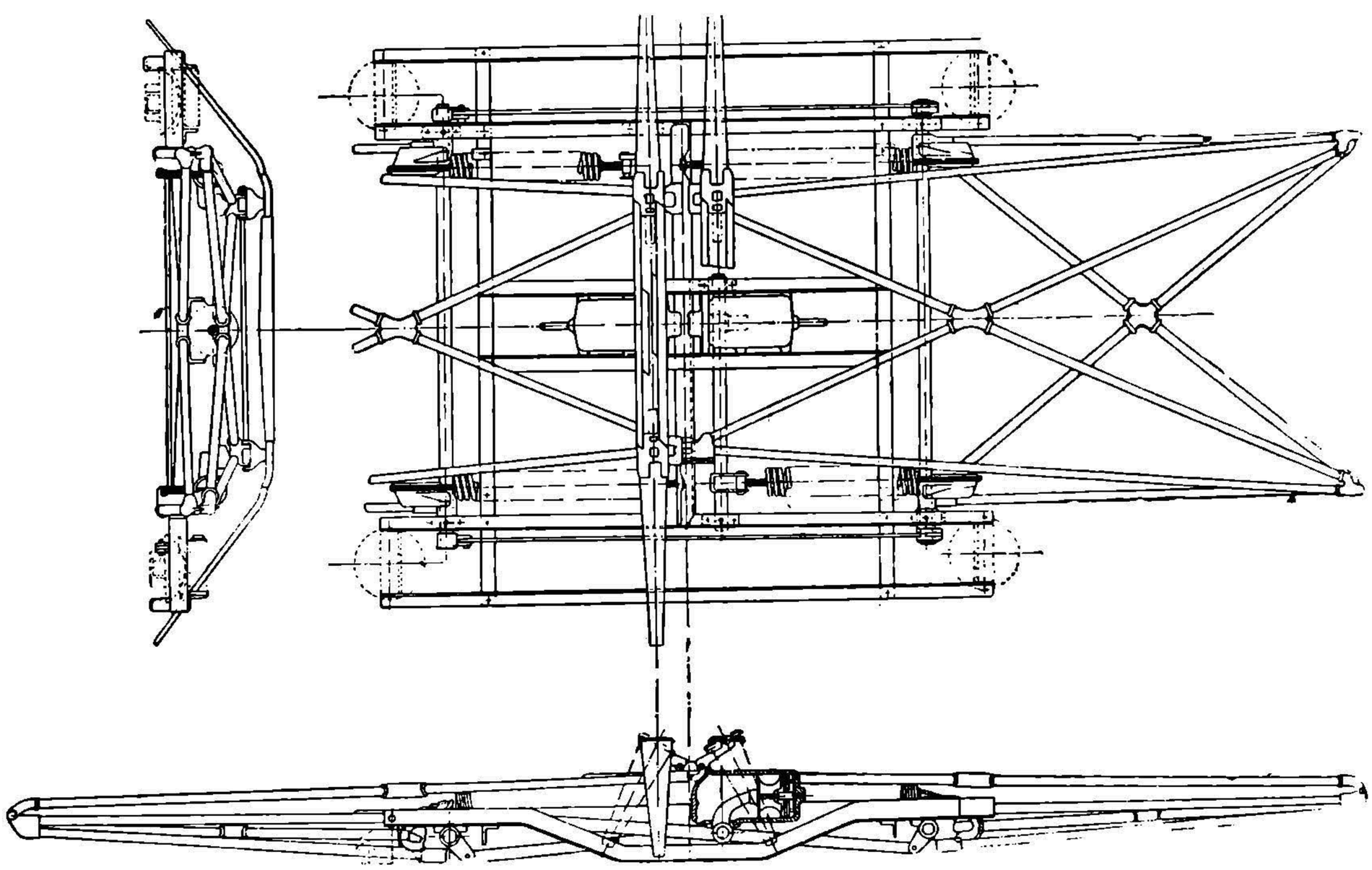


Рис. 615. Американский пантограф на 3000 V.

При движении дужка принимает наклонное направление. Обладая малой инерцией и эластичными пружинами, контактная дужка хорошо вписывается в провод и дает относительно небольшой износ трущихся частей. Применяется эта система, главным образом, в Европе, преимущественно на однофазных железных дорогах, где ток, потребляемый электровозами, благодаря высокому напряжению в контактном про-

НТБ УГУНТ (ДІІТ)

воде, сравнительно невелик. При больших токах пантограф с дужкой считается нерациональным. Здесь более надежную работу дает американский пантограф, обеспечивающий широкий и плотный контакт. Недостатком последнего является, однако, большая его инерция, из-за которой он недостаточно свободно и эластично вписывается в изгибы провода. Второй тип благодаря легкой и эластичной дужке дает вписывание более совершенное. На рис. 615 приведен тип американского пантографа, а на рис. 616 — тип европейского с дужкой.

Наиболее ответственной частью пантографа является механизм, производящий его подъем, прижатие к проводу и опускание. В наиболее простых типах пантографов подъем и прижатие дуги к проводу производятся с помощью спиральных

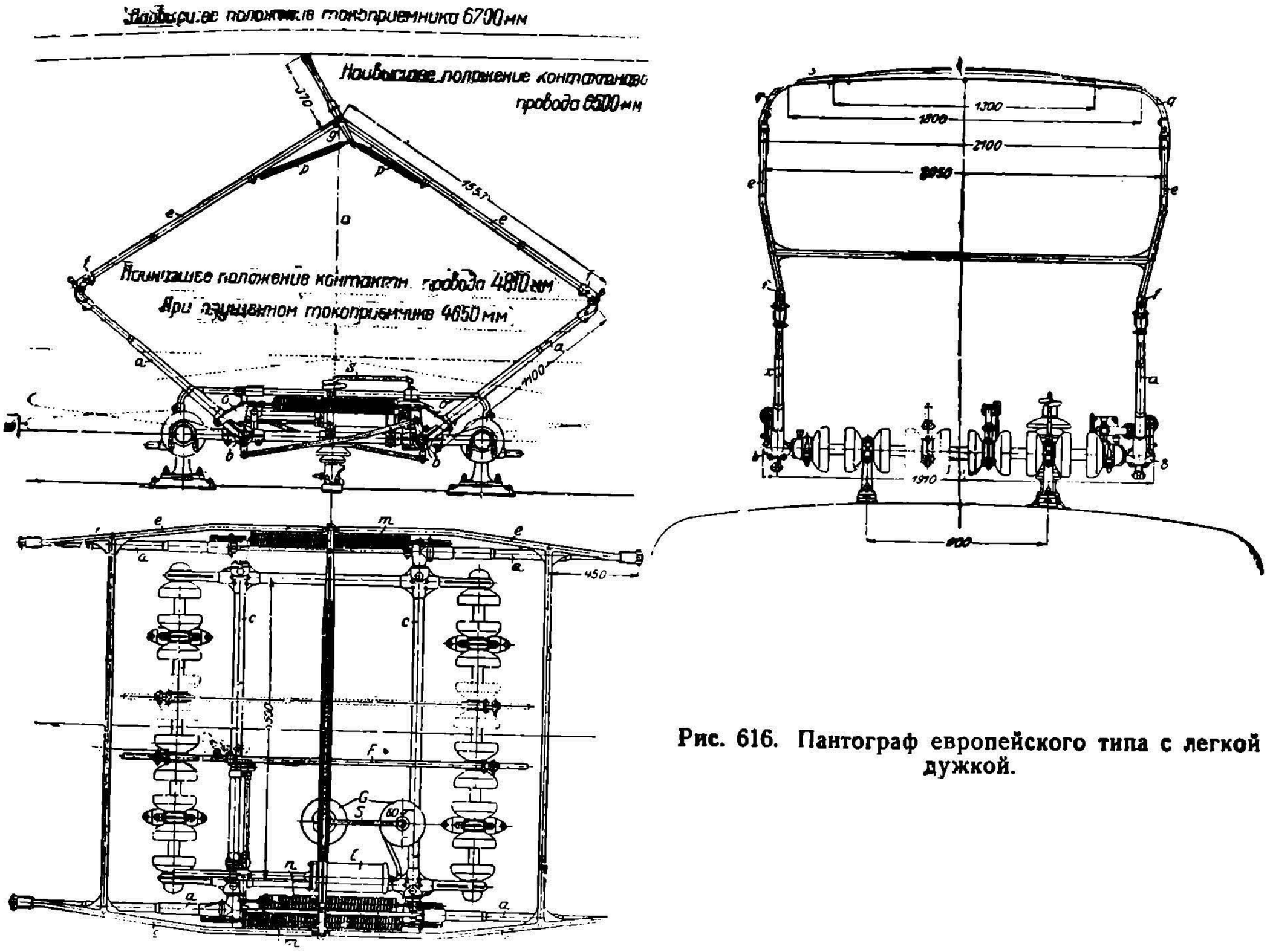


Рис. 616. Пантограф европейского типа с легкой дужкой.

пружин. Опускаться токоприемник может или с помощью руки через веревку, или с помощью привода от цилиндра с сжатым воздухом. Применение веревки можно допускать при напряжении не выше 750—1 000 V. Недостаток таких пантографов — в возможности сильных ударов по проводу при подъеме, так как никакого демпфера здесь не имеется. Кроме того, при пневматическом управлении воздушный цилиндр для опускания получается громоздким, так как сжатому воздуху приходится преодолевать тяжение всех пружин. Для поддержания токоприемника в нижнем положении при пневматическом механизме опускания применяется защелкивающаяся собачка, которая также управляется сжатым воздухом, по большей части от специального цилиндра.

Другой метод управления пантографами основывается на применении сжатого воздуха для подъема и для нажатия дуги на провод. Опускание же в этом случае производится пружинами. Сжатому воздуху приходится при подъеме преодолевать вес токоприемника, трение в его механизме, силу инерции подъема и напряжение пружин для опускания. Поэтому пневматическая часть токоприемника получается достаточно громоздкой. Для облегчения ее применяется в большинстве случаев

НТБ УИИНТ (ДИИТ)

частичная компенсация особыми добавочными пружинами тех усилий, которые приходится производить сжатому воздуху. Очень часто сжатый воздух является только промежуточным агентом, вызывающим действие той или другой пружины.

Примером подобного устройства может служить схема пантографа ВВС (рис. 617). В ней имеется воздушный цилиндр *A*, пружина опускания *F*, компенсационная пружина *z*. Рама пантографа имеет две оси поворота *w*. Кроме того, имеется вспомогательная ось вращения рычажной системы *a*. Конец рычага *b* оканчивается ползуном, скользящим в щели *s*. В нижнем положении токоприемника ползун упирается в стенку щели и фиксируется в этом состоянии натяжением пружины *F*. Подъем пантографа начинается с подачи воздуха в цилиндр *A*. Это вызывает перемещение рычага *t* и щели *s* влево. Рычаг *b*, ползун которого освобождается от фиксирующего действия щели, получает возможность двигаться. Пантограф начинает подниматься под действием пружины *z*. Задача сжатого воздуха здесь заключается в том, чтобы растянуть пружину *F* и тем самым дать возможность пружине *z* поднять и прижать токоприемник к проводу.

При подъеме и опускании данный токоприемник обладает нужным демпфирующим эффектом. При поднятии действие пружины *z* смягчается пружиной *F*, не позволяющей через щель *s* ползуну *b* сделать резкое движение. При опускании резкое действие пружины *F* смягчается за счет демпфирующего действия выходящего воздуха цилиндра *A*. Кроме того, в данном пантографе есть специальный дроссельный вентиль для недопущения чрезмерно большого количества воздуха в цилиндр *A* при поднятии, а также устроена регулировка выходящего воздуха, связанная со степенью опускания рамы. Производится она рычагом, связанным с рамой токоприемника и в большей или меньшей степени открывающим выходной вентиль.

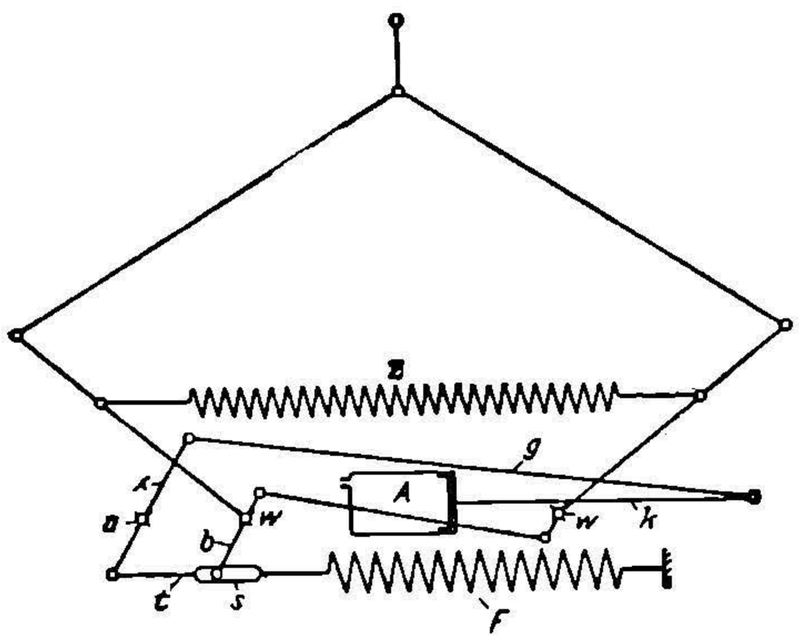


Рис. 617. Схема передачи усилий в токоприемнике системы ВВС.

Рамы пантографов выполняются из стальных труб. Для лучшей проводимости все места шарниров перекрываются соединительными кабелями. При напряжении порядка 1 000 V основание токоприемников можно монтировать просто на деревянных брусьях. При напряжении выше этой нормы ставятся фарфоровые изоляторы. При напряжениях выше 6 500—16 000 V рекомендуется применять двойную изоляцию. Давление на провод в американских типах колеблется от 6 до 12 kg. В европейских типах при однофазном токе давление дужки берется чаще всего около 3,5 kg.

При трехфазной тяге устройство токоприемников значительно осложняется. Приходится иметь на токоприемнике два изолированных друг от друга контактных звена. Примером может служить токоприемник итальянских железных дорог, приведенный на рис. 618.

В настоящее время наиболее часто применяются дуги из алюминия. Дуга делается с желобом, в который помещается смазочный материал (жировая смазка с графитом). Алюминий, применяемый для дуг, имеет примесь меди от 2 до 6%, причем верхний предел считается наиболее целесообразным. Наблюдение над работой токособирания показало, что при отсутствии искрообразования и дугообразования алюминиевые дуги работают весьма удовлетворительно, причем обнаружена безусловная польза смазки контактного провода жирами с графитом или даже чистым графитом, примерно, через каждые три месяца.

Установлено, что главная причина износа провода и контактной дуги вызывается дугообразованием. Помимо сгорания и распыления материала, вольтовы дуги вызывают поверхностное затвердение материала как провода, так, главным образом, и дуги. Поверхностное затвердение материала объясняется образованием особой шлакообразной коры, причем материал внутри может даже отличаться от нее по своей структуре. В результате поверхность контактной дуги резко затвердевает, а контактный провод приобретает различную твердость по длине, вследствие чего получаются волнообразный износ провода и усиленный износ контактной дуги.

Главная причина износа контактной дуги и провода заключаются в образовании вольтовых дуг, и, очевидно, необходимо стремиться к устранению обстоятельств,

БГУИНТ (ДІІТ)

вызывающих эти дуги. В этом отношении полезно итти даже на увеличение силы нажатия токоприемника на провод. От этого нажатия нужно ждать меньшего увеличения износа, чем от более интенсивного дугообразования при меньшем нажатии. Заграничная трамвайная практика показывает, что при давлении дуги в 3,5 kg срок ее службы соответствует всего лишь пробегу 45 000 km, тогда как при 6—7 kg этот пробег доходит до 100 000 km.

Кроме алюминиевых контактных дуг, в настоящее время начинают получать иногда применение угольные дуги. Произведенные с ними опыты дали чрезвычайно благоприятные результаты. Основное преимущество их в том, что они дают мягкий контакт, смазывая провод и в то же время полируя его. Образования вольтовых дуг при угольных контактных дугах имеют меньшее значение. Волнообразного

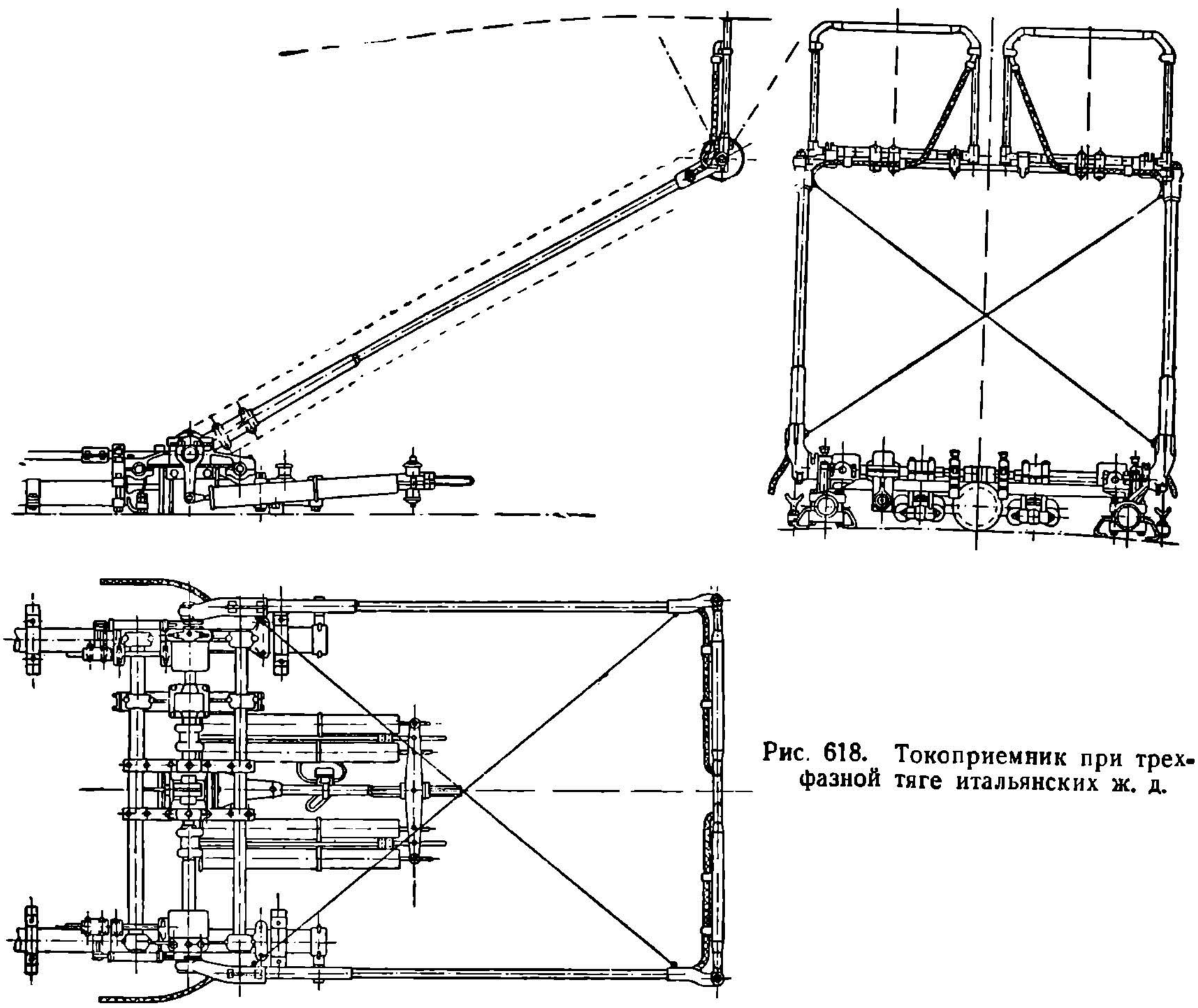


Рис. 618. Токоприемник при трехфазной тяге итальянских ж. д.

износа контактного провода почти совершенно не получается, так как твердость угля практически не меняется от действия вольтовых дуг. Давление токоприемника при угольных дугах можно доводить до 6—7 kg. Сорт угля, судя по произведенным до настоящего времени опытам, лучше всего брать твердо-крупнозернистый, из отдельных сегментов, плотно прижатых друг к другу. По германским опытам срок службы угольных дуг получается в 7—10 раз больше алюминиевых. Но только при этом ни в коем случае не следует допускать одновременной работы на линии поездов с алюминиевыми и угольными дугами. Опыт показывает, что при проводе, получившем износ, уголь срабатывается очень быстро. По этой же причине вводить угольные дуги рационально только при новом неизношенном проводе. Недостатком угольных дуг следует считать хрупкость угля и поэтому возможность частой их поломки.

Для пантографов по большей части дуги делают из более прочного материала, главным образом из хорошей гальванизированной стали. Очень часто на лыжу накладывают медные продольные полосы, что увеличивает срок ее службы.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Следует отметить попытку некоторых дорог применять, вместо скользящей дуги, катящиеся валики, представляющие собой трубки, которые надеты на оси, крепящиеся к раме пантографа. При такой конструкции получается, как и при ролике, трение качения. Особо благоприятных результатов такие токоприемники не дали, и потому они не получили дальнейшего распространения.

7. Оценка различных систем контактных подвесок.

Вопрос о том, где должна проходить грань между областями применения простых и цепных подвесок, решить вполне определенно не представляется возможным. В этом отношении очень показателен пример железных дорог трехфазного тока. На этих дорогах ввиду сложности воздушной контактной сети обычно не применяют цепных подвесок и работают на простых. При этом работа подвески оказывается вполне удовлетворительной, хотя скорость движения на этих дорогах доходит до 90 km/h, и мощные электровозы потребляют из контактной сети токи большой величины. Однако несмотря на эти примеры, предпочтительно при скоростях движения свыше 50 km/h все-таки прибегать к цепным подвескам. В отношении выбора системы цепной подвески на основании всего изложенного следует сделать следующие заключения.

Жесткие системы цепных подвесок неприемлемы, так как при них быстро изнашивается провод и токоприемник. Подвески эластичные, простые и с автоматическим натяжением, более или менее равноценны, и как одна, так и другая имеют своих сторонников и противников. С теоретической точки зрения наиболее совершенной является система с автоматическими натяжными приспособлениями, так как в этом случае при нормальных условиях работы нет таких больших, температурой обусловленных, колебаний в провесе провода и его напряжениях, как в системах без автоматизации. Но вместе с тем автоматизированные системы при гололеде и сильном ветре могут давать большие колебания в стрелах провеса. Для ограничения таких колебаний приходится ставить вышеупомянутые ограничители перемещения грузов. Кроме этого, как показывает опыт, на железных дорогах, имеющих много кривых, особенно кривых малого радиуса, автоматические подвески работают часто недостаточно удовлетворительно. Происходит заедание проводов, и очень часто груз почти никакой роли не играет. В этом отношении интересны результаты опытов Южных французских железных дорог, на которых было испробовано 9 различных систем подвесок, после чего окончательный выбор пал на подвески Вестингауза без автоматических натяжных приспособлений.

Полезно отметить, что при кривых малого радиуса натяжение и ослабление провода происходят отчасти благодаря гибкости столбов, которые до известной степени выполняют роль натяжных автоматических приспособлений, а поэтому надобность в этих последних меньше на кривых, чем на прямолинейных путях. Системы подвесок с автоматическим натяжением нашли применение, главным образом, в странах центральной Европы, тяготеющих к немецкой электротехнической промышленности. В Германии, Швеции и в Австрии эти подвески пользуются большой популярностью. В СССР они также являются основным типом.

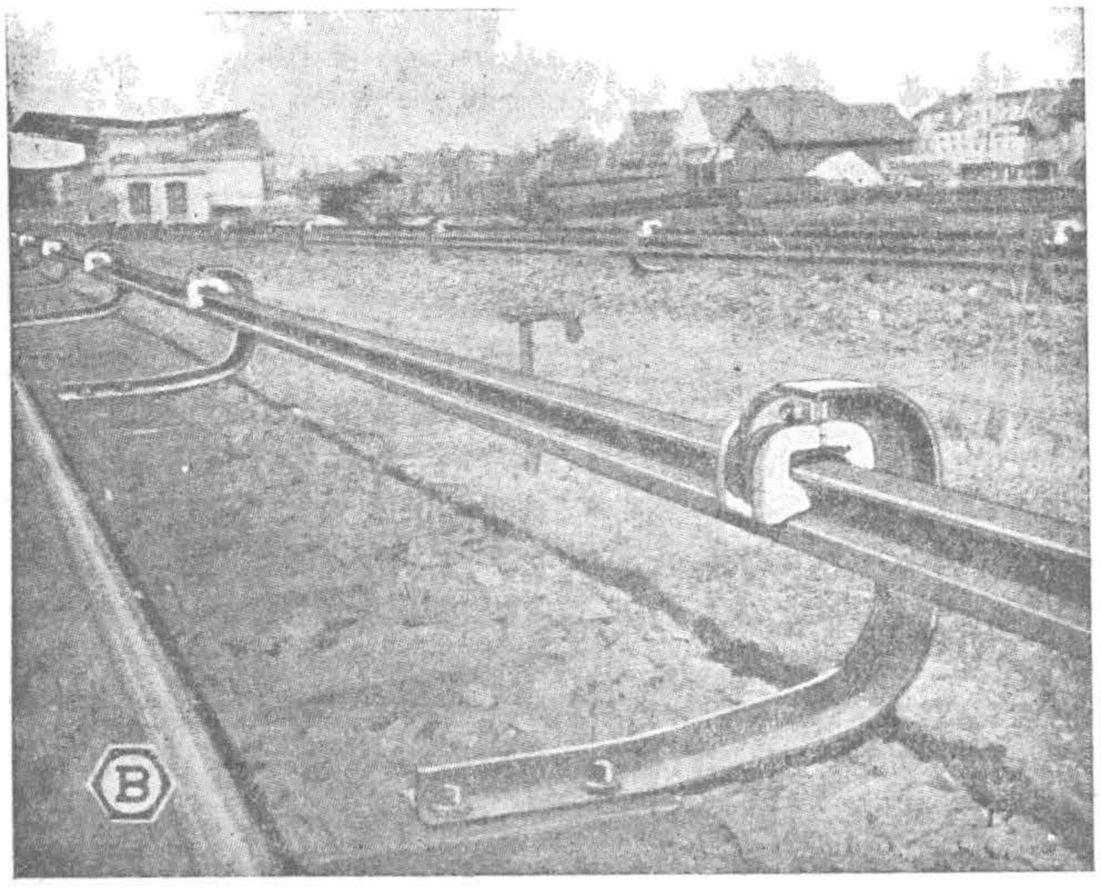


Рис. 619. Общий вид устройства третьего контактного рельса.

В американской практике автоматическими приспособлениями для натяжения не пользуются, и больше всего там распространена простая эластичная система цепной подвески. В целях борьбы с провесами американцы дают проводам более значительные тяжения, чем в европейской практике.

8. Третий контактный рельс.

Кроме контактного провода, большим распространением на железных дорогах с собственным полотном пользуется система третьего рельса. Сущность этой системы, как уже

НБ УНУНТ (ДІТ)

было указано выше, заключается в том, что вдоль пути, кроме ходовых рельсов, укладывается третий рельс, изолированный от земли (рис. 619). Ток от третьего рельса к подвижному составу проходит через особый башмачный токособиратель. Третий рельс можно проложить, очевидно, только на таких линиях, где можно или совсем прекратить движение через железнодорожные пути, как, например, на метрополитенах, или допускать переезд только в определенных местах. Такими путями являются нормальные железные дороги с собственным полотном. В случае применения на них третьего рельса переезды так конструируются, чтобы третий рельс не препятствовал движению.

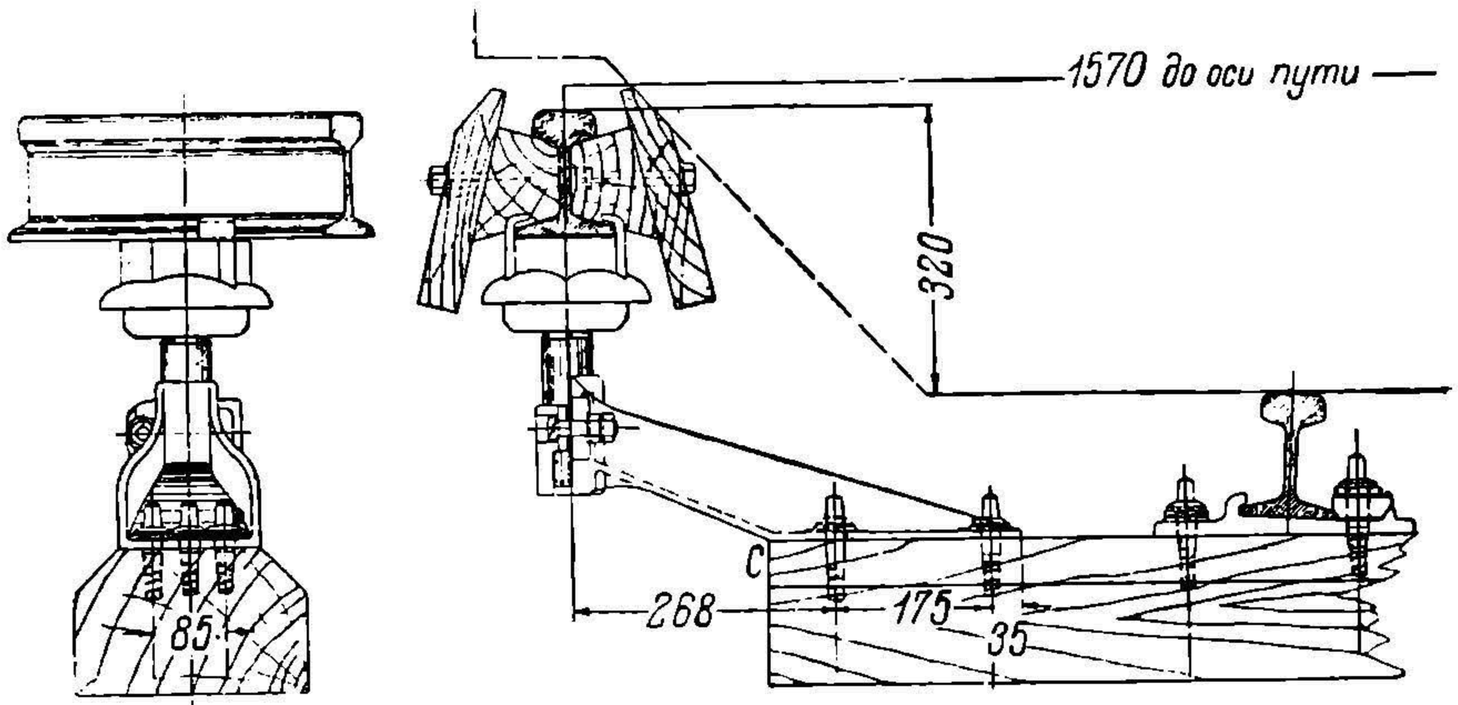


Рис. 620. Третий контактный рельс с верхним токособиранием.

Конструктивных выполнений третьего рельса имеется много. Но все конструкции могут быть разбиты на два основных типа. К первому относятся системы с верхним контактом. В них токоприемник скользит по верхней поверхности рельса. Ко второй относятся рельсы с нижним контактом, при котором собирательный башмак скользит по нижней поверхности рельса. На рис. 620 дана конструкция третьего рельса с верхним токособиранием, а на рис. 621—с нижним.

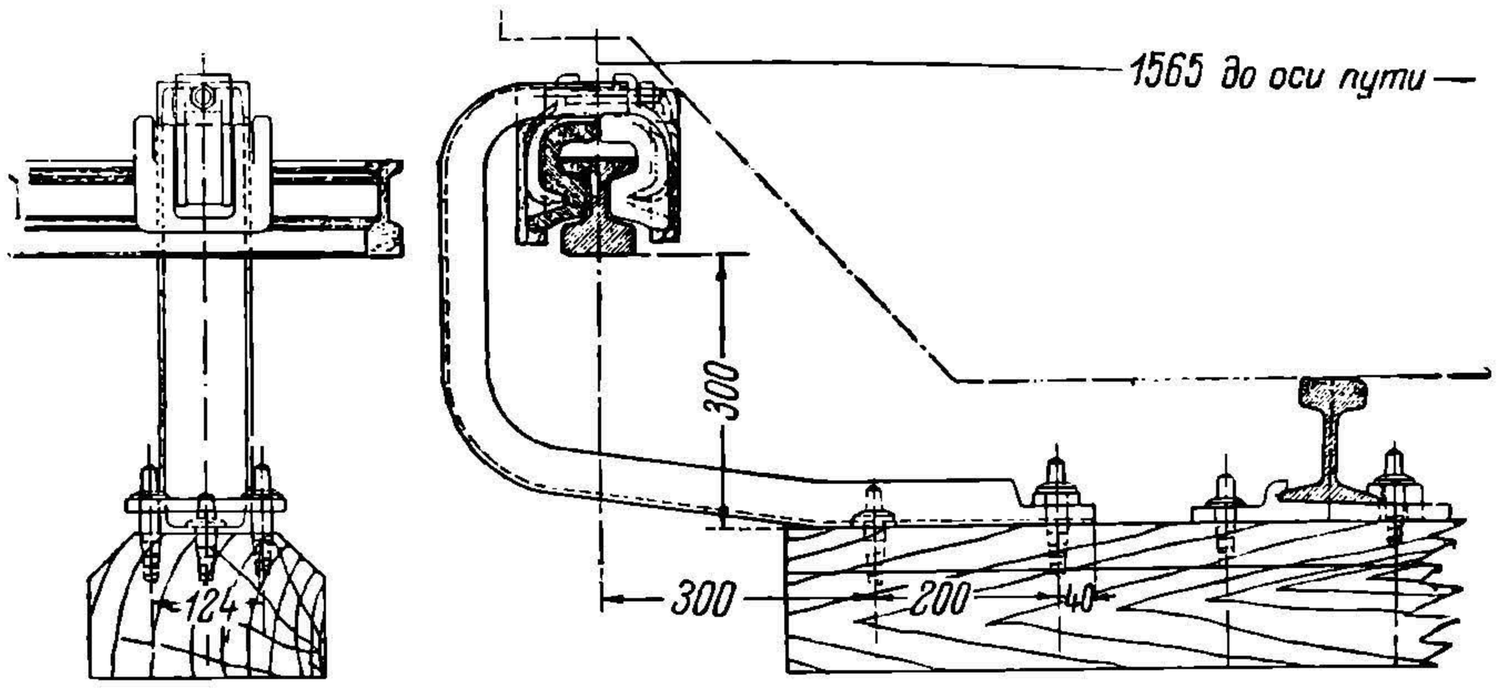


Рис. 621. Третий контактный рельс с нижним токособиранием.

Профили третьего рельса очень разнообразны—от профилей обыкновенных железнодорожных рельсов до самых сложных фигурных. Каждый конструктор стремится выбрать такой профиль, который ему кажется наиболее выгодным в отношении получения лучшего контакта, а также с точки зрения его изолирования.

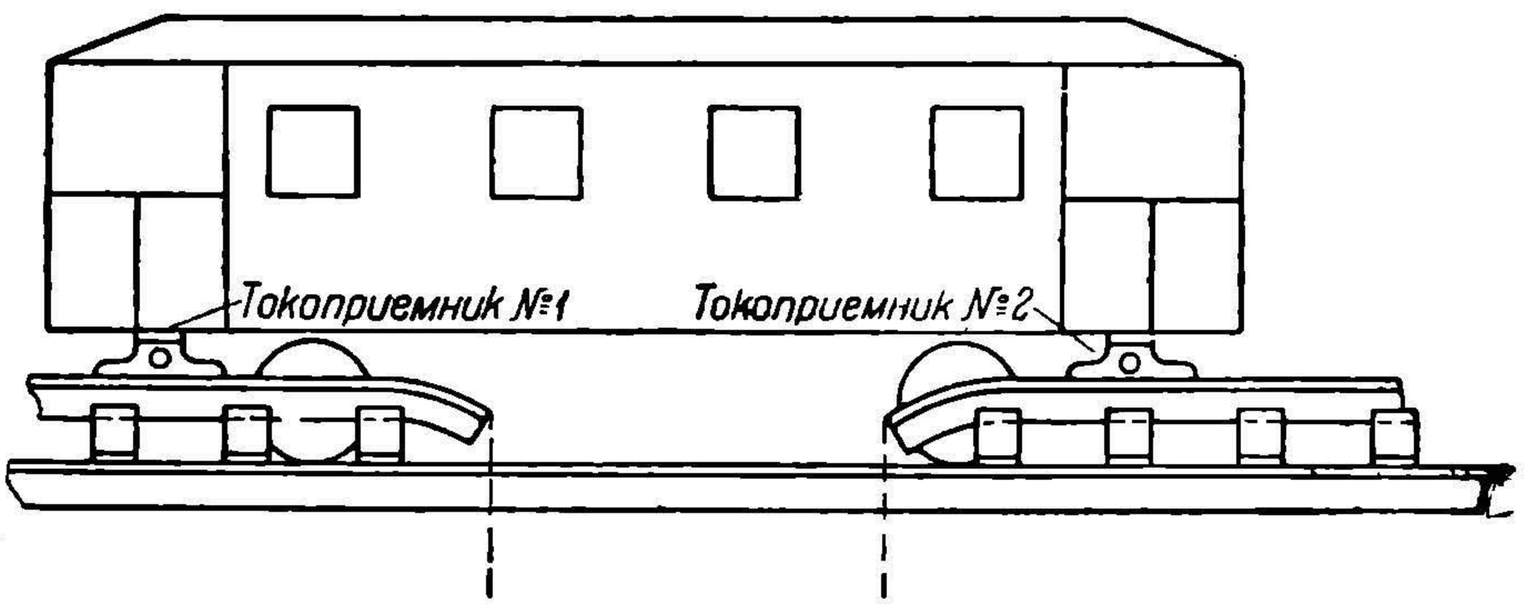


Рис. 622. Схема переездов через рельсовый путь при третьем рельсе.

На переездах система третьего рельса имеет конструкцию, сущность которой ясна из схематического рис. 622. Непрерывная подача тока к поезду обеспечивается несколькими токоприемниками.

В большинстве случаев, несмотря на то, что третий рельс укладывается на линиях с собственным полотном, приходится все-таки принимать особые предохранительные меры для случайно попавших на линию людей и животных. В редких случаях путь

НБ УИИНТ (ДІІТ)

обносится особой оградой. В большинстве же случаев третий рельс защищают особым покрытием, состоящим из сухого выдержанного дерева, иногда парафинированного. Конечно, такие покрытия полной безопасности не дают, но все-таки, особенно в отношении животных, они могут принести существенную пользу. Примерная конструкция покрытия дана на рис. 620.

Для устранения вредных последствий температурных изменений третий рельс конструируется таким образом, чтобы он мог свободно перемещаться вдоль пути. С этой целью рельс не скрепляется с изоляторами, а только на них опирается. Для свободы перемещения третий рельс имеет через определенные промежутки свободные стыки, обеспечивающие возможность взаимного перемещения сходящихся концов (рис. 623). Для увеличения проводимости таких мест стыков применяются эластичные электрические соединения в виде тросов, общая площадь поперечного сечения которых берется порядка 700—800 mm². Расстояние между отдельными стыками выбирают в пределах от 40 до 90 m, образуя самостоятельные секции. В каждую такую секцию попадает от 4 до 6 звеньев рельсов, соединяемых жесткими стыковыми накладками или путем сварки. Каждая отдельная секция закрепляется по середине, чем достигается устойчивость всей системы.

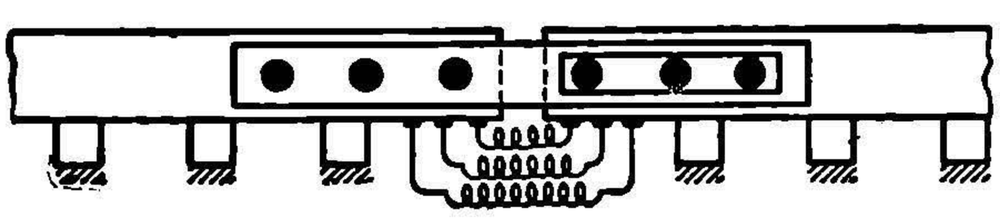


Рис. 623. Схема свободного стыка при третьем контактном рельсе.

Концы и начала третьего рельса имеют особые наклонные придатки, которые делаются с целью по возможности сглаживать удары и толчки в те моменты, когда токоприемник сходит с поверхности или находит на поверхность третьего рельса. Длина таких придатков l и степень их наклона h зависят от скоростей. Для малых — часто берут $l = 2{,}5$ m и $h = 1/25$ и соответственно для больших l до 4 m и $h = 1/50$. На переездах достаточно взять $l = 1\frac{1}{2}$—2 m и $h = 1/8$. Концевые наклоны рельс делаются или деревянными, или специально металлическими, или же из того же самого рельса, соответственно выгнутого.

В качестве материала для третьего рельса берется в большинстве случаев марганцевая сталь. Удельное сопротивление рельса очень сильно колеблется в зависимости от его химического состава. Как общее правило, в состав стали для третьего рельса входят углерод, марганец, фосфор и сера, причем особенно сильно увеличивают сопротивление рельса углерод и марганец. Проводимость материала третьего рельса меньше проводимости меди в зависимости от состава в 6—13 раз. Вес погонного метра третьего рельса колеблется от 35 до 65 kg, длина отдельных звеньев — от 9 до 18 m.

Расстояние между опорными изоляторами берется от 2 до 7 m. Они изготовляются преимущественно из фарфора, хотя применяют также некоторые композиции каучука, а также иногда стекло. В последнее время начинает входить в практику базальт, обладающий большою прочностью и стойкостью в работе. Опорные изоляторы третьего рельса устанавливаются или на тех же шпалах, на которых крепятся ходовые рельсы, но только соответственно удлиненных, или же на специальных поперечинах. Иногда третий рельс помещают на продольных брусьях или крепят к особым металлическим кронштейнам.

Основной недостаток третьего рельса с нижним контактом заключается в необходимости крепить этот рельс в подвешенном состоянии помощью особых фигурных изоляторов. При этом изоляторы работают в более тяжелых условиях, чем изоляторы при верхнем контакте, так как принимают непосредственно на себя все воздействия от перемещений и колебаний рельса и поэтому быстрее разрушаются.

Наряду с недостатками третий рельс с нижним контактом имеет то преимущество, что при нем легче построить защитные приспособления от возможного прикосновения к рельсу, находящемуся под напряжением. Токособирание здесь идет снизу и, следовательно, всю верхнюю часть рельсов можно легко покрыть деревянной защитной обшивкой.

Третий контактный рельс применяется исключительно при постоянном токе. Предельным для третьего рельса, при современных типах изоляции, пока считают напряжение порядка 1500 V. Опыты Мичиганской железной дороги, которая была принуждена понизить напряжение в третьем рельсе с 2400 V до 1200 V, в этом отношении очень характерны. При переменном токе третий рельс обычно

НВ УИУНТ (ДІТ)

не применяется. Объясняется это сильным увеличением сопротивления рельсового пути от действия самоиндукции и скинэффекта, а также и высокими напряжениями, обычными для переменного тока, такими напряжениями, для которых третий рельс является непригодным.

Недостаток третьего рельса в том, что он загромождает путь и представляет опасность для живых существ, оказавшихся на линии. Кроме того, он представляет большие неудобства в случае снегопада, так как очистка пути от снега при нем очень сильно затрудняется. Преимущества третьего рельса — более солидная конструкция, более устойчивое, практически безъискровое токособирание и отсутствие отскакивающего токоприемника. При больших рабочих токах и первоначальная стоимость его ниже, чем верхнего контактного провода. Особенно выгодно бывает применение третьего рельса при мощных поездах, когда приходится иметь большие сечения кон-

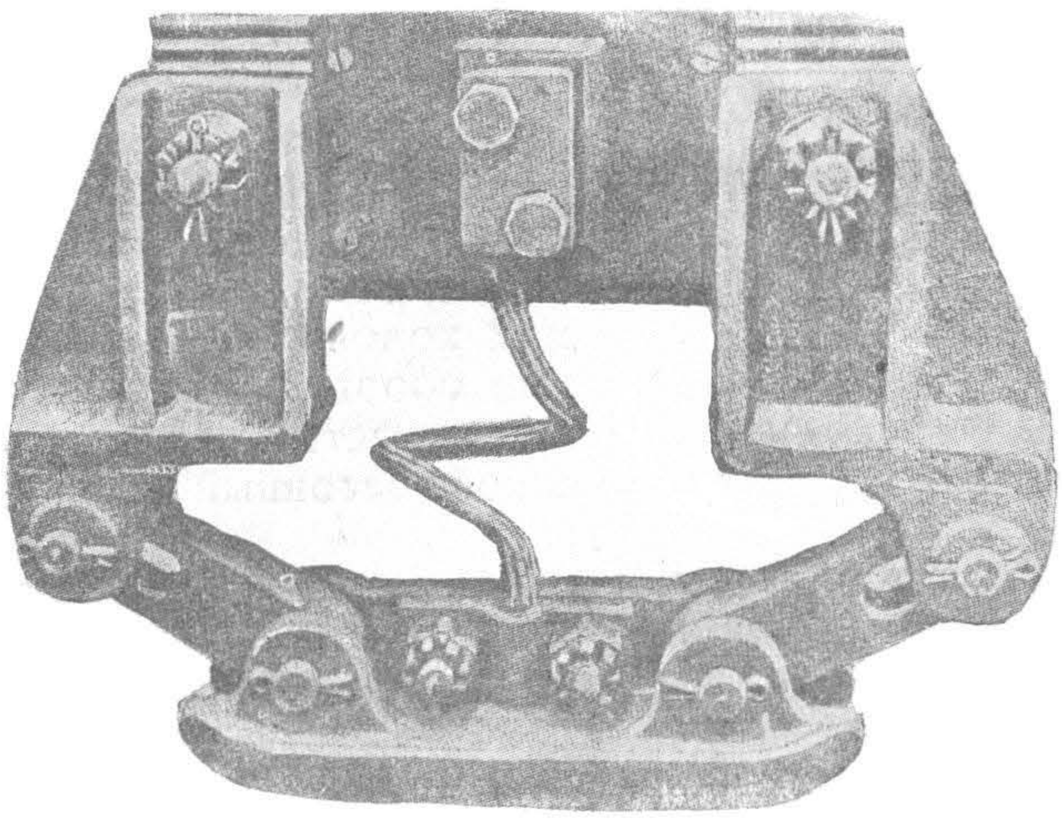


Рис. 624. Токоприемник при третьем контактном рельсе с верхним токособиранием.

тактных систем для предотвращения недопустимых падений напряжений.

В качестве токособирателя при системе третьего рельса обыкновенно служит специальный башмачный токоприемник. К третьему рельсу с верхним контактом башмачный токоприемник в большинстве случаев прижимается собственным весом. На рис. 624 дана подобная конструкция. Давление таких токоприемников на рельс колеблется от 7 до 12 kg, но иногда это давление доводится до 50—70 kg.

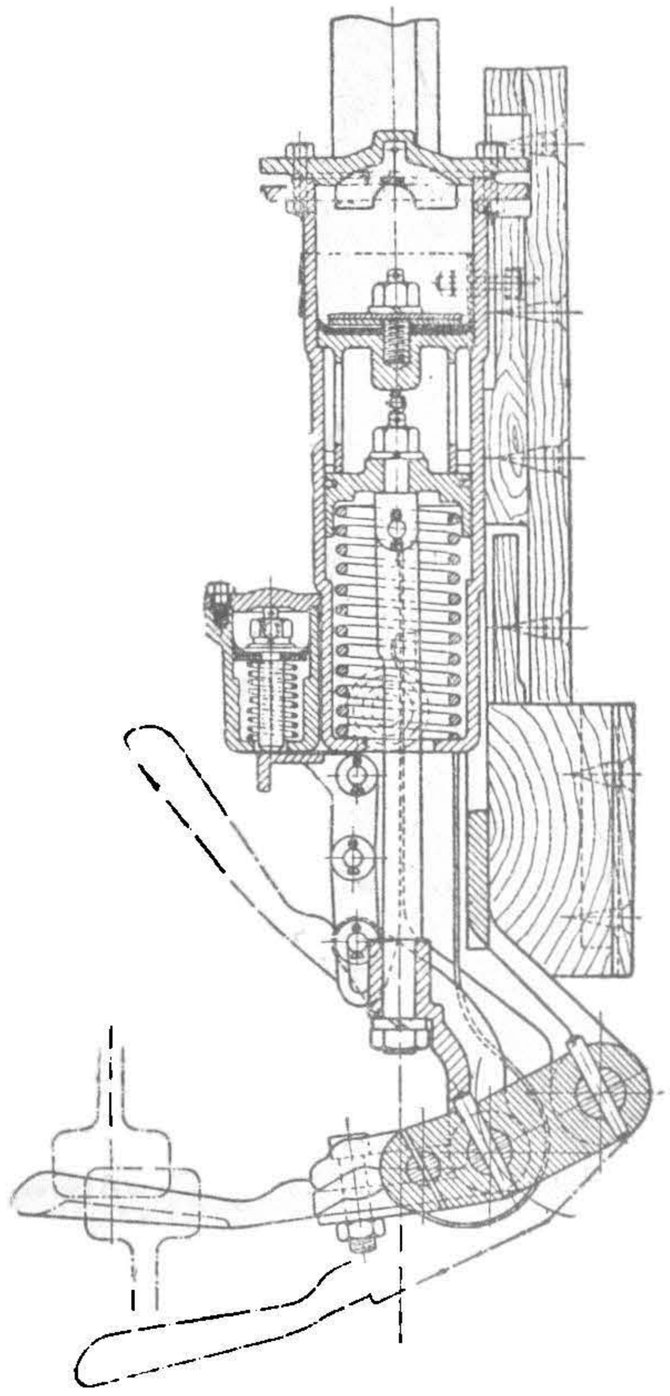


Рис. 625. Токоприемник при третьем контактном рельсе с нижним токособиранием.

Токоприемники для третьего рельса с нижним контактом конструируются с пружинным устройством (рис. 625). Башмак такого токособирателя прижимается к рельсу с помощью сильных пружин. В тяжелых условиях работы, особенно в случае возможного образования на третьем рельсе гололеда, прибегают и при верхнем контакте к пружинным устройствам. Иногда пружинное устройство заменяют системой рычагов и цилиндра, действующей сжатым воздухом.

Нужно обратить внимание, что в некоторых случаях приходится работать при двух различных контактных системах. На дорогах с третьим рельсом в том случае, если подвижной состав проходит по городу или вообще в черте города, приходится применять в городе верхний контактный провод, а за городом третий рельс. И в том, и в другом случае неизбежно иметь двойной комплект токоприемников. При этом по большей части переход с одной системы к другой происходит автоматически. Один токоприемник отводится, а другой приводится в соприкосновение.

9. Щелевые контактные системы.

В некоторых городах Европы и Америки из-за эстетических побуждений воспрещалось портить вид лучших улиц города верхним проводом. В случае таких требований вопрос обычно решался применением щелевых контактных систем.

НВ УМУНТ (ДІІТ)

Систем таких имеется большое количество. Сущность их устройства сводится к прокладке подземного канала, идущего или посредине междупутья, или около одного из рельсов. В канале этом прокладываются две изолированные контактные шины, с которыми соприкасается двухсторонний пружинный токоприемник, проходящий в канал через щель. Токоприемник имеет два изолированных контакта, по одному ток подводится к вагону, по другому отводится. Вводится токоприемник в канал через особые люки, расположенные через определенные расстояния вдоль пути. Схема такой контактной системы приведена на рис. 626.

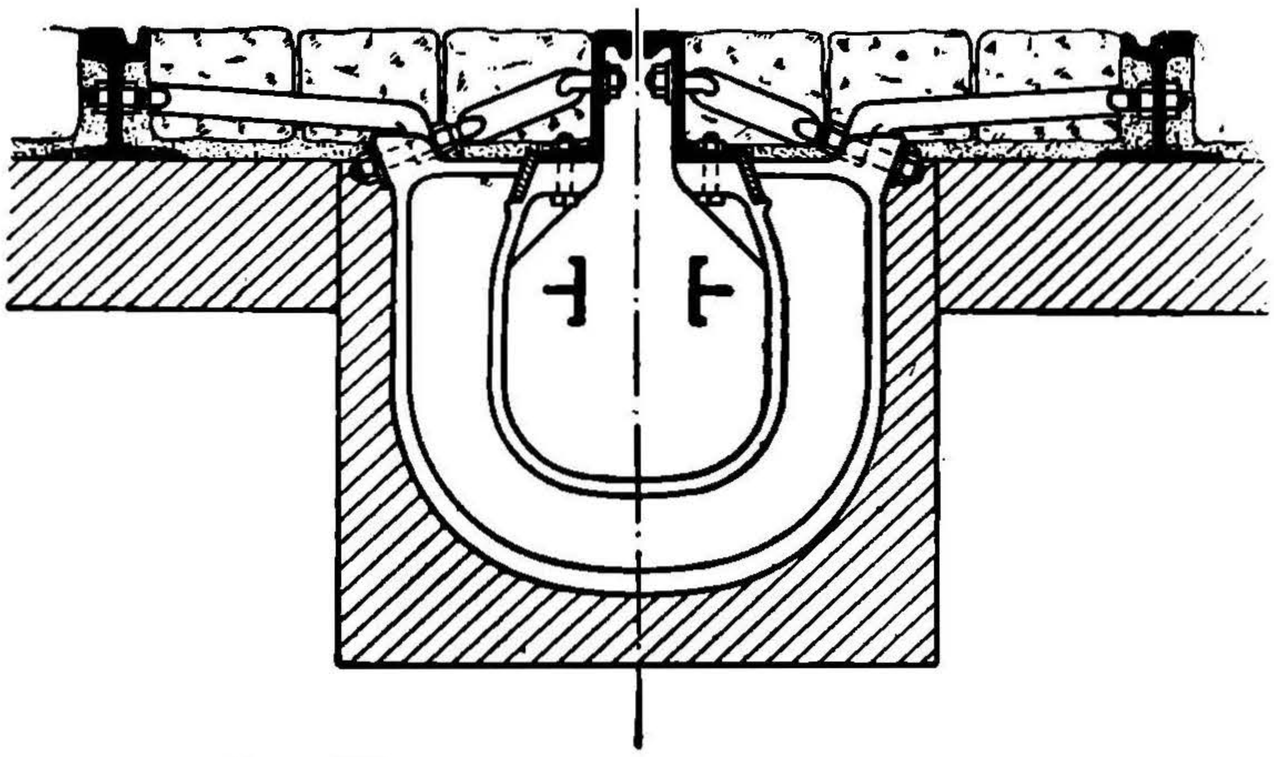


Рис. 626. Система щелевой подводки тока.

Основой для канала служат литые чугунные коробки, на которые опираются щелевые швеллера. В некоторых случаях опорные отливки уширяются и служат не только для опоры щелевым швеллерам, но и также и для самих ходовых рельсов. Чугунные опоры располагаются на расстоянии друг от друга в 1 200 — 1 300 mm. Все пространство между опорами заполняется бетоном, так что получается один сплошной бетонный канал, идущий вдоль всего пути.

Основным недостатком щелевых систем является их колоссальная первоначальная стоимость. Стоимость на 1 km пути всей дороги при щелевых системах почти в два раза больше, чем при верхнем контактном проводе. Стоимость же самих щелевых систем в 5 — 8 раз больше стоимости верхнего контактного провода. Конечно, при таких условиях щелевые системы привиться не могут, тем более, что в холодном климате, в связи со снежными заносами, они очень неисправны в работе. Очищать каналы очень трудно. Работать такие системы могут только при идеально чистых мостовых.

10. Контакторные системы.

Одно время для подводки тока к подвижному составу предлагалось применять контакторные системы. В основе своей эти системы состоят в следующем. Вдоль всего пути прокладывается питательный кабель, от которого ток подводится к отдельным контакторам, располагаемым вдоль пути по средине междупутья. Каждый из таких контакторов имеет головку, несколько выступающую над поверхностью мостовой. В обычном своем положении, когда токособиратель над контактором не находится, головка его, выступающая над поверхностью мостовой, не имеет напряжения. Примером контакторной системы может служить приведенная на рис. 627. Токоприемником здесь служит стальной башмак, скользящий по поверхности головок контакторов. В представленном на рисунке положении в соприкосновении с токоприемником находится третий контактор. Контактор *4* подготовлен к действию, и якорь его частично приподнят. Настоящий контакт он дает, когда башмак коснется головки и усилит своим соприкосновением магнитную проводимость цепи контактора. Тогда якорь контактора плотно прижмется к головке

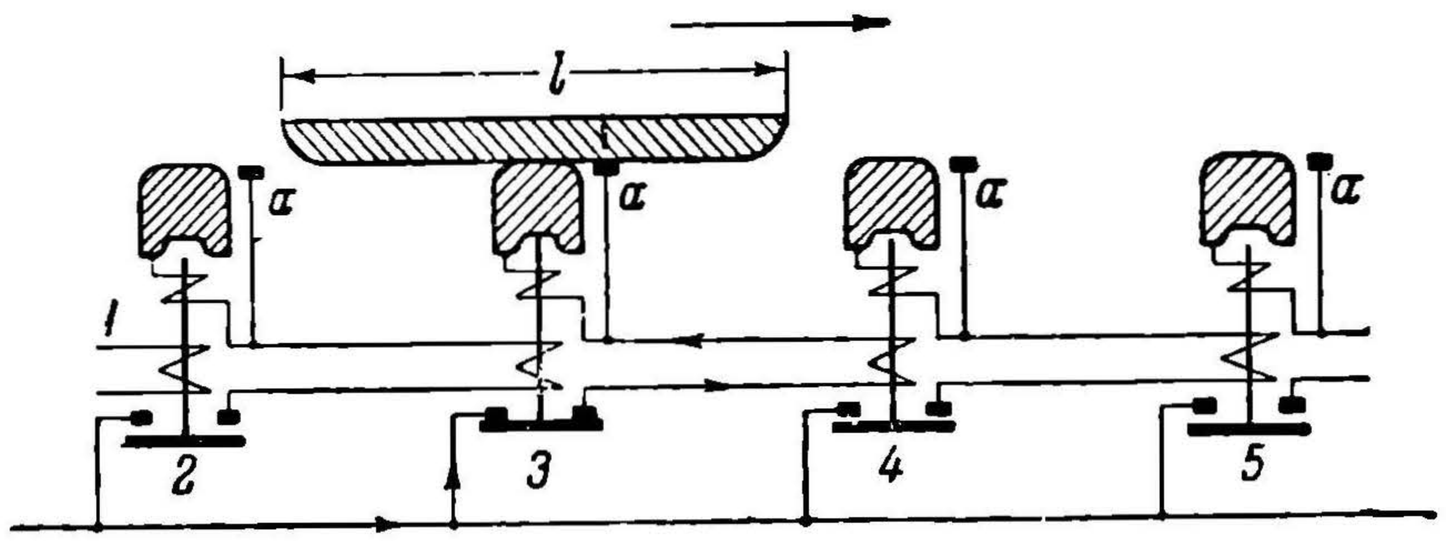


Рис. 627. Схема контакторной системы подводки тока.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

и начнет передавать ток башмаку. Как только башмак сойдет с контактора *3*, цепь его разомкнется, и головка лишится напряжения. При разомкнутой цепи вагона контактор опускается. При трогании вагона с места после остановки необходимо поднять предварительно якорь контактора. Для этой цели параллельно главным контакторам на некотором от них расстоянии прокладывается ряд вспомогательных контактов $a-a$, которые главным башмаком не перекрываются, а могут перекрываться вспомогательным башмаком. Между вспомогательным и основным башмаками включается небольшая батарея. При трогании вагона с места вспомогательный башмак опускается на контакты $a-a$, и ток батареи, проходя по обмотке контактора, поднимает его якорь. После этого вспомогательный башмак снова поднимается.

Контакторные системы теперь не имеют применения, хотя в отношении первоначальной своей стоимости они почти аналогичны верхнему контактному проводу. Главный их недостаток в большом количестве отдельных контакторов (300 штук на 1 km); достаточно порчи одного из них, чтобы нарушилась правильность всего движения.

II. ОСНОВЫ МЕХАНИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ.

1. Общая постановка вопроса о механическом расчете.

Задача механического расчета контактной системы заключается в определении всех основных строительных параметров подвески и установлении прочности ее элементов. При механическом расчете главным расчетным фактором является стрела провеса провода, оказывающая, как было указано выше, исключительно важное влияние на токособирание. При расчете необходимо выявить величины стрел провеса при различных температурах и при различных нагрузках на провод. Вопрос о стрелах провеса упирается вплотную в допустимые напряжения. Анализ прочности проводов, арматуры подвесок и опор является второй основной задачей механического расчета. Большое значение при современных подвесках, конструируемых с большими пролетами между опорами, приходится придавать боковым ветровым отклонениям контактного провода. Определение последних должно также входить в механический расчет.

При определении работы контактных систем в первую очередь необходимо считаться с нагрузками, приходящимися на провода. В общем случае эта нагрузка складывается из весовой нагрузки самого провода, из нагрузки от гололеда и от ветра. В дальнейшем при расчетах предположено исходить из удельных нагрузок, рассчитываемых в kg на провод длиною в 1 m и сечением в 1 mm². Суммарная удельная нагрузка при наличии всех трех ее составляющих может быть определена по формуле:

$$p = \sqrt{(p_т + p_г)^2 + p_в^2}, \tag{481}$$

где $p_т$ — весовая нагрузка от самого провода, $p_г$ — от гололеда и $p_в$ — от ветра. В соответствии с формулой (481), общая нагрузка на провод при его сечении в Q mm² и длине в 1 m может быть определена выражением:

$$P = \sqrt{(P_т + P_г)^2 + P_в^2} = pQ. \tag{482}$$

Наиболее просто определяется нагрузка от веса провода, так как для этого нужно знать только его удельный вес. В тех случаях, когда провода несут добавочную арматуру, как например клеммы, струны, изоляторы, необходимо также учитывать вес этой арматуры, причем в большинстве случаев принято принимать его равномерно распределенным по всей длине проводов.

Значительно сложнее дело обстоит с учетом гололеда и ветра. Эти факторы сильно зависят от местных условий и вообще заранее точному учету не поддаются. Определять их приходится согласно нормам. Последние в различных государствах имеют свои особенности. В большинстве норм гололед принимается в виде слоя льда, окружающего провод, при толщине слоя в 10 mm и при удельном весе в 0,9. При таком условии, выражая d провода в mm, имеем:

$$p_г = 0{,}028\,\frac{d+10}{Q}\ \text{kg/m}\quad \text{mm}^2. \tag{483}$$

НТБ УГУНТ (ДІІТ)

Спорным является вопрос о том, следует ли учитывать гололед на контактном проводе, на котором благодаря движению токоприемника образование его сильно затруднено. По большей части нормы решают этот вопрос в отрицательном направлении.

Давление ветра по нормам определяется согласно общепринятой формуле

$$p_в = k_в v^2 \text{ kg/m}^2. \quad (484)$$

Если принять v в m/sec и d провода или троса в mm, то

$$p_в = 6 \times 10^{-5} \frac{d}{Q} v^2 \text{ kg/m mm}^2. \quad (485)$$

За наивысшую расчетную норму ветра принимают чаще всего около 30 m/sec. Для местностей городского типа и защищенных горами величину эту понижают до 20 m/sec. При гололеде ветер принимается нормально в 15 m/sec, причем за диаметр провода берется диаметр с учетом слоя льда.

Давление ветра на опоры рассчитывается согласно формуле (484). Для круглых опор $k_в$ берется равным 0,045, для плоских — 0,09 и для сдвоенных опор в направлении широкой их поверхности — 0,07. При решетчатых опорах учитывается сумма поверхностей железных частей передней стенки плюс 50% общей поверхности задней. Гололед на жестких поперечных конструкциях оценивается в 50 kg/m².

Колебание температуры нормально принимается в пределах от $+40°$ до $-30°$ C. Исключения допускаются только для тех местностей, для которых имеются определенные данные, значительно отступающие от указанных пределов. Проверять контактную систему на наибольший вертикальный провес рекомендуется при $+40°$ C без учета ветра. На боковое отклонение ее проверяют обычно при $+5°$ C с учетом наибольшей силы ветра. Проверять прочность проводов и тросов нужно для $-30°$ C без ветра и гололеда и для $-5°$ C с гололедом при скорости ветра 15 m/sec. Запас прочности для контактных проводов и стальных тросов рекомендуется брать равным 3. Для тросов же из нержавеющих металлов и таких же фидеров он может быть снижен до 2,5.

Размеры промежуточных опор надлежит определять для наиболее тяжелого из следующих трех случаев: собственного веса проводов и наибольшей скорости ветра, действующего как на опору, так и на провода при температуре $+5°$ C; собственного веса, гололеда и ветра силою в 15 m/sec, действующих как на провода, так и на опоры, при температуре $-5°$ C; собственного веса при температуре $-30°$ C. Анкерные опоры должны рассчитываться в предположении полного одностороннего тяжения всех проводов.

Приведенные здесь нормы механического расчета, дают представление об общем их порядке и базируются на предположениях НКПС. Однако, следует иметь в виду, что подобные нормы с течением времени претерпевают значительные видоизменения. Ввиду этого, в каждом отдельном случае необходимо при механических расчетах считаться в этом отношении с последними узаконениями.

2. Главнейшие законы работы контактных проводов при простых подвесках

Работа провода при постоянной температуре. При выводе основных уравнений провод будет предполагаться идеально эластичным. Нужно, однако, иметь в виду, что в действительности провод обладает известной жесткостью, попытка учесть которую будет сделана ниже. В основных же выводах провод будет предполагаться подчиняющимся законам идеальной гибкой нити. В основу вывода уравнений провода кладется элементарная схема (рис. 628), согласно которой он подвешен в точках A_0' и A_0''. Силу T, действующую по касательной к кривой провода в любой точке A, можно себе представить, как равнодействующую сил S и P. Первая сила S, очевидно, должна соответствовать горизонтальной силе тяжения в проводе. Вторая же составляющая P должна являться силой, определяющей нагрузку, приходящуюся на провод длиною равною дуге l_x'.

Согласно рис. 628, если угол между T и S обозначить через α, можно написать:

$$P = S \operatorname{tg} \alpha = pQl_x'.$$

В дальнейшем при обозначении напряжения в проводе через H kg/mm², нужно иметь в виду соотношение:

$$S = HQ.$$

НВ УДУНТ (ДІІТ)

При подстановке последнего выражения в предыдущее имеем:

$$H \operatorname{tg} \alpha = p l'_x.$$

По общему правилу математики, при взятых осях координат:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx},$$

$$dl'_x = \sqrt{dx^2 + dy^2}$$

и

$$l'_x = \int_0^x \sqrt{\frac{dx^2 + dy^2}{dx^2}}\, dx.$$

На основании приведенных выражений:

$$H \frac{dy}{dx} = p \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}\, dx.$$

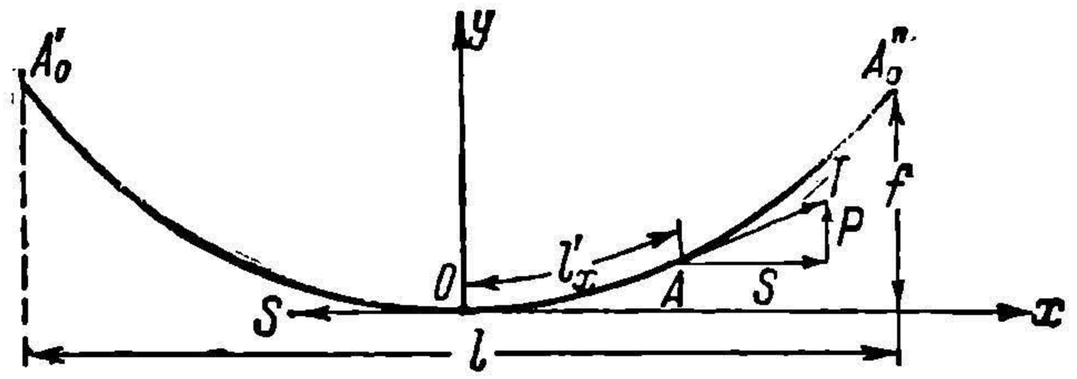


Рис. 628. Картина работы провода, подвешенного в двух опорных пунктах.

После диференцирования:

$$H \frac{d^2y}{dx^2} = p \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}\, dx.$$

Произведя дважды интегрирование данного выражения, можно получить известное выражение уравнения цепной линии:

$$y = \frac{H}{2p}\left(e^{\frac{px}{H}} + e^{-\frac{px}{H}}\right) - \frac{H}{p}.$$

При практическом пользовании данным уравнением встречаются значительные технические трудности. Учитывая к тому же, что вывод его базируется на предположении идеально гибкого провода, что в действительности не имеет места, допустимо пойти на некоторые упрощения. Для этой цели полученное выражение можно разложить в ряд:

$$y = \frac{px^2}{2H} + \frac{p^3 x^4}{24H^3} + \dots$$

Ввиду того, что нормально здесь члены высшего порядка являются числами относительно малыми, ими можно пренебречь, после чего последнее уравнение приводится к типу параболы:

$$y = \frac{p}{2H} x^2. \tag{486}$$

Полученное выражение является основным, на базе которого и производятся почти всегда все технические выкладки при анализе работы проводов. Согласно данному выражению наибольшая стрела провеса провода, находящаяся по середине пролета, определяется соотношением:

$$f = \frac{pl^2}{8H}. \tag{487}$$

Уравнение (487) устанавливает важнейшее соотношение между основными параметрами провода. Стрела провеса растет пропорционально удельной нагрузке провода и квадрату пролета, будучи обратно пропорциональна напряжению в проводе. На базе полученной формулы и указывалось в предыдущем, что для уменьшения стрелы провеса при данных p и l единственный путь состоит в увеличении напряжения в проводе.

Уравнения работы провода при температурных колебаниях. Выведенные соотношения предполагают неизменность окружающей температуры. Теперь следует выяснить влияние, оказываемое ее изменением на работу провода. При решении этого вопроса необходимо считаться с тем, что всякое колебание температуры вызывает соответствующее изменение напряжения в проводе. В соответствии с этим колебание температуры вызывает изменение длины провода, зависящее как непосредственно от температурного воздействия, так и от линейного изменения, вызываемого изменением напряжения в проводе. Если обозначить температурный коэфициент расширения через α и упругий коэфициент удлинения через β, то закон

НТБ УИИГТ (ДИИТ)

изменения провода длиною в l'_x при колебании температуры на dt и при соответственном изменении H на dH может быть представлен в виде уравнения:

$$dl'_x = (\alpha dt + \beta dH)\, l'_x.$$

Это уравнение нужно проинтегрировать в пределах от задаваемых начальных значений l'_0, t_0 и H_0 до текущих l', t и H:

$$\int_{l_0}^{l'} \frac{dl'_x}{l'_x} = \int_{t_0}^{t} \alpha dt + \int_{H_0}^{H} \beta dH.$$

Интеграл его:

$$\ln \frac{l'}{l'_0} = \alpha (t - t_0) + \beta (H - H_0). \qquad (488)$$

Уравнение в таком логарифмическом виде не особенно удобно для вычислений. Кроме того, оно содержит в себе длины дуг параболы l' и l'_0, что также весьма осложняет выкладки. Упростить данное уравнение можно по принципу разложения в ряд, предварительно выразив дуги параболы через длину пролета. Эта замена производится путем применения для дуги параболы известного выражения:

$$l' = l\left[1 + {}^{8}/_{3}\left(\frac{f}{l}\right)^2\right].$$

После его подстановки формула (488) принимает вид:

$$\ln \frac{1 + {}^{8}/_{3}\left(\frac{f}{l}\right)^2}{1 + {}^{8}/_{3}\left(\frac{f_0}{l}\right)^2} = \alpha (t - t_0) + \beta (H - H_0).$$

Разложение в ряд при пренебрежении членами высшего порядка дает:

$$\frac{8}{3l^2}(f^2 - f_0^2) = \alpha (t - t_0) + \beta (H - H_0). \qquad (489)$$

Если желательно представить полученное выражение в зависимости только от f и исключить H, то нужно воспользоваться формулой (487), и тогда можно получить выражение:

$$\frac{8}{3l^2}(f^2 - f_0^2) = \alpha (t - t_0) + \frac{\beta l^2}{8}\left(\frac{p}{f} - \frac{p_0}{f_0}\right). \qquad (490)$$

Если для расчета выгодней связать изменение температуры с изменением напряжения в проводе, то уравнение (489) принимает вид наиболее часто встречающейся формулы:

$$\frac{p^2 l^2}{24H^2} - \frac{p_0^2 l^2}{24H^2_0} = \alpha (t - t_0) + \beta (H - H_0). \qquad (491)$$

Полученные уравнения (489), (490) и (491) являются основными, на базе которых производятся все главнейшие расчеты работы контактного провода. Они дают возможность выяснить при любых удельных нагрузках провода важнейшие зависимости $H = F(t)$ и $f = F(t)$. При решении данных уравнений необходимо предварительно задаться начальными параметрами работы контактной системы. Начальный момент очень часто приурочивается к какому-либо характерному случаю, приводимому в нормах. Иногда задаются H_0 для наиболее низкой температуры, предлагаемой к руководству нормами. Довольно часто начальную величину H_0 определяют для температуры средней из наиболее высокой и наиболее низкой. При этом нагрузка p_0 устанавливается по нормам соответственно принятой начальной температуры. При заданных t_0, p_0 и H_0 стрелу провеса f_0 можно определить по формуле (487).

Если начальные значения приняты, то их удобнее всего объединить в один постоянный член:

$$C = \frac{p_0^2 l^2}{24H^2_0} - \alpha t_0 - \beta H_0.$$

Тогда уравнение (491) примет вид:

$$\frac{p^2 l^2}{24H^2} - \alpha t - \beta H = C. \qquad (492)$$

При решении данного уравнения относительно H при различных задаваемых t приходится иметь дело с кубическим уравнением. Практически проще задаваться

НБ УДУНТ (ДІІТ)

различными H и получать для них соответствующее t. Полученную таким образом кривую $t=F(H)$ можно нанести графически и по ней для любого значения t установить соответствующее H. Таким же самым образом можно поступить и с уравнением (490) при определении зависимости $t=F(f)$. Следует иметь в виду, что для расчета достаточно определить только одну зависимость: или $t=F(H)$, или $t=F(f)$. Переход от H к f или обратно можно производить по формуле (487).

Формулы (489), (490) и (491) универсальны. Они дают возможность не только определять изменения H и f в зависимости от температуры. С помощью их очень легко устанавливать также влияние изменения удельной нагрузки на напряжение H при постоянной температуре. Применительно к формуле (491) при $t=t_0$ для этих целей можно пользоваться выражением:

$$\frac{p^2l^2}{24H^2}-\beta H=\frac{p^2_0l^2}{24H^2_0}-\beta H_0. \qquad (493)$$

Случай несимметрично подвешенного провода. Такой тип подвески провода показан на рис. 629. Опоры расположены в точках A'_0 и A''_0, причем точка подвеса у A''_0 лежит на h ниже точки A'_0. Для решения вопроса о законе работы такого провода нужно несимметричную параболу $A'_0A''_0$ дополнить участком $A''_0A'''_0$ и свести ее к форме, уже разобранной выше. При таком условии, согласно выше выведенной формуле (487), соотношение основных параметров будет подчиняться условию:

$$Hf=\frac{pl_1^2}{8}. \qquad (494)$$

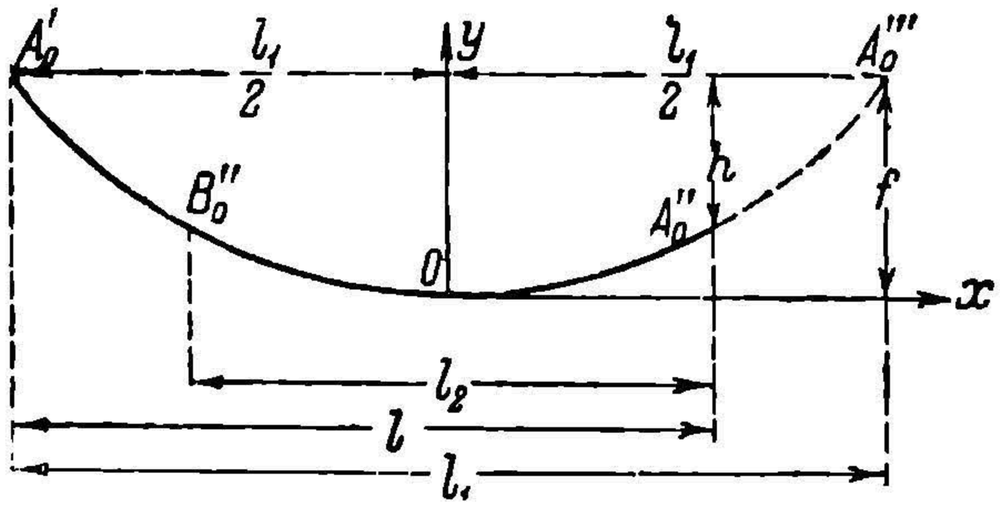


Рис. 629. Картина работы провода при подвеске в пунктах, находящихся на разных уровнях.

Некоторое затруднение при пользовании данной формулой заключается в определении l_1, так как эта величина непосредственно не дается, а ее нужно установить по заданным l и h. Для определения ее проще всего исходить из части параболы $A''_0B''_0$. При условии тех же H и p для нее можно написать выражение:

$$H(f-h)=\frac{pl_2^2}{8}. \qquad (495)$$

Совместное решение уравнений (494) и (495), если учесть равенство

$$l=\frac{l_1+l_2}{2},$$

дает:

$$\left.\begin{aligned} l_1&=l+\frac{2Hh}{pl}\\ l_2&=l-\frac{2Hh}{pl}\end{aligned}\right\}. \qquad (496)$$

Путем подстановки полученных величин l_1 и l_2 в формулы (494) и (495) можно решить все вопросы, касающиеся соотношений стрел провесов при постоянной температуре.

Определить работу провода при изменении температуры можно по тому же методу, что и для симметричной параболы. Все выкладки вплоть до уравнения (488) остаются теми же самыми. При дальнейшем оперировании задача заключается только в установлении дуги несимметричной параболы l'. Она может быть установлена по общему правилу из формулы:

$$l'=\int_{\frac{l_1}{2}}^{0}\sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2}\,dx+\int_{0}^{l-\frac{l_1}{2}}\sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2}\,dx=\int_{\frac{l_1}{2}}^{l-\frac{l_1}{2}}\sqrt{1+\left(\frac{dy}{dx}\right)^2}\,dx.$$

Интегрирование данного выражения, при учете соотношений (496) дает:

$$l'=\frac{2l^2+h^2}{2l}\left(1+\frac{p^2l^4}{12(2l^2+h^2)H^2}\right).$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

При подстановке в уравнение (488) l' и соответственно l'_0 получается:

$$\ln \frac{1+\frac{p^2 l^4}{12(2l^2+h^2)H^2}}{1+\frac{p^2_0 l^4}{12(2l^2+h^2)H^2_0}} = \alpha(t-t_0)+\beta(H-H_0).$$

После разложения логарифмического выражения в ряд и при пренебрежении членами высшего порядка, искомое уравнение примет вид:

$$\frac{l^4}{12(2l^2+h^2)}\left(\frac{p^2}{H^2}-\frac{p^2_0}{H^2_0}\right)=\alpha(t-t_0)+\beta(H-H_0). \qquad (497)$$

Влияние изменения расстояния между точками подвеса на работу провода. Данный вопрос имеет целью разрешить задачу, как изменятся величины H и f, если при той же температуре изменится расстояние между точками подвеса. При решении этого вопроса за исходное положение будут приняты параметры H_0, f_0, p_0 и l. Нужно найти, что произойдет с H и f, если l изменится на $\pm\Delta l$, и одновременно нагрузка p_0 превратится в p. Согласно выражениям для дуг параболы и уравнению (487), длины проводов при исходном и новом положениях могут быть определены соотношениями:

$$\left.\begin{aligned} l_0' &= l+\frac{p^2_0 l^3}{24H_0^2} \\ l' &= l\pm\Delta l+\frac{p^2(l\pm\Delta l)^3}{24H^2} \end{aligned}\right\}. \qquad (498)$$

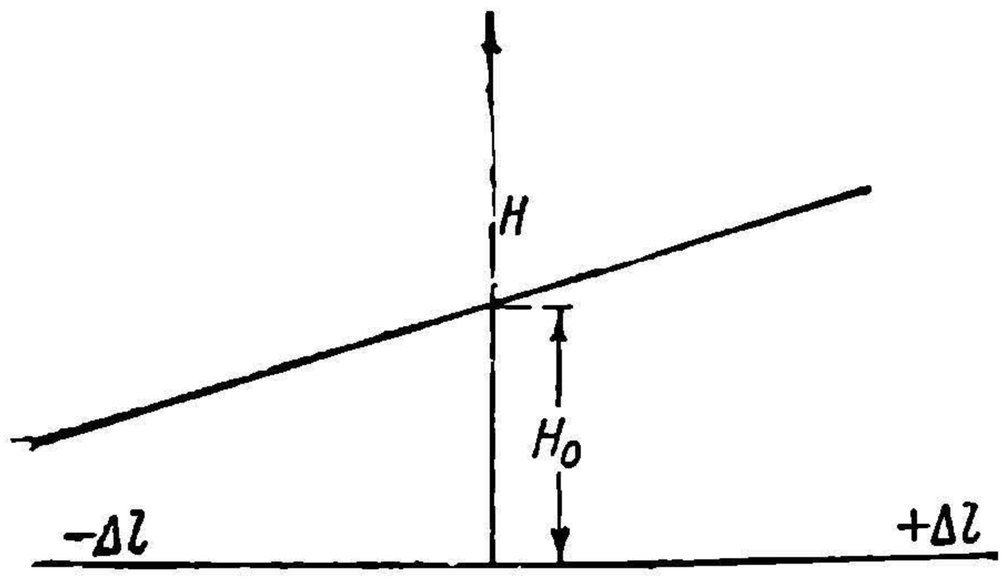


Рис. 630. Изменение напряжения в проводе при различных расстояниях между точками подвеса.

Далее нужно вообразить себе случай, при котором провод не имеет совершенно натяга. Очевидно, при таком предположении длины провода l_0' и l' перейдут в некоторые другие l_0'' и l'':

$$\left.\begin{aligned} l_0'' &= l+\frac{p^2_0 l^3}{24H^2_0}-\beta H_0 l; \\ l'' &= l\pm\Delta l+\frac{p^2(l\pm\Delta l)^3}{24H^2}-\beta H(l\pm\Delta l). \end{aligned}\right\} \qquad (499)$$

Так как выражения (498) и (499) относятся к одному и тому же проводу, то очевидно, при отсутствии всяких напряжений на проводе, а следовательно, и удлинений величины l_0'' и l'' должны быть равны:

$$l+\frac{p^2_0 l^3}{24H^2_0}-\beta H_0 l = l\pm\Delta l+\frac{p^2(l\pm\Delta l)^3}{24H^2}-\beta H(l\pm\Delta l).$$

На основании этого выражения искомое уравнение примет вид:

$$\pm\Delta l+\frac{p^2(l\pm\Delta l)^3}{24H^2}-\beta H(l\pm\Delta l)=\frac{p^2_0 l^3}{24H^2_0}-\beta H_0 l. \qquad (500)$$

Уравнение (500) позволяет установить зависимость $H=F(\Delta l)$. Кривые подобного типа имеют вид, представленный на рис. 630. При точном механическом расчете такими кривыми приходится пользоваться очень часто. К ним приходится прибегать во всех тех случаях, когда ставится задача учета влияния упругости опор на работу проводов, а также при ряде зядач, возникающих при обрыве проводов.

3. Особенности расчета цепных подвесок.

Расчет цепной подвески осложняется тем, что условия работы опорного троса резко отличаются от работы контактного провода. Трос, помимо своей собственной нагрузки, должен выдерживать также нагрузки, передающиеся ему со стороны контактного провода. Наиболее простой метод расчета цепной подвески строится на предположении, что вся нагрузка контактного провода целиком передается на трос, причем последний рассчитывается согласно приведенным выше формулам, как одиночный провод с равномерно распределенной нагрузкой.

Однако, такой расчет неточен. В действительности картина получается гораздо более сложной. Сущность процесса будет понятна, если рассмотреть два возможных случая работы системы. Допустим, что в подвеске (рис. 631) будут обрезаны все струны, за исключением *1* и *6*. При таком условии контактный провод займет

НБ УГУНТ (ДІІТ)

свободное положение с точками подвеса A'_0. Трос в этом случае никакой посторонней нагрузки нести не будет. Это, очевидно, может быть и в том случае, если восстановить цепную подвеску, но только придать струнам такую длину, которая будет точно соответствовать расстояниям между тросом и контактным проводом без струн. При таком соотношении провесов опорный трос цепной подвески никакой нагрузки от провода не получает, и последний поддерживает себя сам посредством своего провеса.

Второй характерный случай работы подвески получается при горизонтальном положении общей линии контактного провода. Легко сообразить, что в рассматриваемом случае опорный трос должен полностью принимать на себя всю вертикальную нагрузку от контактного провода, причем некоторый местный провес последнего между смежными струнами, являясь неизбежным, здесь особой роли не играет. Для разбираемого процесса важно горизонтальное положение общей линии провода. Весьма характерна работа контактной системы в положениях промежуточных между двумя рассмотренными. Очевидно, что в этом промежуточном положении часть нагрузки будет нести сам провод, а часть ее будет принимать на себя трос. Чем больше будет провес провода, тем большую часть нагрузки он будет брать на себя. В процессе изменения температуры может оказаться при соответствующем ее понижении, что контактный провод получит выгиб от горизонтального положения не

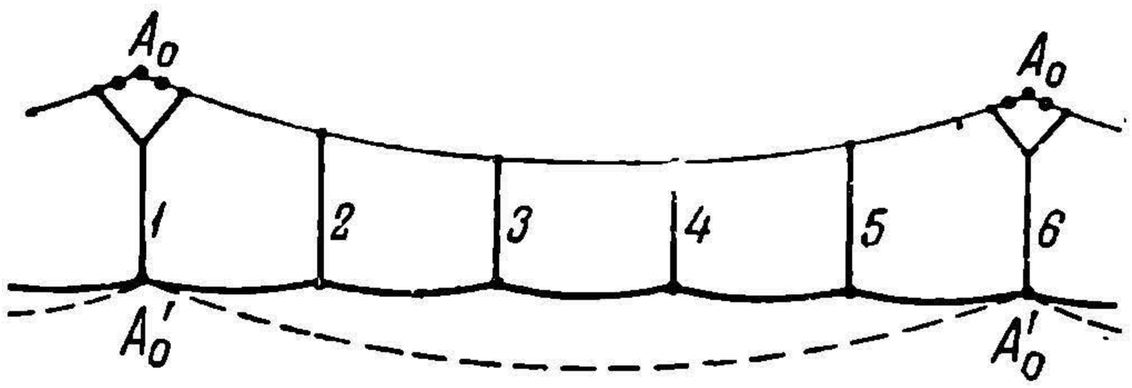


Рис. 631. Картина провеса контактного провода при наличии струн и при их обрыве.

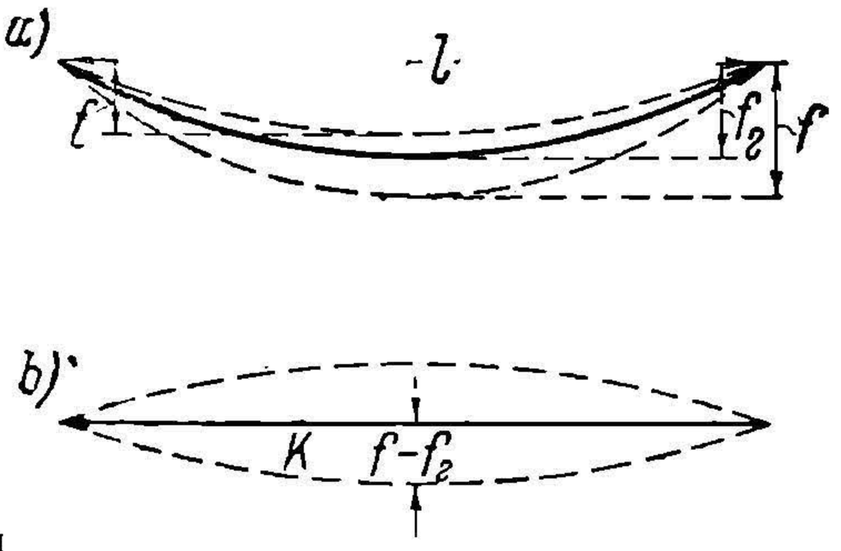


Рис. 632. Провес контактного провода в цепной подвеске при изменении температуры.

вниз, а вверх (рис. 632 *b*). Стрела его провеса получит отрицательное значение. Естественно, что при таких условиях работа троса еще больше утяжеляется. Помимо нагрузки от веса контактного провода, он должен взять на себя и те усилия, которые необходимы для придания проводу выгнутого вверх положения.

Излагаемый здесь метод расчета цепной подвески был предложен Carter'ом (Л. 10). Близким к нему является метод Naderer'a, применяемый немецкими железными дорогами (Л. 273). Нужно указать, что эти методы не являются абсолютно точными Они исходят из допущения, что при всех изменениях температуры точки подвеса контактного провода под опорами как бы наглухо закреплены. Основанием к этому допущению служит наличие у опор боковых фиксаторов, которые своею тяжестью ограничивают вертикальные перемещения контактного провода. В случае же работы фиксаторов на сжатие при их обычном уклоне от контактного провода к опорам вверх, к весу фиксатора присоединяется еще сила его реакции, стремящаяся воспрепятствовать подъему провода (рис. 571). Значительно меньше данных допускает неизменность положения точек контактного провода у опор при подвесках без фиксаторов или при очень легких фиксаторах, с чем приходится встречаться часто в системах без зигзага (Л. 268). Нужно отметить, что методы расчета подвески с учетом перемещения точек контактного провода под опорами очень сложны, а, кроме того, и при них приходится итти на ряд допущений и условностей. Ввиду того, что уточнения, вводимые ими, не имеют особенно существенного практического значения в основу ниже приводимого метода расчета, дабы не слишком его усложнять, будет положено предположение неизменного состояния точек подвеса контактного провода у опор.

При выводе аналитических зависимостей для учета влияния тяжения в контактном проводе на работу троса провес контактной системы будет характеризоваться стрелами провеса троса. В дальнейшем будут различаться стрелы провеса текущие f, начальные f_0 и стрелы провеса троса при горизонтальном положении

НБ УГУНТ (ДІІТ)

контактного провода f_z. При таком условии стрелы провеса контактного провода, очевидно, могут определяться разностью f и f_z:

$$f_к = f - f_z. \tag{501}$$

Центральной задачею разбираемого вопроса является определение той нагрузки $p_Ф$, которую будет принимать на себя сам контактный провод. Как уже было выяснено, она вызывается фактом провеса провода, причем работа его должна подчиняться, конечно, основному закону, связывающему напряжение в проводе, стрелу провеса, длину пролета и удельную нагрузку (487). При таком условии удельная нагрузка провода, воспринимаемая им благодаря провесу при стреле провеса f_k и напряжении в контактном проводе H_k, должна определиться выражением:

$$H_k f_k = \frac{p_Ф l^2}{8}$$

или

$$p_Ф = \frac{8H_k (f - f_z)}{l^2}. \tag{502}$$

Зная нагрузку $p_Ф$, можно установить формулу и для работы троса, в частности для его напряжения H_m. Если обозначить общую удельную нагрузку троса через p_{k+m}, включив в нее полную удельную собственную его нагрузку и в зависимости от типа подвески ту или другую (рис. 634) нагрузку провода, то при равенстве их сечений нагрузка троса определится, очевидно, разностью между p_{k+m} и $p_Ф$:

$$p_{eff} = p_{k+m} - p_Ф.$$

При таком условии основная формула (487) для троса примет вид:

$$H_m f = \frac{(p_{k+m} - p_Ф) l^2}{8}. \tag{503}$$

Если же предположить сечения троса и провода соответственно равными Q_m и Q_k, то при отнесении удельных нагрузок к единице площади сечения троса формула (503) получит выражение:

$$H_m = \left[p_{k+m} - \frac{8H_k Q_k (f - f_z)}{Q_m l^2} \right] \frac{l^2}{8f}. \tag{504}$$

Теперь можно перейти к составлению для троса общего температурного уравнения работы. Для этих целей берется формула (489). Вместо H в нее вставляется значение H_m. При таком условии искомое уравнение примет вид:

$$\frac{8}{3l^2}(f^2 - f^2_0) = \alpha_m (t - t_0) + \frac{\beta_m l^2}{8}\left(\frac{p_{k+m}}{f} - \frac{p_{k_0+m_0}}{f_0}\right) -$$

$$- \frac{\beta_m Q_k}{Q_m}\left[H_k\left(1 - \frac{f_z}{f}\right) - H_{k_0}\left(1 - \frac{f_z}{f_0}\right)\right]. \tag{505}$$

В общей форме данное уравнение имеет достаточно сложный вид. В частном случае, при автоматическом натяжении контактного провода, когда H_k можно принимать неизменным и равным H_{k_0}, решение его значительно упрощается. Гораздо сложнее дело обстоит с простой эластичной подвеской без компенсации. Здесь для каждой новой температуры приходится вновь определять H_k. В основе здесь остается в силе уравнение (505), в которое вместо H_k нужно подставлять значения согласно выражению (489), причем в последнее вместо f нужно подставлять f_k из уравнения (501):

$$H_k = H_{k_0} + \frac{8}{3\beta_k l^2}\left[(f - f_z)^2 - (f_0 - f_z)^2\right] - \frac{\alpha_k}{\beta_k}(t - t_0). \tag{506}$$

При подстановке величины H_k в уравнение (505) последнее получает вид:

$$\frac{8}{3l^2}(f^2 - f^2_0) = \alpha_m (t - t_0) + \frac{\beta_m l^2}{8}\left(\frac{p_{k+m}}{f} - \frac{p_{k_0+m_0}}{f_0}\right) -$$

$$- \frac{\beta_m Q_k}{Q_m}\left\{\frac{8}{3\beta_k l^2}\left[(f - f_z)^2 - (f_0 - f_z)^2\right]\left(1 - \frac{f_z}{f}\right) -\right.$$

$$\left. - \frac{\alpha_k}{\beta_k}(t - t_0)\left(1 - \frac{f_z}{f}\right) - H_{k_0}\left(\frac{f_z}{f} - \frac{f_z}{f_0}\right)\right\}. \tag{507}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Полученное уравнение представляет значительные затруднения при прямом его решении относительно f для различных t. Наиболее просто решить его графически, задаваясь f и получая t. Построенная таким образом кривая $t=F(f)$ дает возможность найти для каждого значения t соответствующее f. В некоторых случаях решение уравнения можно упростить, если исходить при расчете из предположения равенства $f_0=f_z$, т. е. брать за начальное положение горизонтальную линию контактного провода.

4. Учет влияния ветровых отклонений подвесок.

В случае простой подвески вопрос о ветровых отклонениях решается достаточно просто. Допустим, что при отсутствии ветра провод при начальной температуре t_0 имел некоторую нагрузку P_0 и стрелу провеса f_0. Требуется определить его отклонение от середины пути при вертикальной нагрузке P_1, ветровой $P_в$ и температуре t окружающего воздуха. В случае боковой ветровой нагрузки провод примет некоторое наклонное положение OA, причем направление линии OA определится направлением равнодействующей сил P_1 и $P_в$. Величины равнодействующей и угла наклона ее к вертикали согласно рис. 633 можно определить соотношениями:

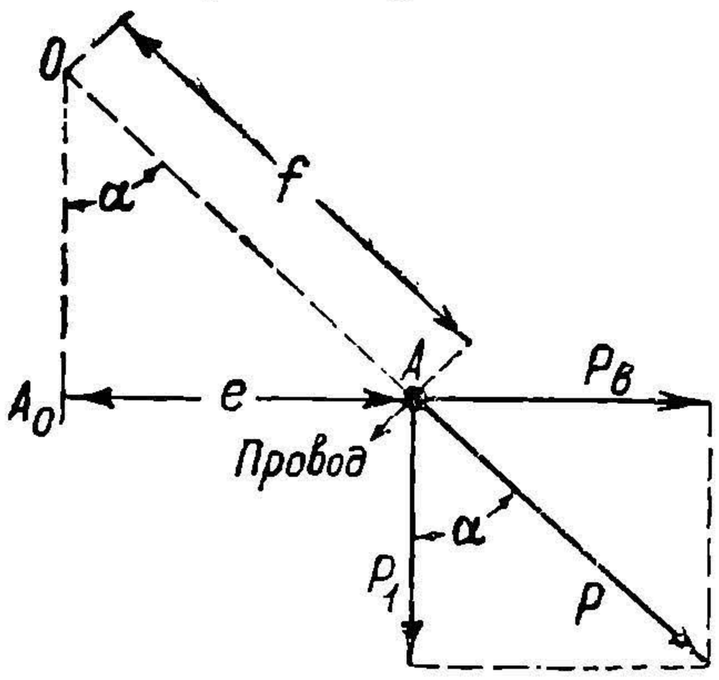


Рис. 633 Диаграмма усилий при действии ветра на провод при простой подвеске.

$$P=\sqrt{P^2_1+P^2_в} \quad \text{и} \quad \sin\alpha=\frac{P_в}{P}=\frac{p_в}{p}.$$

Искомое отклонение по тому же рис. 633:

$$e=f\sin\alpha=\frac{fp_в}{p}. \qquad (508)$$

В данном уравнении пока неизвестна стрела провеса при рассматриваемой ветровой нагрузке. Она определяется для данного t по общему правилу из уравнения (490), в котором f_0, p_0 и t_0 являются известными. Если по тем или другим условиям выгодно исходить из напряжений в проводе, а не из стрел провеса, то уравнение (508) на основании уравнения (487) может быть написано в виде:

$$e=\frac{p_в l^2}{8H}. \qquad (509)$$

В этом случае H определяется при данном t из уравнения (491). Значительно сложнее дело обстоит с определением ветровых отклонений при цепных подвесках. В данном случае под влиянием ветра отклоняются и трос, и контактный провод.

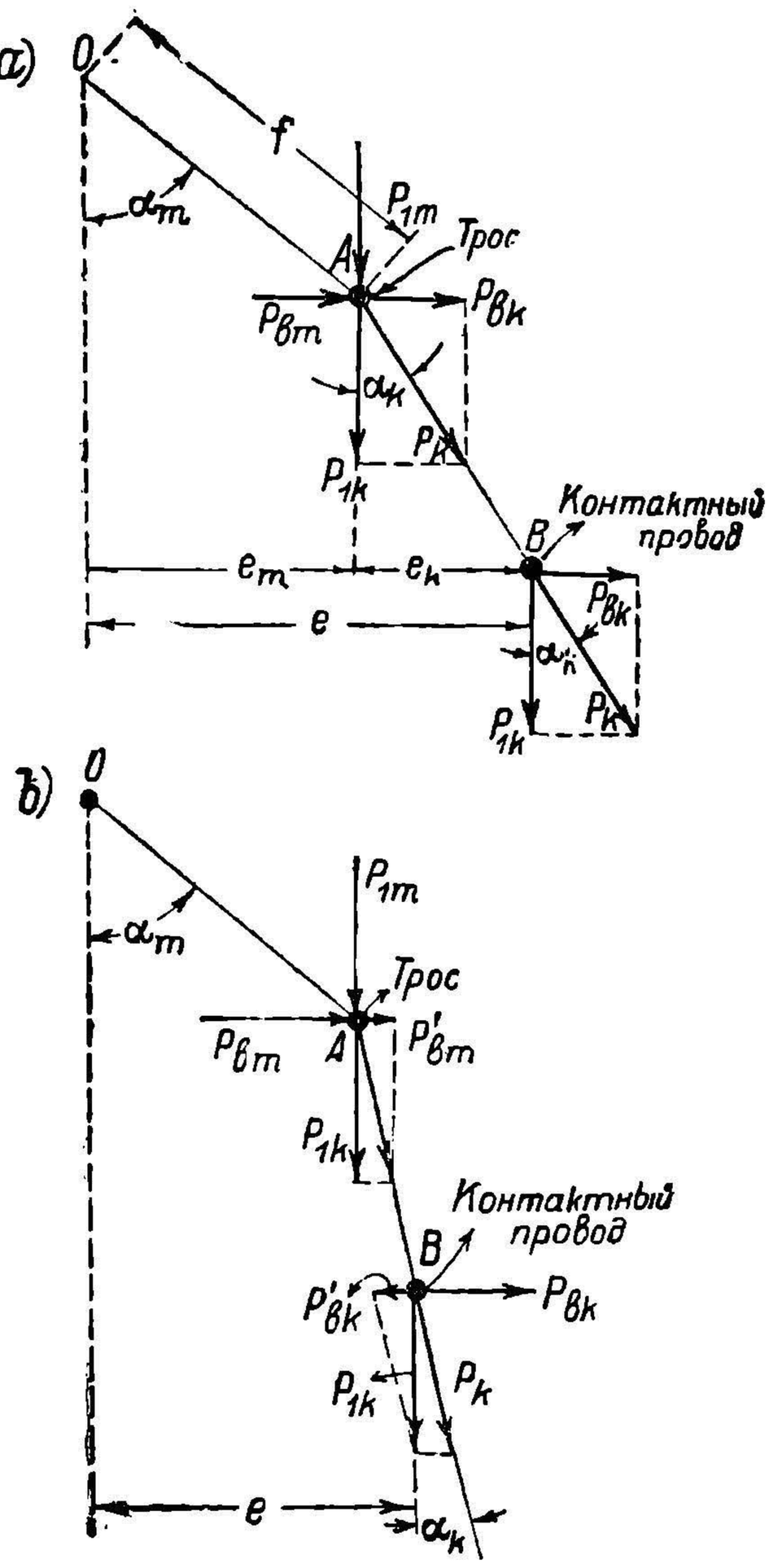


Рис. 634. Диаграммы усилий при действии ветра на цепную подвеску без боковых фиксаторов и с жесткой фиксацией контактного провода.

НБ УИУНТ (ДІІТ)

Наиболее простым случаем определения ветровых отклонений при цепных подвесках следует считать случай подвесок без боковых фиксаторов (рис. 634-*а*). Здесь ветровое отклонение складывается из двух отклонений. Прежде всего независимо от отклонения троса свободно подвешенный к нему контактный провод отклонится от вертикали на $e_к$, повернувшись под воздействием ветровой силы $P_{вк}$ на угол $\alpha_к$ около точки подвеса к тросу. Поворот этот, очевидно, должен произойти по радиусу AB, равному длине струны a в середине пролета. Из рис. 634-*а* следует:

$$e_к = a \sin \alpha_к = \frac{aP_{вк}}{\sqrt{P^2_{вк} + P_1{}^2_к}} = \frac{aP_{вк}}{P_к}.$$

Отметим, что здесь и в дальнейшем при определении боковых отклонений удобней исходить не из удельных значений нагрузок, а из полных, приходящихся на 1 m.

Вторая составляющая ветрового отклонения определяется перемещением троса. Боковое отклонение e_m троса зависит от его стрелы провеса f и угла его поворота α_m:

$$e_m = f \sin \alpha_m.$$

Так как контактный провод при отсутствии боковых фиксаторов, поддерживается исключительно тросом, то отклонение последнего производится не только за счет своих собственных нагрузок, но и за счет тех сил, которые передаются через струны. Как следует из рис. 634-*а*, $\sin \alpha_m$ может быть определен из соотношения:

$$\sin \alpha_m = \frac{P_{вт} + P_{вк}}{P_{m+k}} = \frac{P_{в\,(m+k)}}{P_{m+k}},$$

где

$$P_{m+k} = \sqrt{(P_{1m} + P_{1к})^2 + (P_{вк} + P_{вт})^2}.$$

Полное отклонение контактного провода будет равно:

$$e = f\frac{P_{в\,(m+к)}}{P_{m+k}} + a\frac{P_{вк}}{P_к} \qquad (510)$$

Стрела провеса троса, при данной его удельной нагрузке p_{m+k} и температуре t, устанавливается на основании уравнения (490).

Для подвесок, при которых ввиду наличия боковых фиксаторов приходится считать контактный провод как бы жестко закрепленным у опор, точное определение ветровых отклонений представляет большие затруднения (рис. 634-*b*). В этом случае боковое перемещение контактного провода находится в значительно меньшей зависимости от передвижения троса, чем при предыдущем типе подвески. Здесь, при неподвижных точках подвеса провода оно преимущественно определяется внутренними напряжениями самого провода. Тем не менее, известное влияние при боковых передвижениях трос и провод друг на друга оказывают. В общем случае струна AB может не только занять по отношению к тросу показанное на рис. 634-*b* положение, но и расположиться вертикально, и с наклоном в другую сторону. Это будет зависеть от параметров подвесов. В рассматриваемом случае характерно то, что вертикальная нагрузка $P_{1к}$, передаваясь через струну, дает по линии действия ветровой силы контактного провода противодействующую ей силу $P'_{вк}$. При вертикальном положении струны AB эта последняя сила будет равна нулю, а при наклоне струны влево от вертикали она будет действовать в одну сторону с $P_{вк}$. Как видно из схемы, сила $P_к$ будет вызывать горизонтальные силы $P'_{вт}$ на тросе, равные тем же силам $P'_{вк}$, но только действующие в противоположных направлениях. Таким образом, из произведенного анализа следует, что при ветровых перемещениях контактный провод и трос, благодаря силам $P'_{вк}$ и $P'_{вт}$ оказывают взаимное влияние.

Следует обратить внимание на то, что процесс рассматривается при условии горизонтального положения контактного провода, и что поэтому вся его вертикальная нагрузка приходится на трос. Если бы исходить из случая, когда за счет своего напряжения контактный провод берет часть своей вертикальной нагрузки на себя, то вопрос осложнился бы еще больше. Для случая, когда трос принимает на себя всю вертикальную нагрузку системы, боковое отклонение контактного провода, происходящее по общему закону параболы только под действием горизонтальных составляющих, может быть определено, как стрела провеса, по формуле (487):

$$e = \frac{(P_{вк} \pm P_{1к} \operatorname{tg} \alpha_к)\, l^2}{8S_к}. \qquad (511)$$

НВ УДУНТ (ДІІТ)

Применение данной формулы встречает большие затруднения из-за угла $\alpha_к$ Для отдельнных струн величина его меняется от максимума в середине пролета до нулевых значений у опор. Анализ этого угла и некоторые методы приближенного определения его можно найти в работе проф. Шевалина (Л. 271).

Для практических целей в большинстве случаев идут на упрощение формулы (511) путем пренебрежения $P_{1_к} \operatorname{tg} \alpha_к = P'_{вк}$ Основанием к этому служит трудность и вместе с тем значительная неточность установления угла $\alpha_к$. Кроме того, сам по себе весь расчет цепной подвески производится при ряде допущений и приближении. В частности, предположение жесткой фиксации провода у опор весьма условно. Пренебрежение $P'_{вк}$ нормально ведет к некоторому запасу в расчете. При учете того обстоятельства, что токоприемник при движении совершает большие поперечные паразитные перемещения, запас этот даже полезен. Допустимость его следует также из того, что при реально неполной жесткости боковой фиксации, ветровые отклонения должны быть несколько больше, чем при формуле (511). Указанные соображения объясняют, почему при практических расчетах обычно исходят из формулы:

$$e = \frac{(P_{вп} + P_{вк})\, l^2}{8(S_m + S_к)}. \tag{512}$$

Отличие ее формулы (511) при пренебрежении в последней членом $P_{1_к} \operatorname{tg} \alpha_к$ заключается в введении величин S_m и $P_{вт}$. Это имеет целью учесть влияние троса на отклонение контактного провода. Нормально введение указанных величин несколько снижает e. Общие соображения и вычисления показывают, что погрешности при пользовании формулой (512) не должны превышать 7—8%, причем они для подвесок с автоматизацией нормально меньше, чем для простых эластичных.

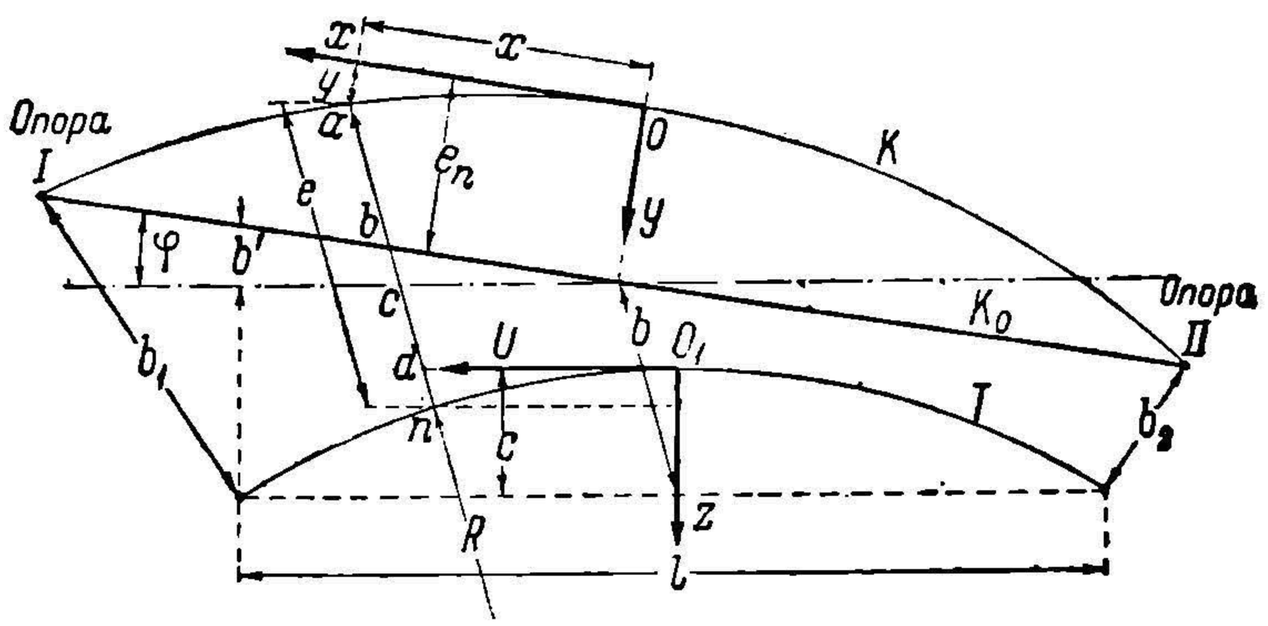


Рис. 365. Диаграмма для определения величин бокового отклонения контактного провода при зигзаге

Произведенные вычисления боковых отклонений контактного провода предполагают, что он тянется без зигзагов по центральной путевой линии. В действительности же не только на кривых, где зигзаг неизбежен, но в европейской практике и на прямых провод обычно имеет зигзаги. При наличии же последних ветровые отклонения получаются иными, причем наибольшие их значения имеют место уже не посредине пролета.

Для определения величин отклонения контактного провода при наличии зигзагов будем исходить из наиболее сложного случая — положения провода на кривой (рис. 635). Согласно приведенной схеме предположено, что центральная ось пути определяется окружностью T с радиусом R, соответствующим радиусу взятой кривой пути. Положение контактного провода без ветрового отклонения принято в виде прямой K_0. Эта прямая взята для случая, когда она не пересекает центральную осевую окружность. Если провод на кривой трассируется с пересечением ее, сущность решения вопроса остается без изменения. Для обобщения вопроса принят зигзаг несимметричным. Как видно из рис, 635, отклонения провода b_1 и b_2 от средней линии различны. Расстояние между опорами l определяется по точкам центральной осевой кривой.

При дальнейших выводах будут делаться допущения. Если базироваться на приведенной схеме рис. 635, который сделан при несколько утрированных для ясности выкладок параметрах, эти допущения могут показаться весьма значительными. Однако, при реальных параметрах они для практических целей являются вполне допустимыми. Без ветра положение контактного провода, как уже принято, определяется прямой K_0. При ветре согласно предыдущим соображениям провод займет

НБ УДУНТ (ДІІТ)

положение K по закону параболы. Уравнение последней при взятых координатных осях согласно уравнениям (486):

$$y = \frac{(P_{вт} + P_{вк})\, x^2}{2\,(S_т + S_к)}. \tag{513}$$

Величина отклонения провода от его начального положения в середине пролета определится прежним выражением (512):

$$e_п = \frac{(P_{вт} + P_{вк})\, l^2}{8\,(S_т + S_к)}. \tag{514}$$

Задача настоящего исследования — найти наибольшее ветровое отклонение провода от траектории середины дуги токоприемника. С достаточной степенью приближения, особенно при больших R, можно считать, что траектория середины токоприемника будет представлять собой окружность T. Уравнение последней в принятых на рис. 635 координатных осях может быть представлено в виде:

$$u^2 = z\,(2R - z).$$

В виду того, что практически значения z по сравнению с R очень незначительны, данное уравнение можно упростить, пренебрегая членом z^2. При таком условии получается:

$$z = \frac{u^2}{2R} \cong \frac{x^2}{2R}. \tag{515}$$

После установления законов изменения кривых K и T задача определения наибольшего значения бокового отклонения контактного провода сводится к нахождению наибольшего расстояния между этими кривыми, причем расстояние это нужно брать по направлению радиусов кривой пути. Предполагается, что дуга токоприемника будет всегда устанавливаться именно по этому направлению. Как уже было указано, b_1 и b_2 характеризуют зигзаги провода. Средняя величина зигзага приближенно определяется равенством:

$$b \cong \frac{b_1 + b_2}{2}. \tag{516}$$

Таким же самым образом можно с допущением положить:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{2b'}{l} \cong \frac{b_1 - b_2}{l}. \tag{517}$$

Величина c определяется из уравнения (515) для $x = l/2$:

$$c = \frac{l^2}{8R}. \tag{518}$$

На основании произведенных выкладок текущая величина e бокового отклонения провода от траектории середины дуги токоприемника для любой точки может быть приближенно определена из равенства:

$$e = ab + bc + cd + dn$$

или, так как $ab \cong e_п - y$, $bc \cong x \operatorname{tg}\varphi$, $cd \cong b - c$ и $dn \cong z$,

$$e \cong e_п - y + x \operatorname{tg}\varphi \pm b \mp c + z.$$

Появление двух знаков перед b и c объясняется тем, что здесь учитываются два направления ветра. Верхний знак относится к направлению ветра, направленному на рис. 635, т. е. от центра кривой. Нижний же знак нужно относить к направлению обратному. За расчетный случай нужно брать более тяжелый.

Подстановка предыдущих равенств дает:

$$e \cong \left(\frac{P_{вт} + P_{вк}}{S_т + S_к} \mp \frac{1}{R}\right)\frac{l^2}{8} - \left(\frac{P_{вт} + P_{вк}}{S_т + S_к} \mp \frac{1}{R}\right)\frac{x^2}{2} + \frac{(b_1 - b_2)}{l}\, x \pm \frac{b_1 + b_2}{2}. \tag{519}$$

Наибольшее значение l определится путем диференцирования данного уравнения по x и определения последнего из уравнения:

$$\frac{de}{dx} = 0.$$

Значение x, при котором боковое отклонение получается наибольшим, определяется равенством:

$$x = \frac{b_1 - b_2}{\left(\dfrac{P_{вт} + P_{вк}}{S_т + S_к} \mp \dfrac{1}{R}\right) l}$$

НВ УДУНТ (ДІІТ)

При подстановке этого выражения в уравнении (519) искомая величина бокового отклонения получается равной:

$$e_{max}=\left(\frac{P_{вт}+P_{вк}}{S_m+S_к}\mp\frac{1}{R}\right)\frac{l^2}{8}+\frac{(b_1-b_2)^2}{2\left(\frac{P_{вт}+P_{вк}}{S_m+S_к}\mp\frac{1}{R}\right)l^2}\pm\frac{b_1+b_2}{2}. \qquad (520)$$

На практике обычно приходится по e_{max}, определяемому габаритными соотношениями контактной системы и токоприемника, устанавливать наибольший возможный пролет между опорами. Для нахождения его нужно решить биквадратное уравнение (520) относительно l:

$$l=2\sqrt{\frac{S_m+S_к}{P_{вт}+P_{вк}\mp\frac{S_m+S_к}{R}}\left[e_{max}\mp\frac{b_1+b_2}{2}+\sqrt{\left(e_{max}\mp\frac{b_1+b_2}{2}\right)^2-\left(\frac{b_1-b_2}{2}\right)^2}\right]}. \qquad (521)$$

За расчетное l берется меньшее из двух значений, получаемое от комбинации знаков. Особые замечания нужно сделать по вопросу о b_1 и b_2. В разобранном случае b_1 и b_2 согласно рис. 635, находятся по одну сторону от центральной линии пути. Такое положение характерно для кривых. На прямых участках при устройстве зигзага картина нормально получается иная. Здесь линия провода пересекает центральную ось пути, и отрезки b_1 и b_2 оказываются по ту и другую сторону от центральной линии. Легко сообразить, что при таких условиях они должны мыслиться с разными знаками. Для прямолинейных участков пути при симметричном зигзаге должны иметь место равенства $b_1=-b_2=b$ и $R=\infty$, что дает для l:

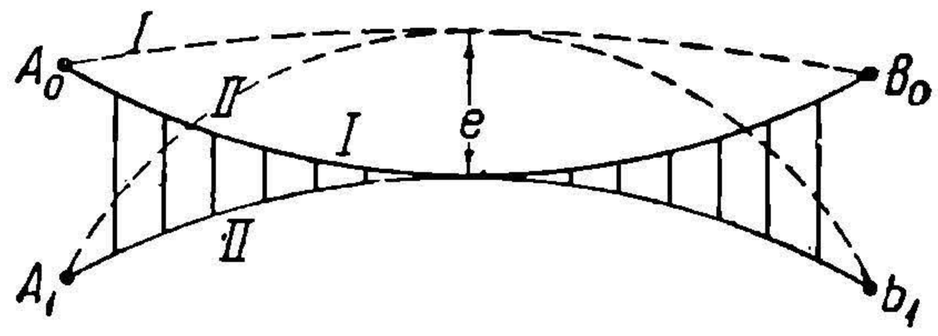


Рис. 636. Диаграмма отклонений при двух проводах, находящихся в одном уровне и соединенных жесткими поперечными связями.

$$l=2\sqrt{\frac{S_m+S_к}{P_{вт}+P_{вк}}\left(e_{max}+\sqrt{e^2_{max}-b^2}\right)}. \qquad (522)$$

Очень сильно затрудняется вопрос об определении ветровых отклонений при наклонных подвесках. Наиболее просто он решается Buchhold'ом, проверившим свои предположения на моделях (Л. 276). Метод его становится понятным из рассмотрения рис. 636. На нем изображены два провода A_0B_0 и A_1B_1, которые соединены друг с другом жесткими связями. Расположены они в горизонтальной плоскости. Тяжение в первом — S_1, во втором — S_2. При действии ветра провода будут отклоняться. Так как предположено, что между ними связи жесткие, то закон отклонения их должен соответствовать общему закону (486), причем величины отклонения обоих проводов от начального положения должны быть одинаковыми и равными ординатам параболы:

$$y=\frac{P_{в1}+P_{в2}}{2(S_1+S_2)}x \qquad (523)$$

На основании этого уравнения можно построить положения обоих проводов при ветре, откладывая от начального их положения величины ординат полученной параболы. Наибольшее отклонение проводов будет равно:

$$e=\frac{P_{в1}+P_{в2}}{S_1+S_2}\cdot\frac{l^2}{8}. \qquad (524)$$

Если связи между проводами будут не жесткие, то нарисованная картина будет иметь место только при равенстве:

$$\frac{P_{в1}}{S_1}=\frac{P_{в2}}{S_2}. \qquad (525)$$

Если обратиться к наклонным подвескам, то к проекциям их на горизонтальную плоскость можно применить только что изложенные положения. Неточность применения рассмотренного метода будет, главным образом, зависеть от несоблюдения равенства (525). Однако, Buchhold доказывает, что для нормальных типов подвесок соотношение это достаточно справедливо. Ошибку нужно ждать не выше 5—6%

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Применение разобранного способа к наклонной подвеске, в которой контактный провод и трос располагаются по разным сторонам осевой линии пути, видно из рис. 578. При данной трактовке вопроса контактный провод и трос отклоняются от своего первоначального положения на одинаковые расстояния. Общая форма кривой отклонения провода от средней линии пути получает сложный вид. При помощи этого метода с проверкой его на моделях Buchhold исследовал три типа подвески с параметрами близкими к немецкой объединенной. Первая подвеска взята нормальная с отвесными струнами. Вторая — типа рис. 577 и третья — только что рассмотренного типа (рис. 578). Основные габариты подвесок и полученные результаты видны из рис. 637. Как уже отмечалось выше, преимущества в отношении наименьших значений боковых отклонений оказываются на стороне подвесок третьего типа. Для наклонных подвесок на кривых ветровые отклонения приближенно можно определить тем же способом графического построения парабол с помощью уравнения (523).

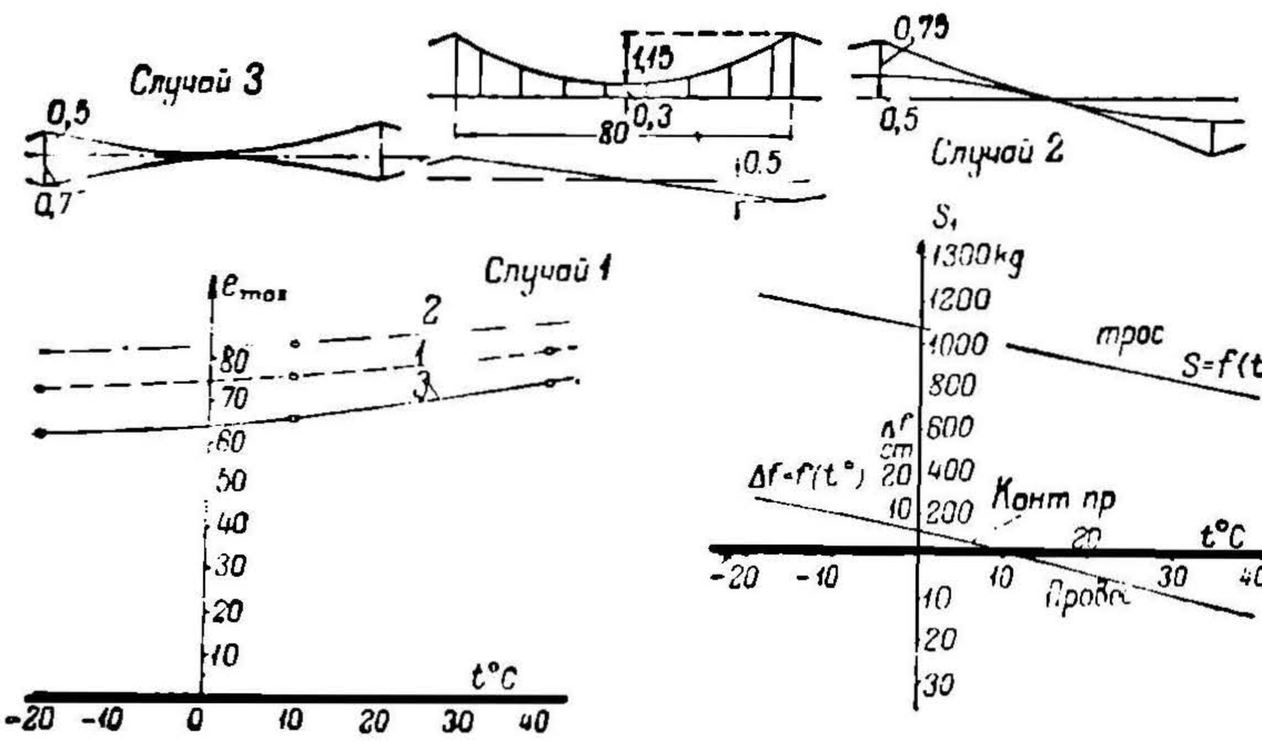


Рис. 637. Диаграмма ветровых боковых отклонений основных типов цепных подвесок.

5. Дополнительные напряжения в контактных подвесках.

При расчете контактных подвесок учитывались только напряжения, вызываемые главными факторами работы. В действительности, однако, имеется ряд побочных явлений, вызывающих очень часто значительные дополнительные напряжения в системе. Наиболее существенными факторами подобного рода нужно считать жесткость проводов, давление токоприемников и искажение нормального положения подвесок.

При выводе основных уравнений работы подвесок, приводящихся к цепной линии и параболе, предполагалось, что провода представляют из себя идеально гибкую нить. В действительности же они обладают значительною жесткостью. В результате провод получает кривую провеса, отличающуюся от той, которая получается по вышевыведенным формулам (рис. 638). Как видно из рис. 638, жесткость особенно сильно искажает кривые в местах, примыкающих к опорным точкам. Здесь получается как бы прямолинейный участок, вследствие чего, кроме обычных сил тяжения, провод подвергается дополнительному изгибающему моменту относительно точек подвеса. Точное исследование данного вопроса, произведенное Tolle, очень сложно. Ввиду этого Montelius, исследовавший этот вопрос для шведских железных дорог, предлагает более упрощенное его решение (Л. 8). Он вывел с некоторыми допущениями формулу для учета дополнительного напряжения от изгиба такого вида:

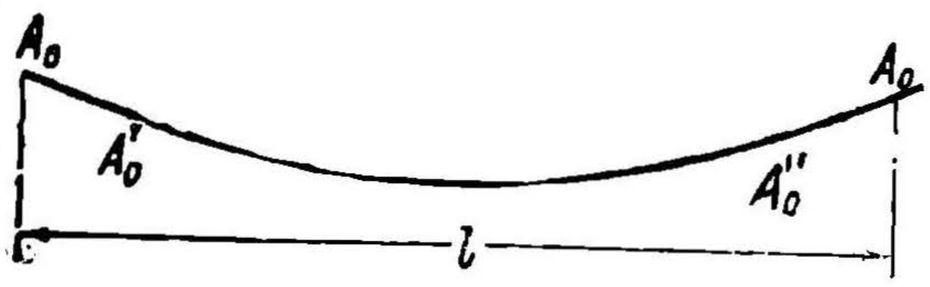


Рис. 638. Схема провеса провода при учете жесткости материала.

$$H_1 = 1{,}026\,\frac{l}{\sqrt{H}}\ \text{kg}. \qquad (526)$$

Очень сложной задачей является учет дополнительных напряжений в проводе от действия токоприемника. Одни из этих напряжений имеют статическое, другие динамическое происхождение. Первые вызываются давлением токоприемника на провод при условии, что по высоте токоприемник не перемещается. Второго рода

НБ УДУНТ (ДІІТ)

давление появляется в процессе вертикального передвижения токоприемника. Если бы провод имел идеально горизонтальный уровень, динамическое давление не имело бы места. Особый тип динамического давления составляют давления резко ударного характера при отскакивании токоприемника и следующем за ним ударе по проводу. Дать точные формулы для определения добавочного напряжения от токоприемника не представляется возможным. Особенно трудно учесть динамические эффекты точно. Они весьма зависят от ряда разнообразных факторов; от провеса провода, от типа подвески, от конструкции фиксаторов, от токоприемника, массы его, пружин и демпферов. С возрастанием скорости, естественно, динамическое воздействие резко растет. Для выяснения порядка добавочного напряжения в проводе от токоприемника можно привести формулу шведских железных дорог выведенную инж. Montelius'ом при учете, главным образом, статического давления. При давлении токоприемника в B kg, добавочное напряжение определяется им по формуле:

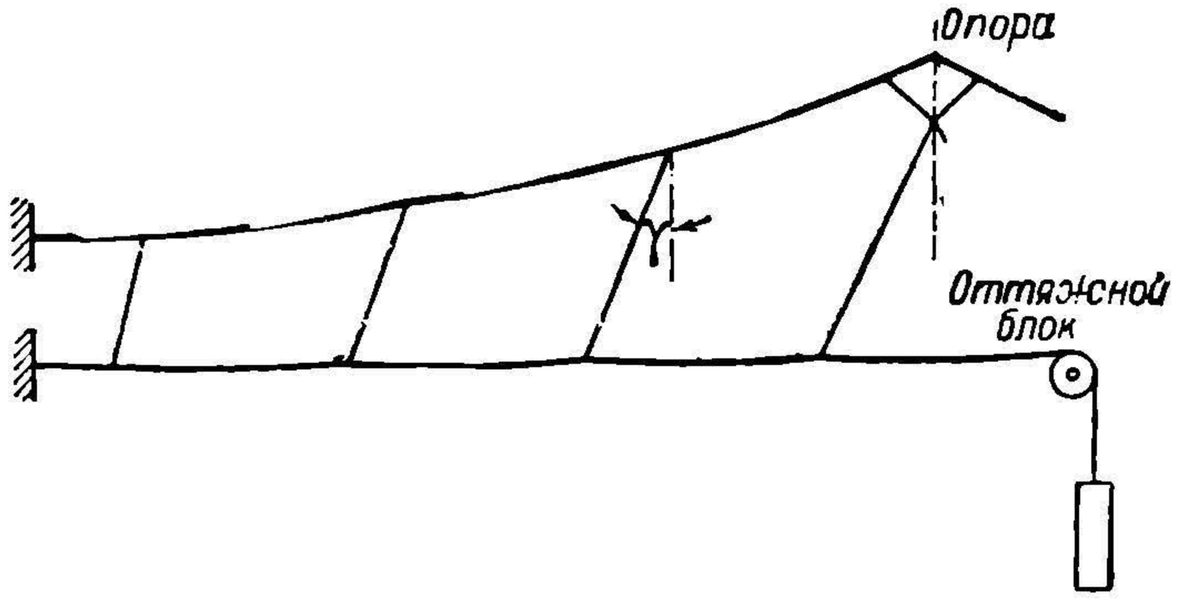


Рис. 639. Схема искажения положения струн при понижении температуры.

$$H_2 = 1{,}026\,\frac{B}{pQ_к\sqrt{H}}\ \text{kg}. \qquad (527)$$

Следующая причина дополнительных напряжений в контактной системе—искажение ее при изменении температуры. Этот тип напряжений имеет место только в цепных подвесках. Правильное взаимное положение контактного провода и опорного троса получается только при какой-либо одной температуре. В этом состоянии струны занимают отвесное положение, и практически от них на трос и контактный провод не передается никаких горизонтальных усилий. При простых эластичных подвесках искажения, главным образом, возникают, когда провод и трос выполнены из разных материалов. При системах с автоматическим натяжением одного контактного провода искажение струн сказывается особенно сильно. При изменениях температуры происходят большие перемещения контактного провода по отношению к тросу. Струны занимают наклонное положение. При повышении температуры струны наклоняются в сторону грузового компенсатора, при ее понижении—в сторону места закрепления провода, находящегося посредине расстояния между местами грузов. При всех режимах работы напряжение в контактном проводе между последней струной и местом грузового компенсатора остается без изменения. Начиная же от последней струны, напряжение между струнами в последующих пролетах начинает изменяться. Наибольшее изменение напряжения, очевидно, получается в пролете, примыкающем к точке крепления провода. Легко сообразить, что при понижении температуры (рис. 639) напряжение в контактном проводе изменяется в сторону его увеличения. При повышении же температуры струны принимают обратный наклон, что, наоборот влечет за собою уменьшение напряжения в пролетах контактного провода.

Теперь необходимо ответить на вопрос, от каких факторов зависят величины изменения напряжения в проводе при искаженном положении струн. Главный эффект получается от температурного удлинения. Вторым фактором является изменение стрелы провеса провода. Третьим—упругость провода, вызывающая в нем при всяком изменении его длины соответствующее изменение напряжения. Влияние последних двух факторов относительно невелико, особенно последнего. Проф. Минов, исследовавший данный вопрос, определяет ошибку при пренебрежении им приблизительно в 1% (Л. 270). От пренебрежения вторым фактором ошибка получается больше, порядка 5—6%. В виду большого количества допущений, неизбежных при анализах подобного рода процессов, вторым и третьим фактором можно пренебречь. Тогда изменение нагрузки в контактном проводе можно

НТБ УИИГТ (ДИТ)

обосновать таким образом. Прежде всего, путь точки A крепления струны к проводу, совершаемый под влиянием понижения температуры, может быть для любого пролета определен из рис. 640 на основании равенства:

$$\Delta l_к = \alpha \tau l_к,$$

где τ — изменение температуры и $l_к$ расстояние точки A от точки крепления.

Угол наклона струны $\gamma_к$ находится из AA_0B_0:

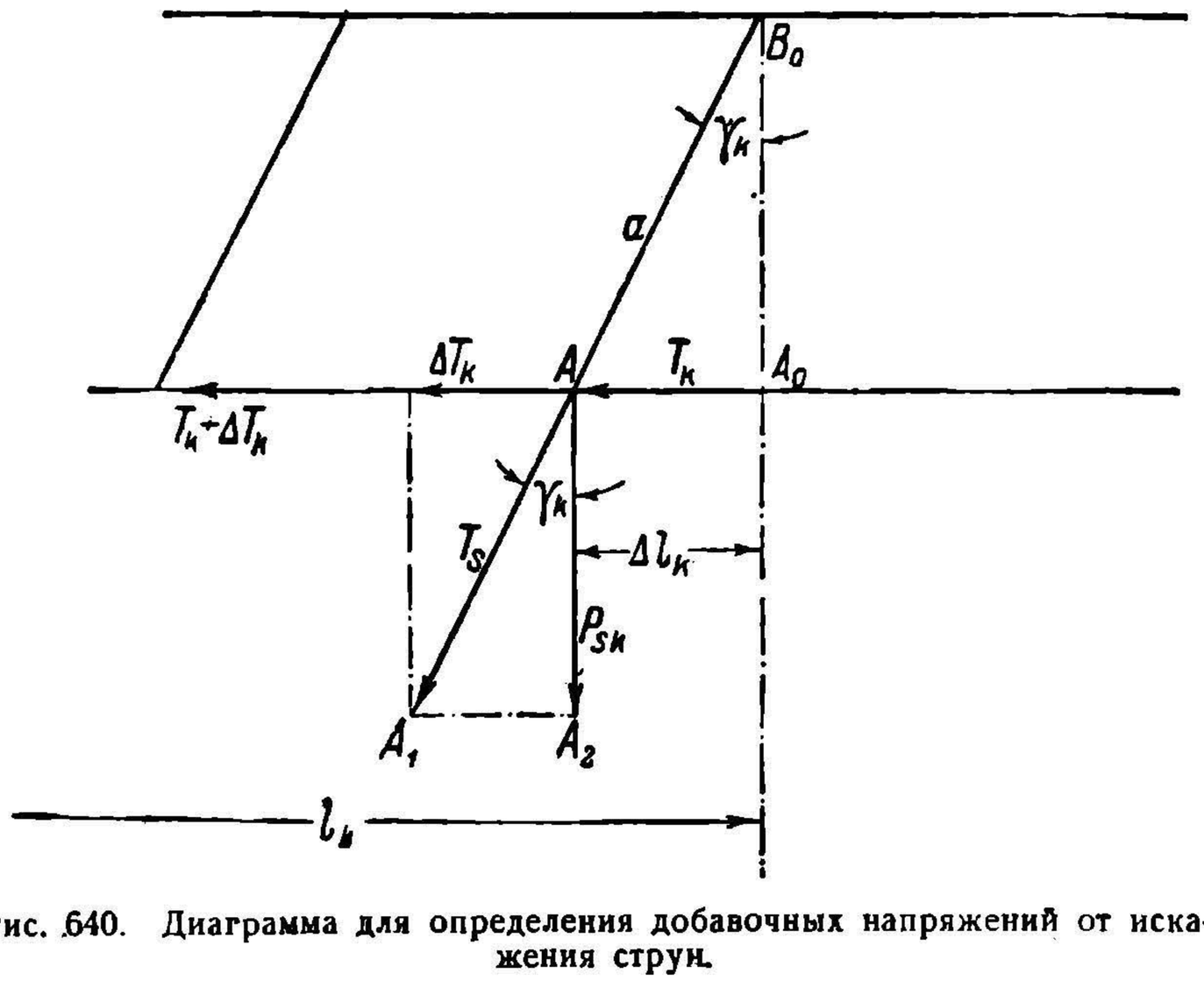


Рис. 640. Диаграмма для определения добавочных напряжений от искажения струн.

$$\sin \gamma_к = \frac{\alpha \tau l_к}{a}$$

Согласно рис. 640, сила T_s, действующая вдоль струны в зависимости от наклона струны, дает две составляющие. Первая составляющая $P_{sк}$ представляет собой силу веса, приходящуюся на рассматриваемую струну. Она не зависит от положения струны. Вторая составляющая $\Delta T_к$ всецело зависит от положения струны. Действуя по линии провода, она и производит из-за наклона струны изменение тяжения в проводе. Из схемы рис. 640 следует, что при переходе от каждого предыдущего пролета между струнами к последующему тяжению в проводе изменяется на соответствующую величину ΔT. Значение такого изменения напряжения можно определить для любого пролета $к$ из $\triangle\triangle$ типа AA_1A_2:

$$\Delta T_к P_{sк} = \operatorname{tg} \gamma_к. \qquad (528)$$

Наибольшее изменение напряжения, как уже отмечалось, должно получиться в пролете, примыкающем к точке крепления провода. Если начать анализировать изменения напряжения от пролета, примыкающего к пункту грузового компенсатора, и дойти до последнего пролета, то, очевидно, изменение напряжения в последнем должно равняться сумме всех ΔH, соответствующих ΔT:

$$\Delta H_{max} = \frac{1}{Q_к} \sum_{к=n}^{к=1} P_{sк} \operatorname{tg} \gamma_к. \qquad (529)$$

Для хорошей работы подвески нельзя допускать чрезмерных величин углов γ. Обычно не рекомендуется допускать $\sin \gamma$ выше 0,4—0,5. Если эти значения оказываются превзойденными, то приходится отказываться от глухих струн и переходить на струны скользящие или петлеобразные.

Нужно еще раз указать, что вопрос о дополнительных напряжениях в контактном проводе представляет из себя задачу трудно разрешимую. По этой причине на все формулы, выведенные для учета жесткости материала проводов, давления токоприемников и влияния искажения системы следует смотреть, как на очень приближенное решение затронутого вопроса, требующего дальнейшего уточнения и проверки. Этим объясняется, почему с указанными дополнительными напряжениями при практических расчетах обычно пока не считаются.

6. Общая постановка вопроса о расчете опор и поперечных креплений.

При расчете опор контактных систем приходится оперировать с общими законами сопротивления материалов и основ инженерных сооружений. В расчетах приходится различать опоры анкерные и промежуточные. Согласно нормам анкерные

НБ УДУНТ (ДІІТ)

опоры по большей части рассчитываются на обрыв всех проводов пролета. В отношении промежуточных опор нормально допускается производить расчет без учета обрыва проводов. При расчете опор основные напряжения обусловливаются преимущественно изгибающими моментами. Однако, в некоторых случаях, главным образом при консольных системах, приходится считаться и с моментом кручения. В случаях точных расчетов производится учет влияния упругости опор, а также влияние необорванных проводов. И тот и другой учет уменьшает напряжения в опорах. Рационально также считаться с влиянием поворота кронштейнов опор, особенно в тех случаях, когда применяются поворотные их системы. Благоприятно также действует на работу опор наклон подвесных изоляторов при обрыве проводов. Расчет кронштейнов опор производится по общим правилам строительной механики. Несколько труднее рассчитывать гибкие поперечины (рис. 610). Особенно затрудняется вопрос при учете в них горизонтальных составляющих усилий. Фундаменты для опор рассчитываются с помощью методов, применяемых вообще при расчете опор.

Монтаж контактных систем производится в таком порядке. После путевых изысканий и составления предварительного проекта с выявлением габаритов делается предварительная разбивка опор с учетом искусственных путевых и станционных сооружений. После этого составляется рабочий проект. При составлении последнего необходимо строить монтажные кривые, из которых было бы видно, какие нужно давать стрелы провеса при температуре, имеющейся в момент монтажа. Монтаж начинается с установки опор и сооружения поперечных поддерживающих конструкций. После этого начинают раскатывать навитый на барабан трос, предварительно закрепив его у анкерной опоры. В процессе такой раскатки трос подвешивается к опорам временно на блоках. После этого к тросу также пока на временных крючках подвешивается контактный провод, который скрепляется с фиксаторами. Далее регулируется натяжение троса, причем контактный провод анкеруется к тросу в середине анкерного пролета, а к компенсаторам—по концам его. В заключение ставятся изоляторы и струны, размер которых определяется согласно рабочему монтажному плану и промером стрел провеса на месте. Вместо указанного способа монтажа иногда ведут подготовку всей системы троса и контактного провода на земле вдоль полотна и затем всю систему целиком подвешивают к опорам, анкеруют и крепят к фиксаторам.

При монтаже контактной системы широко пользуются специальными подвижными вышками. Часто для монтажа применяют специальные рабочие поезда, оборудованные кранами и башенными вагонами.

III. ВОЗВРАТ ТОКА ОТ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА.

1. Общая теория блуждающих токов при тяге на постоянном токе.

Для возврата тока от подвижного состава на станцию или подстанцию почти всегда утилизируются ходовые рельсы. Конечные зажимы электрических цепей подвижного состава присоединяются к металлическим частям, и затем ток через колеса передается в рельсы, откуда в определенных пунктах отводится или, как говорят, отсасывается на подстанции.

Главные затруднения, которыя приходится преодолевать при возврате тока по ходовым рельсам, обусловлены тем, что рельсы не изолированы от земли. Поэтому земля представляет собой как бы сопротивление, шунтирующее рельсы. В результате рабочий ток разветвляется. В большей своей части он идет по ходовым рельсам, но частично идет и по земле, отходя на большее или меньшее расстояние от пути. Отсюда эти токи и получили название блуждающих токов. В отдельных случаях блуждающие токи могут достигать очень больших значений, доходя до 50—60% от общего тока. При течении токов по рельсам на всем протяжении рельсового пути происходит непрерывно обмен токами между землею и рельсами. В зависимости от разности потенциалов между землею и рельсами ток или отводится в землю, или же, наоборот, возвращается в рельсы.

Картина блуждающих токов зависит от типа нагрузки рабочей сети. На рис. 641 изображено их распределение для случая нахождения одного вагона на линии, питаемой с одной стороны. Характерно, что при таких условиях выход токов в почву происходит не только на участке *ab*, но и на участке *bc*, находящемся за поездом.

НБ УГУНТ (ДІІТ)

Таким же самым образом может оказаться, что возвращение токов в рельсы будет иметь место не только на том же участке *ab*, но и на участке рельсов, находящемся влево от отсасывающего пункта. Токи на этом участке будут зависеть от того, находятся ли на нем поезда или их нет. На рис. 641 предположено, что на нем никаких нагрузок не имеется. Если бы этот участок имел такую же нагрузку, как и рассматриваемый *ab*, то токи последнего не заходили бы влево за пункт *a*, а все возвращались бы в пределах *ab*. При неравенстве же нагрузок смежных рельсовых участков блуждающие токи одних из них будут заходить в другие. Более нагруженные будут передавать токи в менее нагруженные. Ввиду сложности и разнообразия возможных распределений токов по смежным участкам рельсового пути в дальнейшем изучение данного вопроса будет производиться, исходя из предположения, что выход и вход блуждающих токов происходит только на путях между поездом и отсасывающими пунктами, как это и было сделано первым исследователем блуждающих токов Michalke (Л. 265).

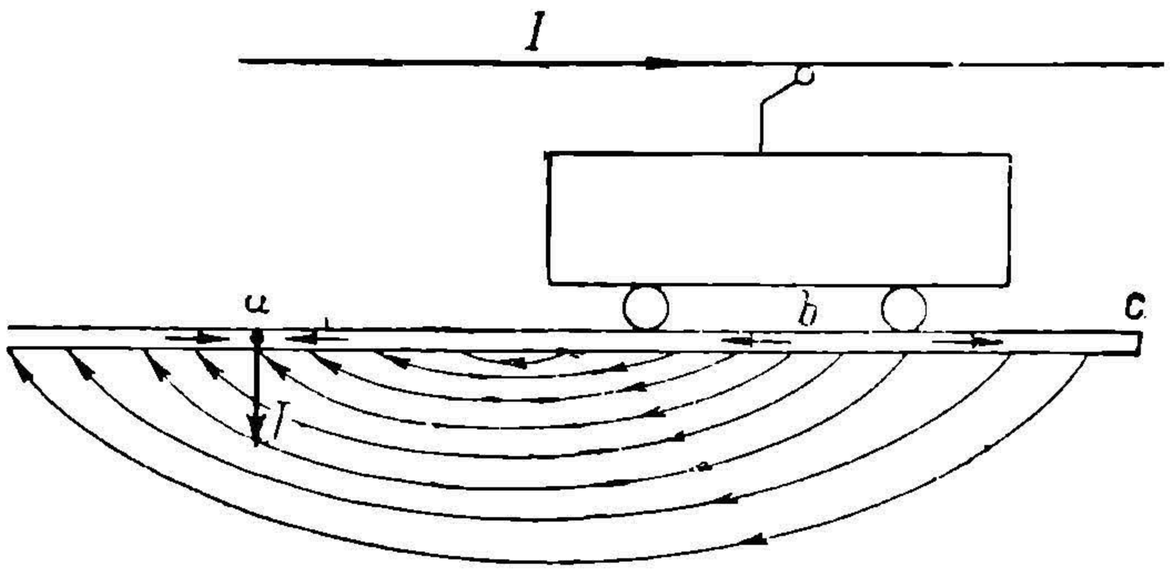


Рис. 641. Картина течения блуждающих токов.

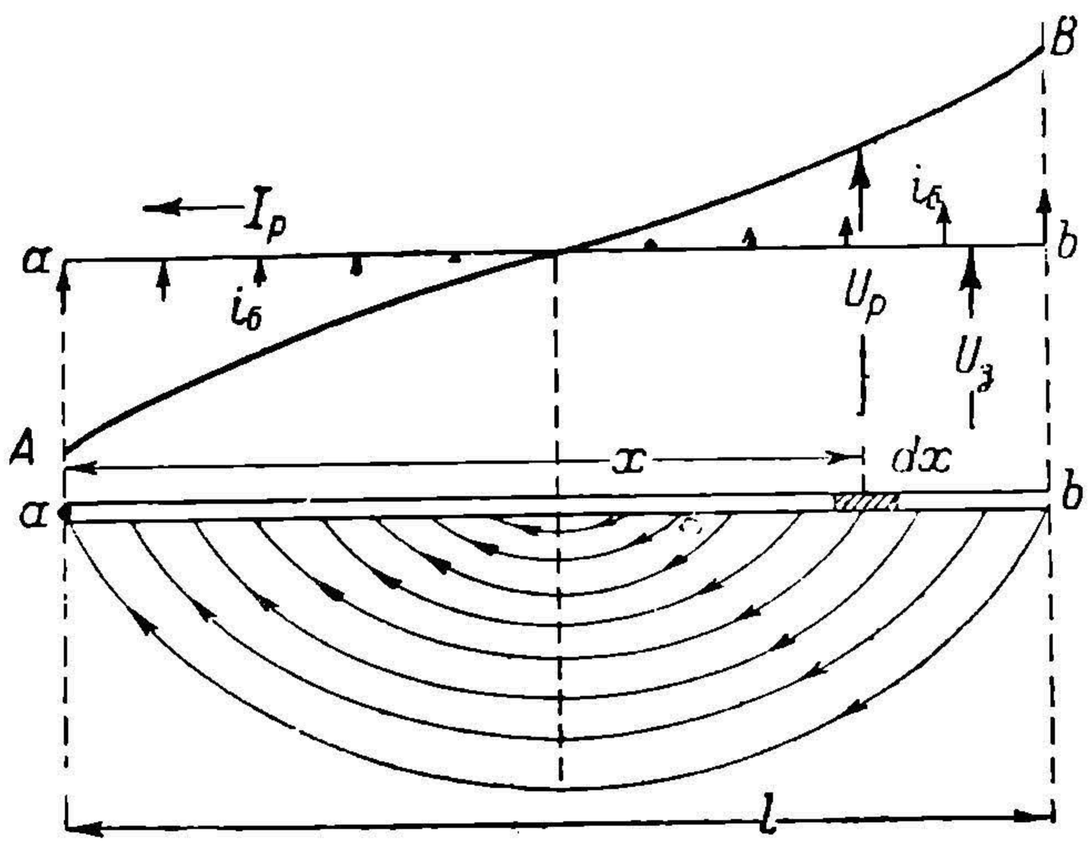


Рис. 642. Эквивалентная схема действия блуждающих токов.

Для вывода основных уравнений блуждающих токов прежде всего будет взят участок пути с односторонними питанием и отсасыванием рис. 642. Рассматриваться вопрос будет, исходя из предположения, что потенциал земли остается постоянным. При таком условии обмен токами между рельсами и почвой должен зависеть от величины потенциала рельсов, который в зависимости от величины падения напряжения в последних изменяется по некоторой кривой *AB* (рис. 642). На участках, где потенциал рельсов U_p больше потенциала земли $U_з$, токи выходят из рельсов в землю. В тех же местах, где $U_p < U_з$, токи, наоборот, возвращаются в рельсовый путь. Для любой точки рельсов величина тока, отходящего в землю на элементарном участке *dx*, зависит от разности рельсового и земного потенциалов в этом месте, а также от переходного сопротивления между рельсами и землею. В дальнейшем переходное сопротивление будет относиться к единице длины пути (к одному километру) и будет обозначаться через $r_п$. При принятых обозначениях и допущениях элементарная величина тока $di_б$ выходящая из рельсов или входящая в них, может быть выражена уравнением:

$$di_б = U_p - U_з) \frac{dx}{r_п}$$

или

$$\frac{di_б}{dx} = \frac{U_p - U_з}{r_п} \quad .$$

Вторая производная данного выражения при $U_з = \text{const}$ равна:

$$\frac{d^2 i_б}{dx^2} = \frac{dU_p}{dx} \frac{1}{r_п} \quad .$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Общий ток I, поступающий из контактного провода и возвращающийся целиком к отсасывающему пункту, очевидно, в каждом данном участке пути должен равняться сумме рельсового тока и тока утечек:

$$I = i_p + i_б, \tag{531}$$

а отсюда при $I = \text{const}$:

$$di_p = -di_б \tag{532}$$

Это равенство показывает, что всякому изменению рельсового тока соответствует противоположное изменение тока утечки. Выше было отмечено, что изменение потенциала рельсов определяется падением в них напряжения. Для каждого элементарного участка dx, закон изменения рельсового потенциала может быть определен выражением:

$$dU_p = + i_p r_p dx$$

или

$$\frac{dU_p}{dx} = -i_p r_p. \tag{532}$$

Здесь r_p — сопротивление единицы длины (одного km) рельсового пути. Знак минус в формуле (533) взят потому, что увеличение падения напряжения вызывает уменьшение потенциала, и обратно.

На основании сопоставления равенств (530) и (533) составляется следующее основное уравнение для тока в рельсах:

$$\frac{d^2 i_p}{dx^2} - \frac{r_p}{r_n} i_p = 0.$$

Его интеграл:

$$i_p = C_1 e^{x\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} + C e_2^{x\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}. \tag{534}$$

Постоянные C_1 и C_2 определяются из следующих соотношений:
при $x = 0$:

$$i_p = I \quad \text{и} \quad C_1 + C_2 = I;$$

при $x = l$:

$$i_p = I \quad \text{и} \quad C_1 e^{l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} + C_2 e^{l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} = I.$$

Решение двух уравнений относительно C_1 и C_2 дает:

$$C_1 = \frac{I}{1 + e^{l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}} \text{ и } C_2 = \frac{Ie^{l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}}{1 + e^{l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}}.$$

Отсюда основное уравнение для рельсового тока:

$$i_p = \frac{I}{1 + e^{l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}} \left(e^{x\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} + e^{(l-x)\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} \right). \tag{535}$$

То же самое выражение для блуждающих токов, на основании равенства (531) и (535):

$$i_б = I \left[1 - \frac{1}{1 + e^{l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}} \left(e^{x\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} + e^{(l-x)\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} \right) \right]. \tag{536}$$

Выражения (535) и (536) дают возможность установить значения токов в рельсах и токов утечек для любого текущего значения x. Чтобы получить более ясное представление о блуждающих токах и их распространении по окружающей почве можно выражение (536) разложить в ряд:

$$i_б = I \frac{l - x}{2} x \frac{r_p}{r_n} \left(1 - \frac{l^2}{4} \frac{r_p}{r_n} + \dots \right).$$

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Пренебрегая ввиду относительно небольших значений $\frac{r_p}{r_n}$ вторым членом в скобках, можно получить:

$$i_б = \frac{I(l-x)x}{2}\frac{r_p}{r_n}. \tag{537}$$

Очевидно, что наибольшее значение блуждающих токов при сделанных допущениях получается при $x = \frac{l}{2}$:

$$i_{б\,max} = \frac{Il}{8}\frac{r_p}{r_n}. \tag{538}$$

При движении поезда величины l будут, естественно, изменяться. В соответствии с этим изменяются и токи утечек.

В случае двухстороннего питания рабочей сети все приведенные соображения остаются в силе (рис. 643). Разница заключается только в том, что здесь общий ток распределяется по двум направлениям, давая составляющие I_1 и I_2. По общему правилу при пренебрежении влиянием на их величины земли, как шунта рельсов:

$$I_1 = I\frac{l-l_x}{l} \quad \text{и} \quad I_2 = I\frac{l_x}{l}. \tag{539}$$

Для каждой составляющей I_1 и I_2 справедливы все те выводы, которые только что были сделаны для тока I при одностороннем питании.

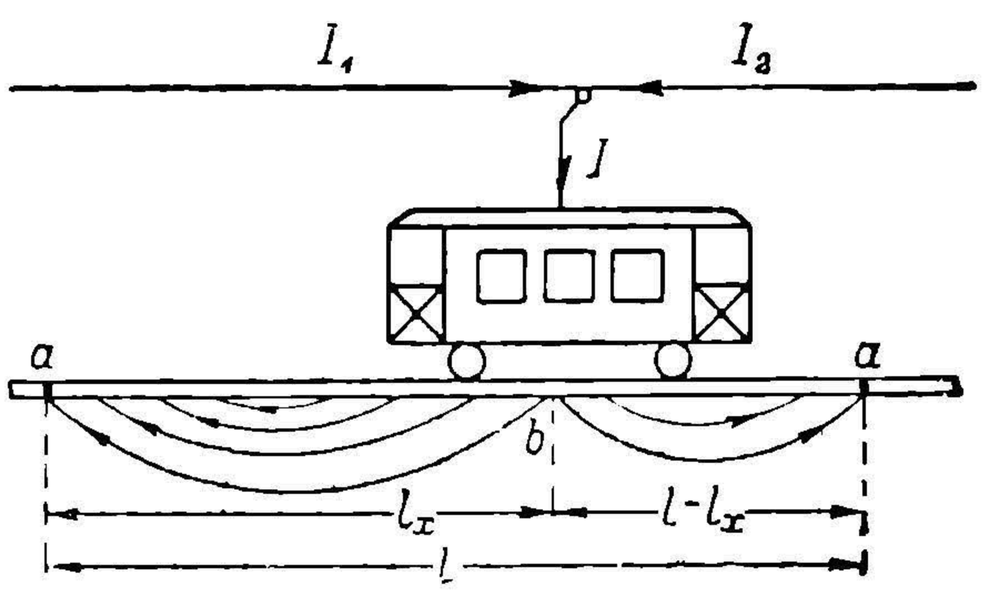


Рис. 643. Распределение блуждающих токов при двухстороннем отсасывании.

Когда между отсасывающими пунктами находится несколько поездов, картина блуждающих токов значительно осложняется и требует каждый раз особого анализа. При очень большом количестве поездов влияние взаимного их перемещения на блуждающие токи понижается. В таких случаях представляется возможным при подсчетах этих токов исходить из нагрузки, равномерно распределенной по линии. Практически случай большого количества поездов встречается особенно часто в условиях городских электрических железных дорог, где с блуждающими токами приходится особенно считаться. Ввиду указанного рационально дать анализ блуждающих токов при равномерно распределенной нагрузке.

При такой нагрузке ток в каждой точке пути, отстоящей от отсасывающего пункта на x, определяется выражением:

$$i_p = I_n\frac{l-x}{l} - i_б. \tag{540}$$

Здесь I_n общий ток, идущий от питательного пункта на весь рассматриваемый участок пути, длиною l, причем l при одностороннем питании — длина всего участка пути от отсасывающего пункта до конца, а при двухстороннем отсасывании — половина расстояния между отсасывающими пунктами. Вторая производная данного уравнения равна:

$$\frac{d^2i_p}{dx^2} = -\frac{d^2i_б}{dx^2}.$$

Так как для разбираемого случая, как и для первого, справедливы выражения (530) и (531), то дифференциальное уравнение для тока i_p здесь имеет такой же вид, что и уравнение (534). Разница заключается только в значениях постоянных C_1 и C_2. Последние должны для данного случая определиться из условия:

при $x = 0$, $\quad i_p = I_n$

при $x = l$, $\quad i_p = 0$.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

Таким же образом, как и в предыдущем случае, путем подстановки для C_1 и C_2 значений, определяемых из последних выражений, основное уравнение при равномерно распределенной нагрузке получается в виде:

$$i_p = I_n \frac{e^{(l-x)\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} - e^{-(l-x)\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}}{e^{l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} - e^{-l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}}. \qquad (541)$$

Разложение данного выражения в ряд при пренебрежении членами высшего порядка дает для i_p формулу:

$$i_p = I_n \frac{l-x}{l} \frac{6\frac{r_n}{r_p} + (l-x)^2}{6\frac{r_n}{r_p} + l^2}. \qquad (542)$$

Для тока же утечки на основании равенства (540):

$$i_6 = I_n \frac{l-x}{l} \frac{2lx - x^2}{6\frac{r_n}{r_p} + l^2}. \qquad (543)$$

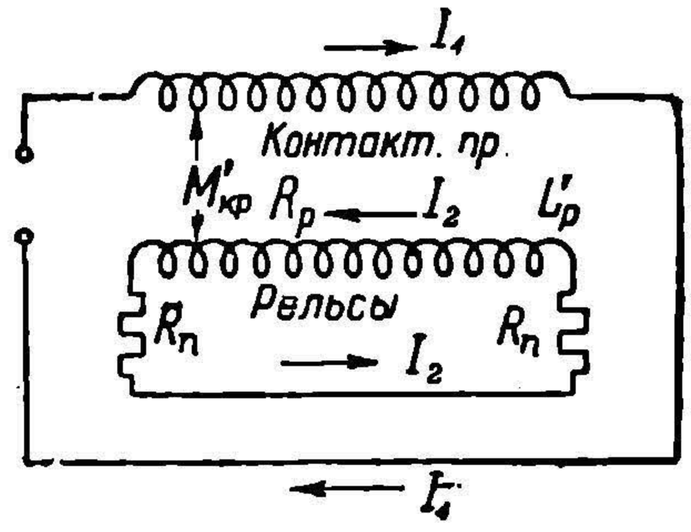


Рис. 644. Эквивалентная схема течения блуждающих токов при однофазном токе.

Согласно общему правилу нахождения максимума, на основании выражения (543) наибольшее значение тока утечки получается при равенстве:

$$x = (1 - {}^1/_3\sqrt{3})\, l. \qquad (544)$$

Данное выражение показывает, что при равномерно распределенной нагрузке место наибольшей интенсивности блуждающих токов при одном и том же l лежит ближе к отсасывающим пунктам, чем при нагрузке сосредоточенной.

2. Блуждающие токи при однофазной тяге.

Такова общая картина рассматриваемого явления при постоянном токе. При переменном токе эта картина претерпевает значительные изменения, что было теоретически обосновано Pleijel'ем (Л. 297). При переменных токах приходится учитывать индуктивное взаимодействие между токами в контактном проводе и рельсах. Провод и рельсы представляют собой как бы две обмотки трансформатора. Первичной обмоткой является провод, а вторичной рельсы. Для более ясного понимания процесса рационально пока предположить, что ток из контактного провода возвращается по какому-либо бесконечно-удаленному проводнику, а рельсы предоставлены самим себе (рис. 644). При таком условии в рельсах, как во вторичной обмотке трансформатора, будет индуктироваться э. д. с. Воображаемая нами обмотка будет замыкаться через переходные сопротивления R_n, и под воздействием э. д. с., возникаемой в рельсах, через землю пойдет ток I_2. По общему закону трансформации соотношение между токами должно подчиняться условию:

$$j\omega M'_{кр} \dot{I}_1 = -(R_p + R_n + j\omega L'_p)\, \dot{I}_2. \qquad (545)$$

В данном уравнении $M'_{кр}$ обозначает коэфициент взаимоиндукции между контактным проводом и рельсами, R_p и L'_p активное сопротивление и коэфициент самоиндукции рельсов, а R_n сопротивление, эквивалентное общему переходному сопротивлению от рельсов в землю. Соотношение между токами I_1 и I_2 можно написать и в другой форме:

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2 + \dot{I}_a. \qquad (546)$$

Это равенство показывает, что в каждый данный момент первичный ток I_1 состоит из тока намагничивания I_a и тока $-I_2$, компенсирующего эффект магнитодвижущей силы вторичной обмотки. Соотношение между токами I_1 и I_2 определяется выражением:

$$\frac{-\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = K_э = \frac{j\omega M'_{кр}}{R_p + R_n + j\omega L'_p}. \qquad (547)$$

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Из данной формулы видно, что соотношение между токами I_1 и I_2 зависит от параметров цепи. В частности, чем меньше переходное сопротивление $R_п$, тем ближе друг к другу величины этих токов.

Если теперь перейти от рассмотренного нами случая к случаю, при котором ток контактного провода возвращается по рельсам, то картину распределения токов здесь можно уподобить картине, представленной на рис. 645. В этом случае составляющая первичного тока $-I_2$ в рельсах находит себе продолжение в рельсовом токе I_2. Ток же намагничивания I_a, поступая в рельсы, частично направится по ним, а частично по окружающей почве, разделяясь на составляющие I'_a и I''_a.

Очень интересно проанализировать, как действует на рассматриваемый процесс расстояние поезда от отсасывающего пункта l. При его возрастании параметры $M'_{кр}L'_p$ и R_p растут пропорционально l, а $R_п$ наоборот уменьшается. Ввиду этого согласно формуле (547) ток I_2 начинает приближаться по своей величине к I_1. При достаточно больших l, по данным Forwald'a порядка 18—20 km, дальнейшее увеличение этого расстояния почти не отзывается на соотношении токов I_1 и I_2. Вместе с тем при таких значениях ток намагничивания I_a благодаря малым значениям переходного сопротивления почти целиком переходит в землю.

Нарисованная картина блуждающих токов основана на приближенном рассмотрении данного процесса. Для уяснения последнего в коэфициент K было введено эквивалентное переходное сопротивление $R_п$. В действительности, однако, влияние переходного сопротивления проявляется в значительно более сложной форме. Попытки более точного теоретического обоснования движения тока по рельсам сделали Benda и Voigtländer (Л. 296), руководствуясь изысканиями в этой области Pollaczek'a и Klewe.

Как и при предыдущей трактовке вопроса, Benda и Voigtländer мыслят ток в рельсах состоящим из двух составляющих I_2 и I'_a. По длине пути эти токи изменяются. Если по принципу эквивалентности, заменить эти токи постоянными, как бы не меняющими своей величины по длине пути, то они представляются авторами в виде

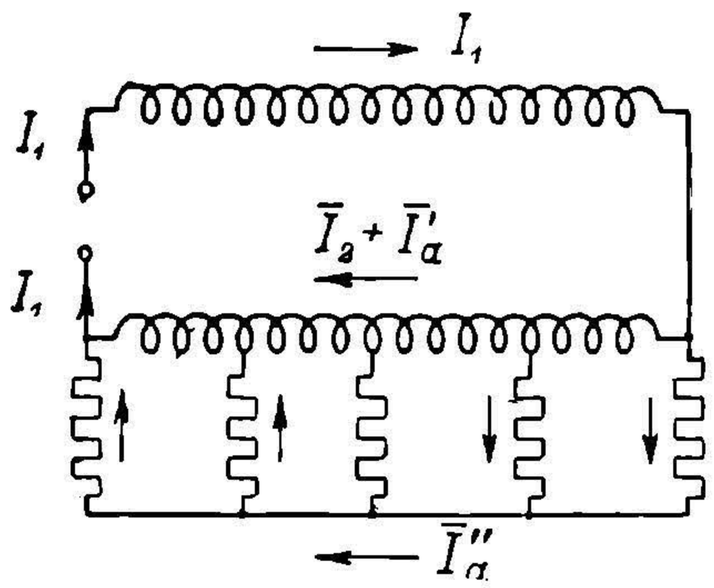


Рис. 645. Эквивалентная схема течения блуждающих токов по рельсам и в почве при однофазной системе тяги.

$$\dot{I}_2 = -\dot{I}_1 K\left(1 - \frac{1-e^{-sl}}{Sl}\right) \tag{548}$$

и

$$\dot{I}'_a = -I_1 \frac{1-e^{-sl}}{Sl}. \tag{549}$$

При выражении r_p, $r_п$, $M_{кр}$ и $L_{кр}$ на 1 km величины K и S могут быть определены из соотношения:

$$K = \frac{j\omega M_{кр}}{r_p + j\omega L_p} \tag{550}$$

и

$$S = \sqrt{\frac{r_p + j\omega L_p}{r_п}}. \tag{551}$$

На основании (548) и (549) общий ток в рельсах можно выразить формулой:

$$\dot{I}_p = = \dot{I}_1 K - \dot{I}_1 (1-K) \frac{1-e^{-sl}}{Sl} \tag{552}$$

или кратко:

$$\dot{I}_p = \dot{I}'_p + \dot{I}''_p, \tag{553}$$

где

$$\dot{I}'_p = -\dot{I}_1 K \quad \text{и} \quad \dot{I}''_p = -\dot{I}_1 (1-K) \frac{1-e^{-sl}}{Sl}.$$

Рассмотрение выражения (552) приводит к тому же заключению, что и анализ формулы (547). При увеличении l ток в рельсах стремится сделаться равным току $-I_1 K$, т. е. в данном случае рельсовый ток получается исключительно вследствие трансформаторного действия контактного провода на рельсы.

Очень важно уяснить себе, что происходит при такой картине распределения токов с падением напряжения в рельсовой сети. Если бы взять идеальный случай,

НБ УПУНТ (ДІТ)

когда $R_n = 0$, и ток I_a сразу переходил бы в землю, то тогда, несмотря на наличие в рельсах тока I_2, не было бы никакого падения напряжения в рельсовой сети. Объясняется это тем, что при данных условиях падение напряжения в рельсах от тока I_2 компенсируется э. д. с., индуктируемой контактным проводом в рельсах, как во вторичной цепи трансформатора, замыкаемого накоротко. При условии $R_n = 0$ и мгновенного перехода в землю тока I_a падение напряжения и от него должно быть равно нулю.

В действительных условиях, конечно, нет полного совпадения с разобранным идеальным случаем. Однако, получается достаточно близкое к нему приближение. Ряд опытов, произведенных на однофазных железных дорогах Германии и Швеции, показал, что падение напряжения в рельсах регулярно получается значительно ниже того, какое должно было бы наблюдаться, если бы исходить из обычного расчета его по току, который измерялся в рельсах (Л. 299).

Как видно из приведенных формул, основной величиной, влияющей на блуждающие токи, является переходное сопротивление от рельсов в почву. Величина его зависит от большого количества самых разнообразных факторов. Здесь приходится учитывать типы путей, шпал, балласта и состав окружающей почвы. Для трамвайных путей с утопленными в почву рельсами переходные сопротивления получаются значительно меньше, чем для дорог на собственном полотне. По американским данным эти сопротивления для трамваев колеблются чаще всего в пределах от 0,07 до 0,5 Ω/km при среднем значении около 0,2 Ω/km. Для дорог с собственным полотном приведенные значения повышаются до 0,8—5 Ω/km, причем применение щебенчатого балласта способствует приближению к верхнему пределу. Влажная погода понижает сопротивление.

Выше было отмечено, что при всех приведенных выкладках пренебрегалось сопротивлением почвы. Однако, в действительности почва несомненно должна оказывать известное влияние на блуждающие токи. Важно отметить, что сама по себе почва обладает большим удельным сопротивлением. В зависимости от ее состава оно колеблется в пределах от 200 до 30000 Ω/m.mm² при среднем значении около 1000—5000 Ω/m.mm². В отдельных случаях эти сопротивления достигают колоссальных цифр, доходя до нескольких миллионов ом на m.mm². Степень влажности почвы до предела ее насыщения влагой понижает сопротивление. После насыщения влага практически не оказывает влияния. Понижение температуры резко увеличивает сопротивление. Так, например, по американским данным при переходе от 18°C к —18°C сопротивление почвы возрастает почти в 200 раз.

Какой процент составляют блуждающие токи от общего рабочего тока? Если подсчитать его для трамвайных условий движения при средних параметрах $r_p = 0{,}02$ и $r_n = 0{,}2$ Ω/km, то при $l = 3$ km блуждающие токи в наиболее опасном месте, согласно формуле (543), составляют 10—11%. В условиях магистральных железных дорог при больших значениях l блуждающие токи очень часто достигают значительно бо́льших значений. По опытам шведских и французских железных дорог они доходят иногда до 50% и даже 60%, причем до настоящего времени нельзя считать окончательно выясненным вопрос, как сказывается многопутность дорог на блуждающих токах. Пока не имеется определенных данных, показывающих, каким образом при переходе от однопутной железной дороги к многопутной изменяется переходное сопротивление. В большинстве случаев считают, что величина его уменьшается пропорционально числу путей. Однако, в американской практике существует и другая точка зрения, на основании которой, например, при переходе от однопутной железной дороги к двухпутной, при увеличении рабочего тока в два раза блуждающие токи принимаются возрастающими всего только на 50%. В качестве некоторого обоснования указанного, приводится табл. 85, содержащая опытный материал дороги N.H.H.R. Несмотря, однако, на этот материал, вопрос о влиянии многопутности на блуждающие токи требует дальнейшего исследования.

ТАБЛИЦА 85.

Данные о блуждающих токах.

Число путей	1	2	4
Число контактных проводов	1	2	4
Число рельсов	2	4	8
Токи утечки в % от общего тока	60	42	25

НТБ УИИНТ (ДІІТ)

3. Электролитический эффект блуждающих токов.

Явление блуждающих токов, несмотря на то, что оно несколько понижает падение напряжения, во многих отношениях весьма нежелательно. Даже больше, очень часто приходится принимать особые меры для предотвращения или, по крайней мере, ослабления этого явления. Вред, приносимый блуждающими токами, двоякий. Прежде всего они могут влиять на установки слабых токов, проходя в большей или меньшей степени по электрическим цепям этих установок, имеющих очень часто незаземленные провода.

Еще большее зло причиняют блуждающие токи, заходящие в газовые трубы и в кабели электрических сетей. Прохождение токов через трубы и освинцованные оболочки кабелей сопровождается по большей части электролитическим процессом. При наличии блуждающих токов получается грандиозный вольтаметр, у которого электроды составляются из труб, кабелей и рельсов, причем такой вольтаметр по большей части разбивается на целый ряд отдельных элементов, включенных последовательно, один за другим. Электролитом здесь является почвенная влага, содержащая всегда те или другие соли и кислоты. Из теории электролиза известно, что разъеданию подвергается положительный электрод. Поэтому и в разбираемом случае разъедаться будут положительные электроды, и притом в тех местах, где ток у них переходит в электролит, т. е. в данном случае в почву. Таким образом, опасные места — это места выхода тока.

В количественном отношении электролитический процесс может быть учтен с помощью основной электрохимической формулы:

$$M = \beta I t \; g \qquad (554)$$

Здесь β — электрохимический эквивалент, который может быть выражен через:

$$\beta = c \frac{A}{n},$$

где A — атомный вес, n — валентность вещества и c — коэфициент, имеющий для всех веществ значение, равное:

$$c = 0{,}1036 \times 10^{-4}.$$

Пользуясь формулой (554), можно определить количество вещества, выделяемое при электролизе, и этим установить степень опасности от электролиза. Так, например, для железа $A = 55{,}9$ и $n = 2$, и на один ампер-час приходится выделение металла, равное 1,047 g ($M = 1{,}047$ g). Для свинца $A = 206{,}4$ и $n = 2$ и $M = 3{,}863$ g.

Блуждающие токи силой в один ампер могут за год, действуя непрерывно, выделить до 9,2 kg железа и до 35,5 kg свинца. Для рельсов, имеющих большую массу вещества, такое разъедание существенного значения не имеет. Для газовых труб и особенно для свинцовых частей кабелей, находящихся на пути блуждающих токов, это разъедание может иметь катастрофическое значение, приводя их быстро в негодность.

Относительно электролитического действия переменного тока можно полагать, что опасности оно не представляет. Как показали опыты Kinter'a, от такого вида блуждающих токов ни железные, ни свинцовые трубы электролитическому раъеданию не подвергаются. Опыты производились, например, при 25 V и частоте 25 Hz в течение одного года. Что же касается до возмущающего влияния на слаботочные установки, то в этом отношении блуждающие переменные токи более опасны, чем токи постоянные. Ввиду этого против проникновения их приходится применять особые меры предосторожности.

При выработке мер борьбы против электролитического действия блуждающих токов вначале придавали большее значение э. д. с. поляризации, которая, как известно, уменьшает эффект электролитического процесса, противодействуя тому напряжению, которое вызывает ток. Ввиду этого считали, что если наибольшее падение напряжения будет меньше э. д. с. поляризации (порядка 1—2 V), то особенно бояться электролиза не приходится. Однако, опыты показали (опыты Clod'a), что в условиях электролитического действия, производимого блуждающими токами э. д. с. поляризации существенного значения не имеет. При значительно меньших напряжениях, чем 1—2 V, блуждающие токи проникали в металлические части и производили разрушающее действие. Главное влияние на величину электролитического эффекта оказывает плотность тока в металлических частях. Изменение эффекта разъедания в зависимости от плотности колеблется от 50 до 110% (Collum и Logan).

НТБ УНИНТ (ДІТ)

Очень характерное явление было обнаружено Cunliff'ом. Оказывается, что интенсивность стремления блуждающих токов проникнуть в трубопроводы и кабели неодинакова по всей длине рельсового пути. Прохождение тока по земле хотя этим при выкладках часто пренебрегают, тем не менее сопровождается определенным падением напряжения. Чем выше местное сопротивление почвы, тем в большей своей части токи направляются по путям с наибольшею проводимостью, т. е. по металлическим частям, имеющим более высокую проводимость, чем земля. Cunliff обнаружил, что наибольшее падение напряжения в земле бывает в местах, прилегающих к выходу и входу токов из рельсов. В пространствах, где падение напряжения почти не обнаруживается, опасность от блуждающих токов значительно уменьшается. Конечно, для железнодорожных условий такие нейтральные зоны меняют свое место, и точно установить их нельзя, но все-таки, повидимому, они в том или другом виде существуют, и металлические части, находящиеся в них, в меньшей мере разрушаются электролизом. Особенно нужно принимать меры предосторожности на мостах, где очень часто рельсы для ослабления эффекта электролиза укладываются изолированными от металлических частей.

4. Меры борьбы с блуждающими токами.

Условиями электролитического действия блуждающих токов объясняется, почему положительный полюс машин станций и подстанций соединяют по большей части с рабочим проводом или третьим рельсом, а отрицательный — с ходовыми рельсами. Это объясняется тем, что главная опасность от блуждающих токов получается в местах выхода их из металлических частей. Если рельсы образуют отрицательный полюс, то главная масса блуждающих токов должна выходить в районах, прилегающих к пунктам присоединения отсасывающих кабелей. Благодаря этому выход токов концентрируется в определенных районах, и поэтому за ним можно внимательно следить, в случае нужды принимая меры борьбы с электролитическим действием. Если же рельсы соединить с положительным полюсом, то пункты выхода тока рассеялись бы по большим и неопределенным пространствам. Следить за блуждающими токами и принимать против них меры борьбы было бы в этом случае значительно сложнее.

Наиболее радикальной мерой борьбы против блуждающих токов является недопущение значительных падений напряжения в рельсах. Если это падение относительно невелико, то потенциалы рельсов и земли мало отличаются друг от друга, а следовательно, и блуждающие токи должны быть относительно незначительны. Возможное уменьшение падения напряжения в рельсовом пути зависит прежде всего от его сопротивления. При этом нужно очень внимательно следить за стыками, так как неисправность их особенно содействует усилению блуждающих токов.

Большое значение имеет также правильный выбор пунктов отсасывания и правильный расчет отсасывающих фидеров. Фидера необходимо стремиться рассчитывать так, чтобы пункты отсасывания были по возможности под одним потенциалом.

Для борьбы с блуждающими токами существуют в различных государствах соответствующие предписания. Весьма распространена французская норма, требующая, чтобы падение напряжения в рельсах было не выше одного вольта на каждый километр. Немецкая практика придерживается требования не превосходить нигде разницы потенциалов в рельсах 2,5 V. В СССР принята комбинация того и другого требования. Для вылетных линий берется норма 1 V/km, а для сложной сети 2,5 V. Если металлические части находятся от рельсового пути дальше, чем на 200 m, их можно считать неугрожаемыми со стороны блуждающих токов.

В некоторых случаях можно уменьшить эффект блуждающих токов, соединив трубы и кабели особым медным проводом с отсасывающими пунктами. Этим можно заставить блуждающие токи выходить из труб не через землю, а через медный провод, в результате чего электролитическое действие их будет сильно ослаблено. Такая мера носит название электрического дренажа. Прокладка медного провода параллельно пути обычно существенного значения не имеет, так как при относительно малом сопротивлении ходовых рельсов провод этот может иметь значение только при очень большой площади его поперечного сечения. Несколько более рационально прокладывать этот кабель вдоль труб и соединять с ним эти трубы посредством особых соединительных медных проводов. Отсасывающие фидера целесообразно делать изолированными, дабы по возможности уменьшить район входа

НБ УИУНТ (ДІТ)

в них блуждающих токов и этим самым уменьшить поверхность труб, с которой ток выходит в землю и которая подвергается действию электролиза. Длина неизолированных частей должна быть по возможности ограничена 1—3 m.

Для улучшения проводимости рельсового пути рельсы в местах стыков обычно снабжаются специальными электрическими соединениями (рис. 646). В большинстве случаев для них применяются медные кабели сечением 50—100 mm² со специальными головками, которые скрепляются с рельсами путем развальцовки. Вместо развальцовки иногда применяется расклепка. Основная задача при выполнении таких стыковых соединений заключается в получении по возможности чистого контакта между рельсом и головкой стыкового соединения. Появление ржавчины вызывает резкое понижение проводимости стыкового соединения. Для предохранения от ржавчины место примыкания головок к рельсам смазывают иногда специальной ртутной амальгамой. Среди методов при-

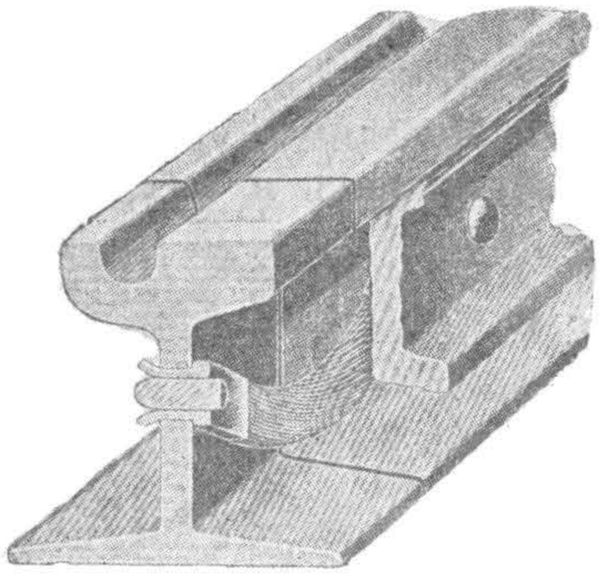


Рис. 646. Общий вид стыкового электрического соединения.

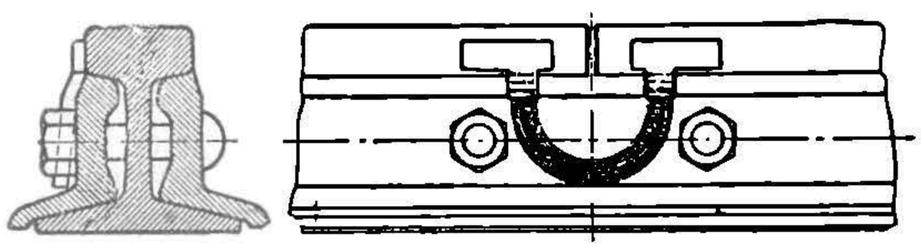


Рис. 647. Стыковое электрическое соединение с приваркой к головке рельсов.

крепления головок стыковых соединений к рельсам предпочтителен метод развальцовки. В большинстве случаев стыковые соединения помещаются под рельсовыми накладками.

Очень большое распространение теперь получили стыковые соединения, приваренные к рельсам (рис. 647). Вместо приварки соединений к головкам, иногда их ставят под накладку, приваривая к шейке рельсов. Встречаются и типы с приваркой к ножке. Преимущество приварных стыковых соединений заключается в устранении опасности от плохого контакта, а также и в том, что при них значительно сокращается длина соединительных кабелей. Заслуживают внимания опыты получения надежного контакта без применения специальных соединений, путем оцинковки стыковых накладок и примыкающих к ним рельсов. При сварных стыках никаких стыковых электрических соединений не применяют. Для более равномерного распределения токов рельсы одного и того же пути обычно соединяются через 50—100 m междурельсовыми связями. При многопутных дорогах рационально устраивать такие же связи через 150—250 m между отдельными путями. Междурельсовые и междупутные соединения выполняются чаще всего из меди или железа сечением порядка 70—100 mm².

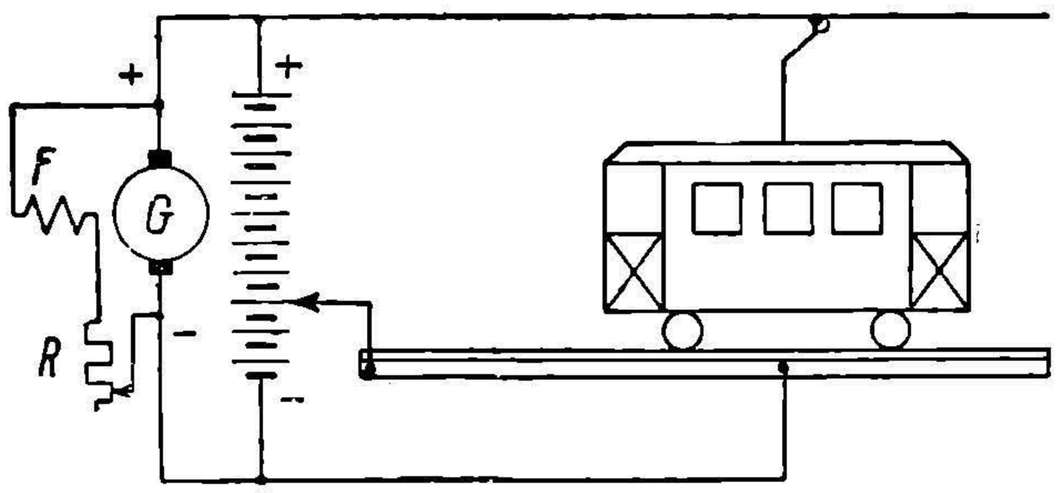


Рис. 648. Схема включения в отсасывающую систему добавочной э.д.с. для борьбы с блуждающими токами.

В некоторых случаях борьба с блуждающими токами вынуждает включать на подстанциях в отсасывающие фидера для выравнивания потенциала в пунктах отсасывания регулировочные реостаты, а иногда и добавочные э.д.с. Из последних систем нужно указать прежде всего на бустерную систему. Бустера довольно широко применяются в практике. Они представляют собой включаемые в отсасывающие фидера небольшие низковольтные слабо насыщенные динамомашины с последовательным возбуждением, приводимые в движение специальными электродвигателями. Назначение их — автоматически с увеличением нагрузки выравнивать потенциал отсасывающих пунктов и тем самым уменьшать интенсивность проникновения токов в землю.

Чтобы блуждающие токи вынуждены были переходить из рельсов, минуя почву прямо в отсасывающий фидер, можно применить схему рис. 648. Вариантом такой

НВ УДУНТ (ДІІТ)

схемы является приведенная на рис. 649, в которой, благодаря включенной батарее, блуждающие токи вынуждаются выходить из трубопроводов не в землю, а по медному проводу прямо к отсасывающему пункту. Так как электролиз происходит при выходе токов из металлических частей в почву, то схемы рис. 649 должны ослаблять электролитический эффект.

Очень хорошие результаты были получены от системы, примененной в Карлсруэ (рис. 650). Здесь была взята специальная небольшая добавочная машина *m*, один из зажимов которой был соединен с трубами, а другой — с особыми электродами, заложенными в землю в районе угрожаемых трубопроводов и выполненными из старых газовых труб или рельсов. Добавочная машина так возбуждалась, чтобы потенциал электродов был больше потенциала труб. Тогда ток, попавший в трубы, под действием добавочной э. д. с. в большей своей части не шел в землю, а проходя по цепи *aa*, направлялся через электроды прямо к отрицательному полюсу основного генератора *G*. Благотворное действие этой системы уже сказывалось, когда потенциал электродов превышал потенциал труб всего лишь на 3—5 V. Для защиты 2 × 100 m труб требовалась мощность всего только в 110 W при 10 вольтах и 11 амперах.

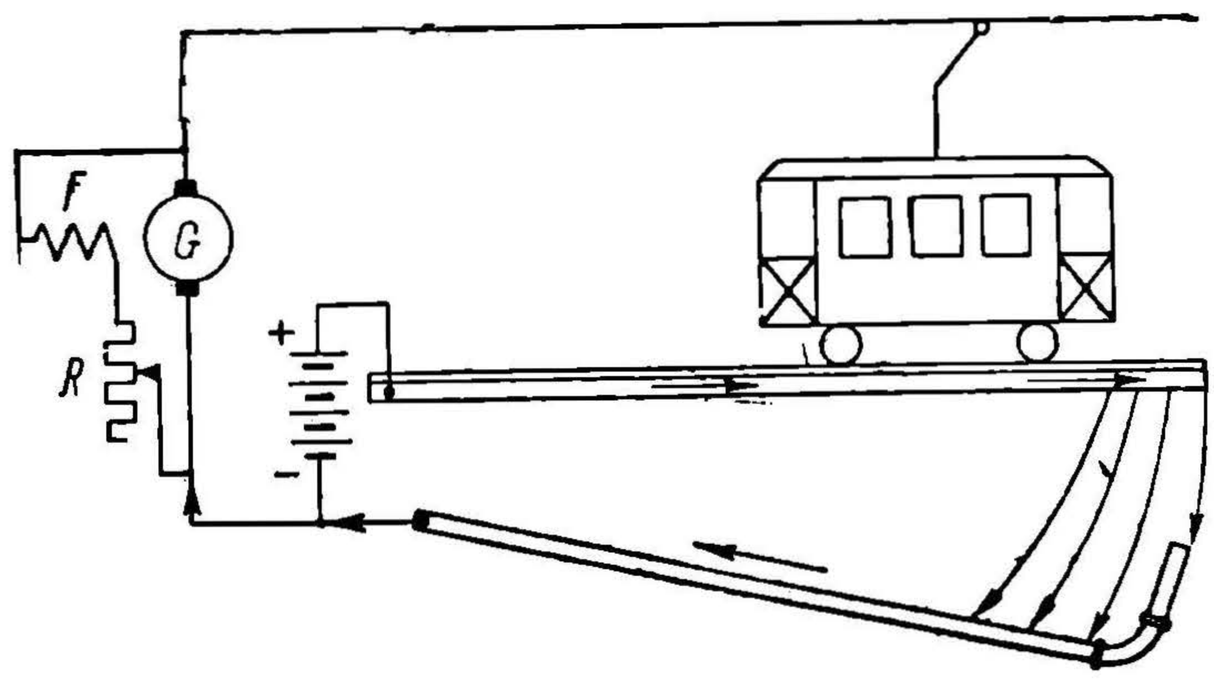


Рис. 649. Схема электрического дренажа трубопроводов для защиты от электрического эффекта блуждающих токов.

Некоторые меры, применяемые против блуждающих токов, часто не достигают своей цели. Например, не рекомендуется защищать трубы асфальтовым покровом, так как эта защита никогда не может быть идеальной, а результатом ее является концентрирование выхода тока из труб на небольших поверхностях, где изоляция несовершенна, и где, вследствие большой плотности выходящего тока, происходит энергичный электролиз. Точно так же с большой осмотрительностью нужно применять разрыв металлической непрерывной связи между отдельными звеньями труб, достигаемый прокладкой изоляции во фланцах труб. Для того чтобы это мероприятие приносило пользу, необходимо стремиться к тому, чтобы стыковые токи в местах разрыва металла не были велики. Падение напряжения в таких местах должно быть не больше 0,1—0,4 V для чугуна, а для железа — 0,03—0,13 V. Такой же метод можно применять и к брони кабелей, разрывая ее оболочку и вставляя в места разрыва специальные стыковые части из изоляционных материалов. Иногда, в целях борьбы с электролитическим действием блуждающих токов, заземляют трубы посредством особых медных заземленных пластин. Никакого существенного значения такая мера не имеет. Она применяется, чтобы дать выход току из труб по этому заземленному проводу, но, конечно, этой цели не достигает, и, как показывает опыт, прибегать к ней нет особого смысла.

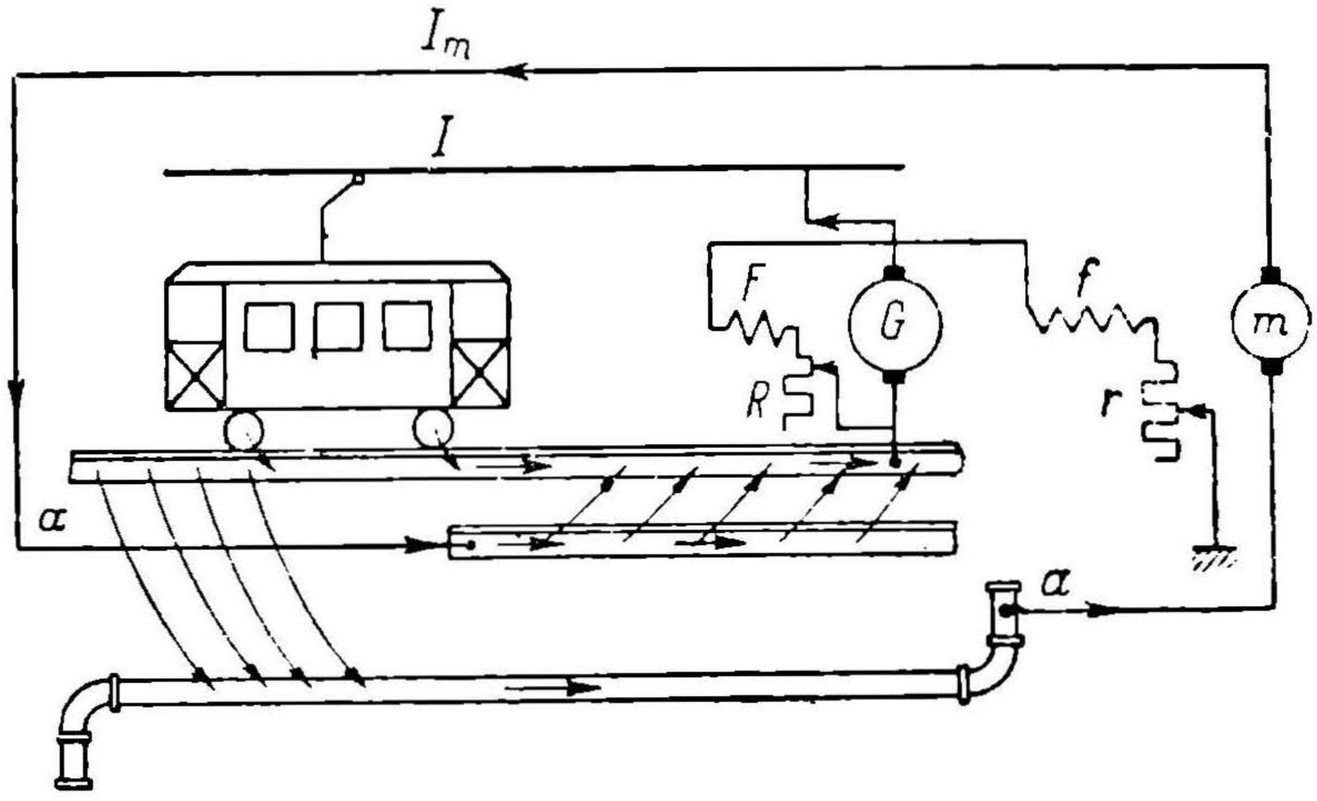


Рис. 650. Комбинированная система электрического дренажа трубопроводов.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

В случаях особой опасности со стороны блуждающих токов иногда отказываются от ходовых рельсов, как от обратных проводов для тока. В Англии нередко можно найти при третьем контактном рельсе четвертый рельс, специально предназначаемый для возврата тока. Четвертый рельс изолируется от земли и в общем по конструкции сходен с рельсом, подводящим ток. Располагается он обычно между ходовыми рельсами посредине колеи.

В некоторых, исключительных случаях для возврата тока применяют верхний провод. Так, например, на железной дороге Berlin-Zossen была применена для трехфазного тока система трех воздушных проводов, но, конечно, такие системы широкого применения найти не могут.

Одним из средств борьбы с блуждающими токами может служить питание двухпутных железных дорог по трехпроводной системе. При такой системе напряжение от двух последовательно соединенных преобразователей подается к контактным рельсам обоих путей. Ходовые же рельсы, являясь нейтральным проводом, присоединяются к средней точке последовательно соединенных преобразователей (рис. 651).

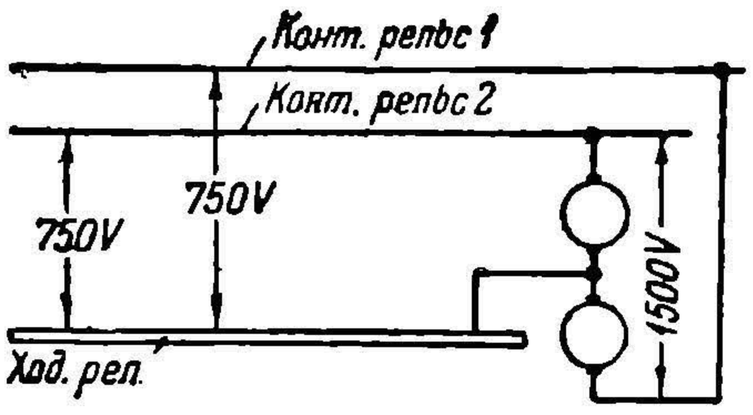


Рис. 651. Трехпроводная схема питания электрических железных дорог.

По такой схеме осуществлены некоторые трамвайные линии и отдельные участки берлинского метрополитена. Преимущество такой системы— в значительной разгрузке ходовых рельсов от тока. Однако, с точки зрения падения напряжения в рабочей сети и общих потерь трехпроводная система, по данным берлинских железных дорог оказывается менее благоприятной, чем двухпроводная. К тому же она требует некоторого увеличения общей мощности подстанционных агрегатов. Табл. 86 иллюстрирует указанное (Л. 17).

ТАБЛИЦА 86.

Сравнение двухпроводной и трехпроводной систем питания железных дорог.

№	Статьи сравнения	Двухпроводная	Трехпроводная
1	Мощность подстанций с резервом	3 × 1500	3 × 2 000
2	Потери на подстанциях в kWh	831 600	1 179 600
3	Потери в рабочей сети в kWh	200 400	157 500
4	Расход энергии на движение	6 200 000	6 200 000
5	Общий расход энергии на шинах трехфазного тока подстанций	7 232 000	7 537 000
6	Наибольшие падения напряжений в рабочей сети	33%	40%

Блуждающие токи, как уже указывалось, представляют опасность, главным образом, на городских электрических железных дорогах. Однако, иногда с ними приходится весьма считаться и при магистральной тяге. Примером может служить Сурамский участок Закавказских железных дорог. Здесь нефтяные и керосиновые трубопроводы на большом протяжении идут на очень близком расстоянии от железнодорожного пути. Значительная часть рабочего тока идет по этим трубопроводам. Опыт эксплоатации этой дороги должен показать, насколько опасны эти токи, и как наиболее рационально с ними можно бороться.

IV. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РАБОЧЕЙ СЕТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ.

1. Основные принципы расчета.

Рабочая сеть электрических железных дорог в основе состоит из контактных проводов и ходовых рельсов. Первые служат для подводки тока через токоприемник к поезду, вторые же являются проводами для обратного тока, получающими его от подвижного состава через места соприкосновения колес с рельсами. Кроме того, к этим проводам в некоторых случаях присоединяются еще усиливающие провода, идущие параллельно пути и имеющие своим назначением усиливать сечение контактных проводов, а иногда и рельсов.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Электрический расчет рабочей сети представляет большие затруднения. Они обусловлены тем, что ввиду перемещения поездов и изменения потребляемых ими токов в процессе движения приходится оперировать нагрузками, меняющимися как в отношении точек их приложения, так и в отношении их величин.

При установлении основных принципов расчета рабочей сети необходимо прежде всего выяснить, какое значение имеет для тяги та или другая величина падения напряжения, и почему эту величину приходится держать в определенных нормах. Предварительно необходимо обратить внимание, что потеря напряжения понижает напряжение на токоприемнике поезда. Это, естественно, значительно отражается на работе тяговых машин. При двигателях с последовательной характеристикой потеря напряжения понижает скорость поезда. При двигателях же с шунтовой характеристикой она резко отражается на силе тяги. При увеличении потери напряжения сила тяги сильно снижается и для восстановления ее до требуемой величины приходится двигатели и сеть перегружать токами. Это неизбежно вызывает дальнейшее увеличение потери напряжения, в результате чего может получиться неустойчивый режим работы системы. С указанной точки зрения при расчете рабочей сети прежде всего необходимо считаться с падением напряжения до токоприемника каждого поезда, так как оно определяет то напряжение, которое фактически подводится к двигателям. Нужно указать, что чрезмерное падение напряжения до токоприемника может так же вредно отражаться и на работе аппаратов управления поездом.

Помимо отмеченного воздействия на работу двигателей и аппаратов управления, падение напряжения оказывает еще одно существенное влияние, относящееся к работе рельсовой сети. Как уже было выяснено, при прохождении тока по рельсам неизбежны утечки тока. Чем выше падение напряжения, тем больше и они. Ввиду этого для предотвращения чрезмерной их величины необходимо иметь специальное ограничение для падения напряжения в рельсовой системе. Естественно, что здесь должно иметь значение падение напряжения вдоль пути. Поэтому при расчете рельсовой сети приходится считаться с падением напряжения до токоразделов, так как они определяют собой опасное падение напряжения вдоль линии.

Ввиду отмеченного выше непостоянства нагрузок падения напряжения как до токоприемника, так и до токоразделов должны характеризоваться величинами текущими, наибольшими и средними. Под текущим наденнем напряжения нужно понимать падения напряжения в каждый данный момент. Под наибольшим следует иметь в виду то, которое может получиться в условиях наиболее тяжелой работы сети, исключая, однако, катастрофические случаи или случаи, вероятность которых при нормальной работе установки ничтожна. Среднее падение, как и обычно, должно характеризовать среднее его значение за определенный промежуток времени. Определяется оно по общеизвестной формуле для средних величин:

$$\Delta U_{cp} = \frac{1}{T}\int_0^T \Delta U dt. \qquad (555)$$

Здесь ΔU_{cp} означает среднее падение напряжения, ΔU — текущее, и T — время, по отношению к которому определяется средняя величина падения. В отношении последней величины необходимо сделать особые замечания. При установлении средних значений падений напряжения до токоприемника следует брать для ΔU_{cp} только те периоды движения поезда, в течение которых поезд находится под током. Это объясняется тем, что на скорость движения поезда и на силу тяги оказывают влияние только моменты, когда поезд находится под током.

Иначе дело обстоит с определением среднего падения напряжения до токоразделов. Как уже было выяснено, последнее приходится определять, главным образом, для рельсовой системы в целях установления, не превосходит ли оно норм с точки зрения борьбы с блуждающими токами. Так как электролитический эффект, производимый ими, зависит не только от величины падения напряжения, но и от продолжительности работы сети, то допустимое падение напряжения в большинстве норм принято брать как среднее за достаточно длительный промежуток времени. В качестве такового берется или время суточной работы или же, при сильно меняющейся в течение суток нагрузке, — ряд часов, на протяжении которых держится интенсивная нагрузка.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

При установлении методов расчета рабочей сети необходимо учитывать, что многие электрические железные дороги работают с рекуперацией энергии. Тогда падение напряжения может получиться отрицательным. Это означает, что в рабочей сети при рекуперации имеют место не понижения, а наоборот повышения падений напряжения. В общем же случае, если на линии находятся поезда, потребляющие и рекуперирующие ток, то в среднем падение напряжения при прочих равных условиях всегда сказывается меньше, чем если бы все поезда потребляли ток. При выработке методов расчета сети необходимо, конечно, учесть влияние на нее и эффекта рекуперации.

При расчете рабочей сети одним из первых вопросов является вопрос о допустимых падениях напряжения. Каких-либо точных и категорических требований в этом отношении не имеется. Приходится руководствоваться общими соображениями и практикой имеющихся дорог. Принято, что средняя потеря напряжения до токоприемника, определяемая для периодов наибольшей загрузки сети, при последовательных двигателях не должна превышать 10%, а максимальная не должна превосходить 30—40%. Для двигателей с шунтовой характеристикой имеется еще меньше данных. По общим соображениям здесь следует стремиться не допускать среднюю потерю напряжения выше 3—4%, а наибольшую выше 7—8%.

При расчете падения напряжения в рельсовом пути, расположенном в черте города, наиболее употребительная норма допустимого падения напряжения, как уже было отмечено выше, при средней суточной нагрузке 1 V/km при условии, однако, введения для разветвленных путей еще того добавочного ограничения, что нигде в рельсовой сети, при той же нагрузке разность потенциалов между отдельными ее точками не должна превышать 2,5 V. Нормы эти должны применяться к металлическим сооружениям, находящимся от рельсовой сети на расстоянии, меньше чем 200 m.

Помимо определения падения напряжения, при расчете рабочей сети очень часто возникает необходимость определять потери мощности и энергии в ней. При определении их можно исходить из общего метода Джоуля, основанного на распределении тока в каждый момент вдоль линии, или же из сумм потерь мощностей для всех поездов, находящихся на рассматриваемом участке. В последнем случае текущие потери для каждого поезда определяются произведением потребляемого этим поездом тока на падение напряжения, имеющее место в данный момент до его токоприемника.

При расчете рабочей сети очень важной величиной является линейная нагрузка линии, определяемая количеством ампер, приходящимся на 1 km пути. Если через n обозначить числа поездов различных категорий, находящихся на данном участке, и через I токи, ими потребляемые, то линейная нагрузка Δi при длине участка l получит выражение:

$$\Delta i = \frac{I_1 n_1 + I_2 n_2 + \ldots + I_n n_n}{l}. \tag{556}$$

В том случае, если какой-либо из токов является током рекуперации, его нужно брать со знаком минус.

Очень удобно определять Δi, исходя из удельного расхода энергии ΔA, выражаемого, как было уже отмечено, в Wh/tkm. Для этого, прежде всего нужно установить на основании ΔA и средней ходовой скорости v_x средний ток, потребляемый поездом:

$$I = \frac{\Delta A\, v_x G_n}{U \cos\varphi}. \tag{557}$$

При трехфазной тяге в знаменатель следует еще ввести, кроме $\cos\varphi$, значение $\sqrt{3}$. Для дальнейших выкладок нужно иметь в виду выражение:

$$n = \frac{l}{v_x}\Delta n. \tag{558}$$

Здесь n — число поездов на участке l, а Δn — число поездов, проходящих по этому участку в один час. Отсюда легко получить

$$\Delta i = (\Delta n_1 \Delta A_1 G_{n_1} \quad \Delta n_2 \Delta A_2 G_{n_2} + \ldots + \Delta n_n \Delta A_n G_{n_n}) \frac{1}{U \cos\varphi}$$

или

$$\Delta i = \frac{1}{U \cos\varphi} \sum_{k=1}^{k=n} \Delta n_k \Delta A_k G_{n_k} \text{ A/km}. \tag{559}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Теперь необходимо формулировать те задачи, которые преследует электрический расчет рабочей сети. В основе они сводятся к тому, чтобы установить сечения проводов и число питательных и отсасывающих пунктов, т. е. тех пунктов, где к рабочей сети подводится ток и где он от нее отводится или, как говорят, отсасывается. Следует иметь в виду, что в тех случаях, когда рельсовая сеть рассчитывается в соответствии с нормами для блуждающих токов, положения питательных и отсасывающих пунктов могут не совпадать. В таких случаях контактную и рельсовую сеть нужно рассчитывать отдельно, как односторонние самостоятельные цепи, учитывая особенности распределения тока в каждой из этих сетей.

2. Расчет рабочей сети по методу сечения графика движения.

Для применения данного метода необходимо иметь график движения поездов, показывающий, где и какие поезда в каждый данный момент находятся. Кроме того, нужно иметь для каждой категории поездов кривые токов в функции от расстояний. На рис. 652 приведена схема определения падения напряжения по указанному методу. В данном примере предположено, что в точках $ПД_1$ и $ПД_2$ находятся питательные и отсасывающие пункты. В левой части нанесены графики токов, потребляемых поездами того и другого направления. Предполагается, что самое движение поездов совершается по нанесенным кривым справа, представляющим зависимость $l=f(t)$. Положения поездов и их расстояния от питательных пунктов для каждого данного момента t_1, можно фиксировать вертикалью a_1a_1. Та же самая вертикаль определяет, как показано на схеме, и те токи, которые потребляются в данный момент отдельными поездами. Здесь необходимо обратить внимание, на то, что токи потребления нанесены на диаграмме по левую сторону от оси ординат, а токи рекуперации—по правую.

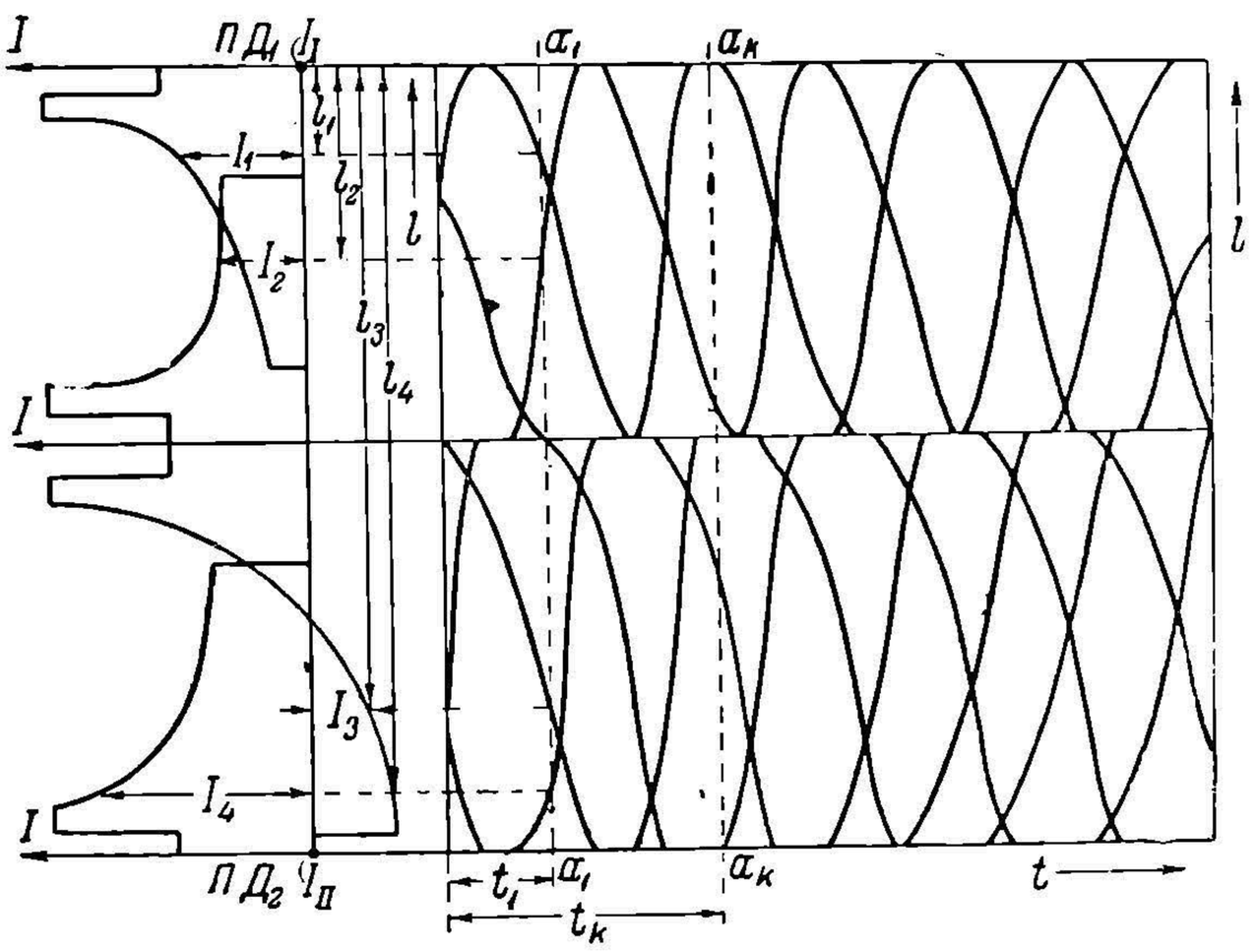


Рис. 652. Диаграмма для определения падений напряжения в рабочей сети по методу сечения графика движения.

Решение задачи начинается с установления текущего падения напряжения для взятого момента t_1. Прежде всего необходимо для этого момента найти распределение токов по пути. Для этого нужно по общему правилу расчета сетей взять момент токов относительно того или другого питательного пункта. Если взять для данного случая момент относительно точки $ПД_1$, то ток, подводимый к питательному пункту $ПД_2$ определится согласно общему правилу по формуле:

$$I_{II}=\frac{I_1l_1+I_2l_2-I_3l_3+I_4l_4}{L}=\frac{1}{L}\sum_{k=1}^{k=n}I_kl_k,$$

где L расстояние между $ПД_1$ и $ПД_2$.

Рис. 653. Схема распределения нагрузок для данного положения поездов на линии.

Как видно из формулы, для тока рекуперации I_3 здесь взят знак минус. После определения I_{II} уже никакого труда не составляет определить токи вдоль всей линии и точки раздела токов, тяготеющих к тому или другому питательному пункту

После установления распределения токов по линии представляется возможным определить падение напряжения до любой точки пути и до токоприемника какого угодно поезда, находящегося на этой линии. Предположим, что картина распределения токов получила вид, представленный на рис. 653. Для определения падения

НБ УПУНТ (ДІТ)

напряжения до точки раздела, определяемой в данном случае положением поезда с током I_2, нужно воспользоваться выражением:

$$\Delta U = [I' l_1 + I'' (l_2 - l_1)] z,$$

где z — сопротивление на единицу длины пути, за которую удобнее всего брать 1 km.

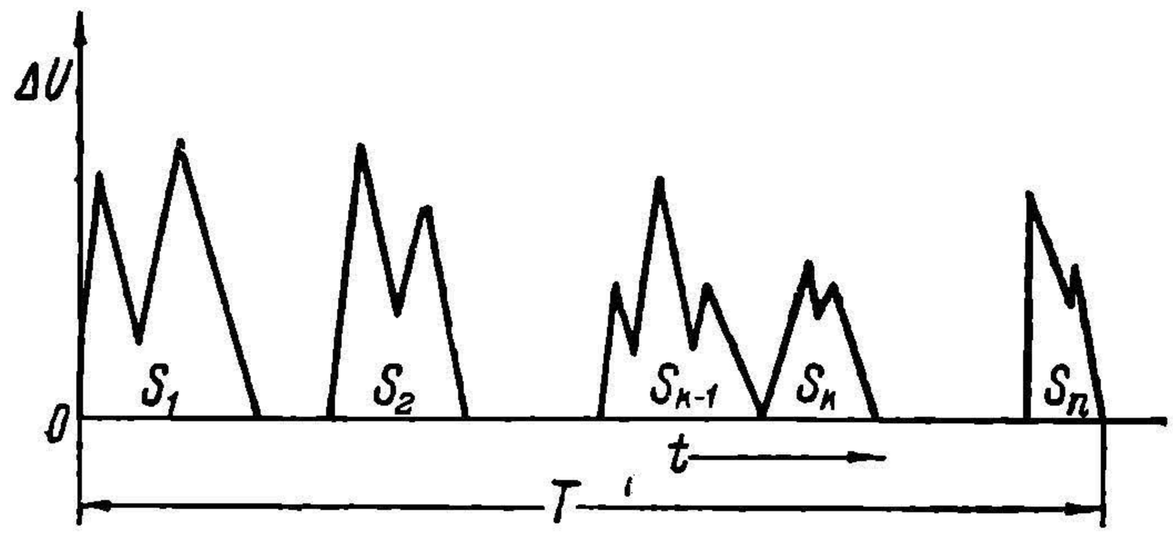


Рис. 654. Кривые падений напряжения в рабочей сети в функции от времени до точек токораздела.

Если дается задача установить падение напряжения до токоприемника, например, для поезда с током I_1, то требуемая для этого формула должна получить выражение:

$$\Delta U = I' l_1 z.$$

Так определится текущее падение напряжения для момента времени, определяемого вертикалью $a_1 a_1$. Точно так же можно определить падения напряжения и для какого угодно другого момента времени t_k, определяемого вертикалью $a_k a_k$. В результате, если взять ряд отдельных моментов $t_1, t_2, .. t_n$, и для каждого из них установить ΔU, то можно получить кривую $\Delta U = f(t)$. Если кривая эта имеет целью установить падение напряжения до токоприемника, то нужно выбрать поезд с наибольшими потребляемыми токами и каждый раз определять ΔU до места нахождения этого поезда.

На рис. 654 изображена картина падений напряжения до точек раздела. Среднее падение напряжения за рассматриваемый промежуток времени может быть определено путем измерения площадей S_1, S_2, .. S_n на основании равенства:

$$\Delta U_{cp} = \frac{S_1 + S_2 + \ldots + S_n}{m_e m_t T}.$$

Здесь m_e — масштаб напряжения, а m_t — масштаб времени.

Определение падения напряжения до токоприемника может быть иллюстрировано рис. 655. Здесь взят общий случай, когда поезд не только берет, но и рекуперирует энергию. Векторы, отложенные вверх от оси абсцисс, изображают падения напряжения, а отложенные вниз — повышения напряжения. Для более правильного суждения о рабочей сети желательно отдельно установить средние величины для падений и для повышений напряжения. При этом нужно помнить, что при установлении указанных величин до токоприемника следует учитывать только время нахождения поезда под током. При таких условиях среднее падение напряжения определяется из выражения:

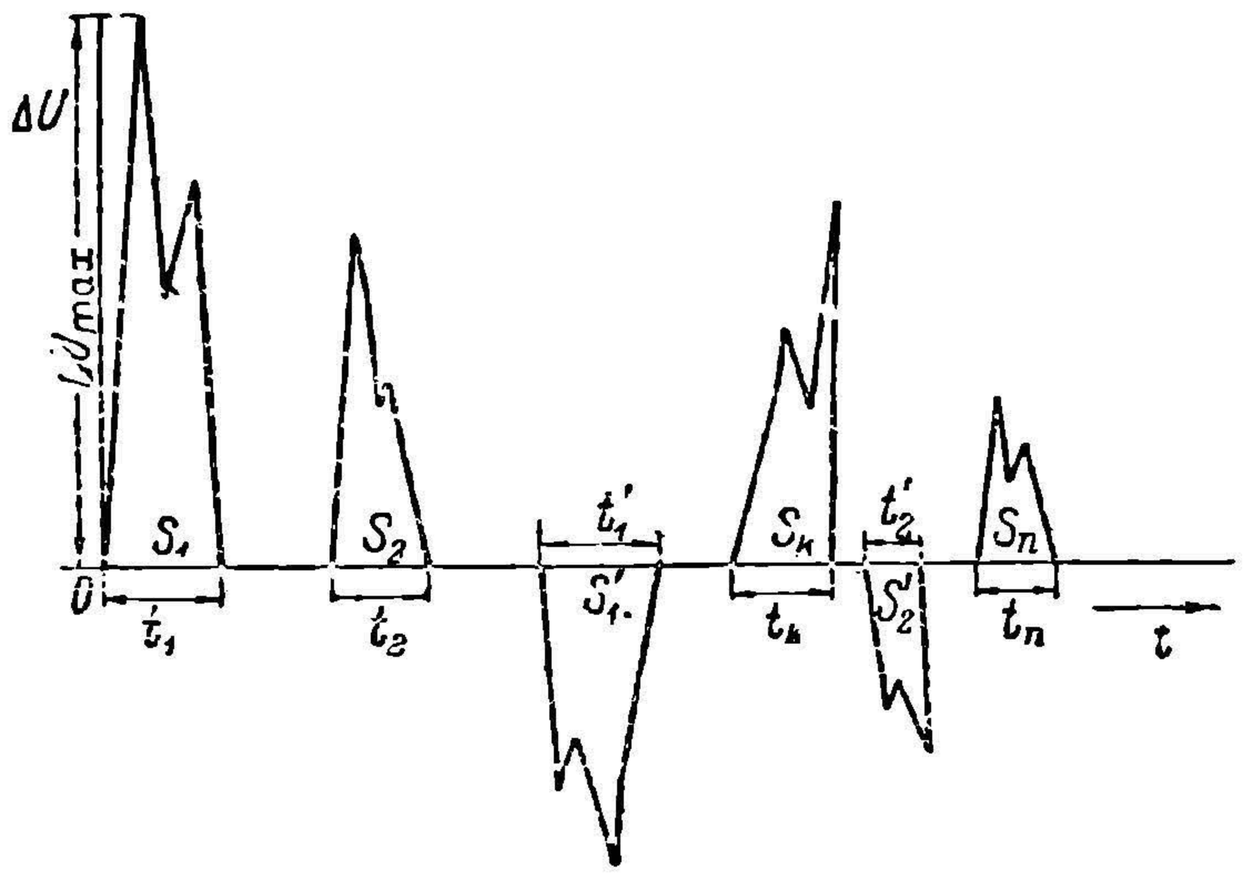


Рис. 655. Кривые падений напряжения в рабочей сети в функции от времени до токоприемника поезда.

$$\Delta U_{cp} = \frac{S_1 + S_2 + \ldots + S_n}{m_e m_t (t_1 + t_2 + \ldots + t_n)}.$$

Точно таким же образом повышение напряжения:

$$\Delta U_{cp} = \frac{S'_1 + S'_2 + \ldots + S'_n}{m_e m_t (t_1' + t_2' + \ldots + t_n')}.$$

Одновременно с определением средних падений напряжения кривые рис. 654 и 655 могут дать представление и о величинах максимальных.

Расчет сети можно считать оконченным, если полученные таким образом величины ΔU_{cp} и ΔU_{max} не превосходят приведенных выше норм и вместе с тем не дают и чрезмерных запасов.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

3. Определение падений напряжения методом подвижных нагрузок.

Метод сечения графика движения теоретически дает точное решение вопроса о падении напряжения в рабочей сети. Практически, однако, эта точность сильно страдает от целого ряда обстоятельств, нарушающих правильно взятые предпосылки. Прежде всего абсолютно точного выполнения теоретических кривых движения ожидать весьма трудно. Обычно имеются большие или меньшие отклонения от них, особенно для трамвайного движения. Нужно также иметь в виду, что сами графики в большинстве случаев строятся по типу прямолинейных в предположении, что поезда движутся с постоянными скоростями, равными средним их значениям в пределах каждого перегона, а не по кривым, учитывающим все изменения скоростей по отдельным элементам профиля. Кроме этого, применение данного метода сопряжено с относительно большой затратой времени, а главное, для него требуется предварительно выполнить тяговые расчеты и построить график движения поездов.

Ниже приводимый приближенный аналитический метод автора имеет преимущество в том отношении, что он очень прост и не требует большой затраты времени, причем для применения его необязательно иметь точный тяговый расчет и график движения поездов.

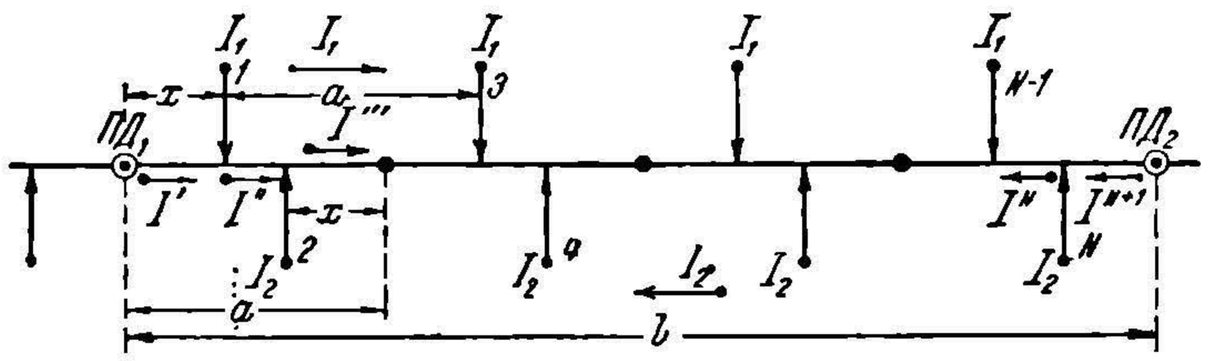


Рис. 656. Схема распределения поездов вдоль линии при одинаковых между ними интервалах.

Определение падения напряжения до токоприемника. Приступая к приближенному расчету рабочей сети, неизбежно приходится делать ряд допущений. Из них наиболее важным в данном случае является предположение, что поезда, находящиеся на рассматриваемом участке, движутся с одинаковыми скоростями и при непрерывном потреблении тока, равного средней его величине за рассматриваемый период. Те случаи, которые сильно отступают от сделанного допущения, будут рассмотрены особо.

Предлагаемый метод основывается на предварительном рассмотрении ряда наиболее часто встречающихся на практике случаев. Затем путем совмещения результатов выводятся общие расчетные формулы.

Первый тип движения, предназначенный к исследованию, представлен на рис. 656. Согласно этой схеме, между подстанциями или вообще между питательными пунктами, обозначенными через $ПД_1$ и $ПД_2$, движется n поездов в одну сторону и n поездов в другую, причем для поездов каждого направления интервалы a остаются неизменными. Подобная картина движения, с большими или меньшими отступлениями, в различных вариантах часто наблюдается как при однопутных, так и при двухпутных графиках. При решении поставленной задачи в целях ее обобщения будем считать, что поезда одного направления могут потреблять токи I_1, а поезда второго направления — токи I_2. Преследуя ту же цель обобщения, будем также предполагать, что любой из означенных токов может быть током, отдаваемым поездами в сеть при рекуперации энергии. В этом случае отдаваемые в сеть токи должны мыслиться в виде отрицательной нагрузки сети. При последующих выкладках оба тока I_1 и I_2 будут предполагаться токами потребляемыми. Для того же случая, если какой-либо из них по расчету должен быть током рекуперации, все последующие формулы будут также справедливы, но только перед этим током везде нужно знаки переменить на обратные.

Для определения требуемого падения напряжения прежде всего необходимо установить распределение токов по отдельным междупоездным участкам линии. На основании уравнений моментов, взятых в данном случае относительно второй подстанции, ток первого участка определится согласно выражению:

$$I^1 = \frac{1}{na}\{I_1(na - x) + I_1[(n-1)a - x] + I_1[(n-2)a - x] +$$

$$+ \ldots + I_1(a - x) + I_2[(n-1)a + x] + I_2[(n-2)a + x] + \ldots + I_2 x\}.$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Путем преобразований выражение это может быть представлено в таком виде:

$$I^{I} = I_1\left(\frac{n+1}{2} - \frac{x}{a}\right) + I_2\left(\frac{n-1}{2} + \frac{x}{a}\right). \tag{560}$$

или

$$I^{I} = I_1 k_1 + I_2 k_2.$$

Придерживаясь принятого обозначения распределения токов по линии, значения их можно представить в виде:

$$\left.\begin{aligned} &= I_1 k_1 + I_2 k_2 \\ I^{II} &= I_1(k_1 - 1) + I_2 k_2 \\ I^{III} &= I_1(k_1 - 1) + I_2(k_2 - 1) \\ I^{IV} &= I_1(k_1 - 2) + I_2(k_2 - 1) \\ &\ldots \\ I^{N} &= I_1(k_1 - n) + I_2[k_2 - (n-1)] \\ I^{N+1} &= I_1(k_1 - n) + I_2(k_2 - n) \end{aligned}\right\}. \tag{561}$$

Зная распределение токов по линии, можно перейти к определению падения напряжения до токоприемника поезда, причем основная задача заключается в установлении средней его величины за период перемещения поезда от одной подстанции до другой. Для определения искомой величины сначала нужно найти текущую сумму падений напряжения для всех поездов, а затем путем интегрирования полученного выражения перейти к средней величине, относя ее к периоду, периодически повторяющемуся.

Для каждого данного положения поездов, если обозначить сопротивление единицы длины пути через z, сумма мгновенных значений падений напряжения для поездов с током I_1 будет иметь форму:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{k=n} \Delta U_k = \{&(I_1 k_1 + I_2 k_2)\, nx + [I_1(k_1 - 1) + I_2 k_2](n-1)(a - 2x) + \\ &+ [I_1(k_1 - 1) + I_2(k_2 - 1)](n-1)\, 2x + \ldots + [I_1(k_1 - n + 1) + \\ &+ I_2(k_2 - n + 2)](a - 2x) + [I_1(k_1 - n + 1) + I_2(k_2 - n + 1)]\, 2x\}\, z. \end{aligned}$$

Первый этап преобразования полученного выражения заключается в приведении его к виду:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{k=n} \Delta U_k = &\left[(I_1 k_1 + I_2 k_2)\, nx + I_2 n \frac{n-1}{2}(a - 2x)\right] z + \\ &+ \{[I_1(k_1 - 1) + I_2(k_2 - 1)](n-1) + [I_1(k_1 - 2) + I_2(k_2 - 2)](n-2) + \\ &+ \ldots + I_1(k_1 - n + 1) + I_2(k_2 - n + 1)\}\, za. \end{aligned}$$

Второй этап преобразования сводится к получению выражения:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{k=n} \Delta U_k = I_1 z &\left[k_1 nx + \frac{k_1 n(n-1)a}{2} + \frac{n^2(n-1)a}{2} + \right. \\ &\left. + a\sum_{y_k=1}^{y_k=n-1} y_k^2\right] + I_2 z\left[k_2 nx + \frac{n(n-1)(a-2x)}{2} + \frac{k_2 n(n-1)a}{2}\right. \\ &\left. - \frac{n^2(n-1)a}{2} + a\sum_{y_k=1}^{y_k=n-1} y_k^2\right]. \end{aligned}$$

Третий этап касается непосредственно определения средней величины напряжения. Подставляя в эту формулу вместо k_1 и k_2 их значения, выраженные через x, и замечая, что после передвижения всех поездов на величину пути $\frac{a}{2}$ картина дви-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

жения повторяется, можно написать для среднего значения падения напряжения до токоприемника поезда формулу:

$$\Delta U_{cp} = \frac{2I_1 z}{na}\int_0^{\frac{a}{2}}\left[\frac{n(n+1)x}{2} - \frac{nx^2}{a} + \frac{n(n-1)a}{2}\left(\frac{n+1}{2} - \frac{x}{a}\right) - \right.$$
$$\left. - \frac{n^2(n-1)a}{2} + a\sum_{y_k=1}^{y_k=n-1} y_k^2\right] dx +$$
$$+ \frac{2I_2 z}{na}\int_0^{\frac{a}{2}}\left[\frac{n(n-1)x}{2} + \frac{nx^2}{a} + \frac{n(n-1)(a-2x)}{2} + \frac{n(n-1)a}{2}\left(\frac{n-1}{2} + \frac{x}{a}\right) - \right.$$
$$\left. - \frac{n^2(n-1)a}{2} + a\sum_{y_k=1}^{y_k=n-1} y_k^2\right] dx. \qquad (562)$$

Хотя, по существу, определять среднюю величину падения напряжения следует по времени, но в данном случае допустимо определить ее по расстоянию, так как при принятом условии постоянства скорости пути, проходимые поездами, прямо пропорциональны временам их хода.

После интегрирования и преобразования выражение (562) получает вид:

$$\Delta U_{cp} = \left[I_1\left(\frac{n}{2} - \frac{n^2}{4} - \frac{1}{12} + \frac{1}{n}\sum_{y_k=1}^{y_k=n-1} y_k^2\right) + \right.$$
$$\left. + I_2\left(\frac{n}{2} - \frac{n^2}{4} - \frac{1}{6} + \frac{1}{n}\sum_{y_k=1}^{y_k=n-1} y_k^2\right)\right]\frac{zl}{n}.$$

Для дальнейшего упрощения этого выражения необходимо установить в простей, шей форме значение входящей сюда суммы $\sum y_k^2$, каковая может быть представлена следующим образом:

$$\sum_{y_k=1}^{y_k=n-1} y_k^2 = \frac{n(2n^2-3n+1)}{6}.$$

Делая соответствующие подстановки и упрощения, приходим к следующей, простой и удобной для вычисления, формуле:

$$\Delta U_{cp} = [n^2(I_1 + I_2) + I_1]\frac{zl}{12n}. \qquad (563)$$

При анализе данной формулы, необходимо отметить, что она определяет среднее падение напряжения для поездов с током I_1. Если желательно определить ту же величину для поездов второго направления, а именно с током I_2, то в формуле достаточно поменять местами токи I_1 и I_2. В том случае, когда один из токов является током рекуперации, перед ним, как выше было обусловлено, следует ставить знак минус. Согласно сделанным значениям, среднее значение напряжения для поезда с током I_2 напишется в таком виде:

$$\Delta U_{cp} = [n^2(I_1 + I_2) + I_2]\frac{zl}{12n}. \qquad (564)$$

В случае рекуперации выведенная формула может иногда давать отрицательные значения для ΔU_{cp}. Тогда это означает, что приходится иметь дело не с падением, а с повышением напряжения, характеризующим в данном случае то среднее напряжение, которое нужно держать в токоприемнике поезда для получения заданного тока рекуперации.

Все выведенные до сих пор формулы относятся к случаю двухстороннего движения с одинаковым количеством поездов в обе стороны. Помимо этих случаев, следует разобрать еще очень важный график, при котором между подстанциями может

НБ УДУНТ (ДІІТ)

быть в одном направлении на один поезд больше, чем в другом (рис 657). Исследуемая схема движения содержит в одном направлении $n+1$ поездов с током I_1, а в другом n поездов с током I_2.

Придерживаясь предыдущего метода решения задачи, можно определить тем же способом среднее падение напряжения для поездов с током I_1.

Ток первого участка определяется по формуле:

$$I' = I_1 \frac{n+1}{n+0,5}\left(\frac{n+1}{2} - \frac{x}{a}\right) + I_2 \frac{n}{n+0,5}\left(\frac{n}{2} + \frac{x}{a}\right) \tag{565}$$

или

$$I' = I_1 k_1 + I_2 k_2.$$

Сумма мгновенных значений падений напряжения будет вида:

$$\left.\begin{aligned}\sum_{k=1}^{k=n+1} \Delta U_k = \{&(I_1 k_1 + I_2 k_2)(n+1)x + [I_1(k_1-1) + I_2 k_2]\, n(a-2x) + \\ &+ [I_1(k_1-1) + I_2(k_2-1)]\, n2x + \ldots + [I_1(k_1-n) + I_2(k_2-n+1)](a-2x) + \\ &+ [I_1(k_1-n) + I_2(k_2-n)]\, 2x\}\, z.\end{aligned}\right\} \tag{566}$$

После ряда преобразований выражения (566) можно получить для среднего значения падения напряжения следующую формулу:

$$\left.\begin{aligned}\Delta U_{cp} = &\frac{2I_1 z}{(n+1)a}\int_0^{\frac{a}{2}}\left[\frac{(n+1)^2}{n+0,5}\left(\frac{n+1}{2} - \frac{x}{a}\right)x + \right. \\ &+ \frac{n(n+1)^2 a}{2(n+0,5)}\left(\frac{n+1}{2} - \frac{x}{a}\right) - \frac{n^2(n+1)a}{2} + a\sum_{y_{k-1}y_k=1\times 2}^{y_{k-1}y_k=(n-1)n} y_{k-1}y_k\Big]dx + \\ &+ \frac{2I_2 z}{(n+1)a}\int_0^{\frac{a}{2}}\left[\frac{n(n+1)}{n+0,5}\left(\frac{n}{2} + \frac{x}{a}\right)x + \frac{n(n+1)(a-2x)}{2} + \right. \\ &+ \frac{n^2(n+1)a}{2(n+0,5)}\left(\frac{n}{2} + \frac{x}{a}\right) - \frac{n^2(n+1)a}{2} + a\sum_{y_{k-1}y_k=1\times 2}^{y_{k-1}y_k=(n-1)n} y_{k-1}y_k\Big]dx.\end{aligned}\right\} \tag{567}$$

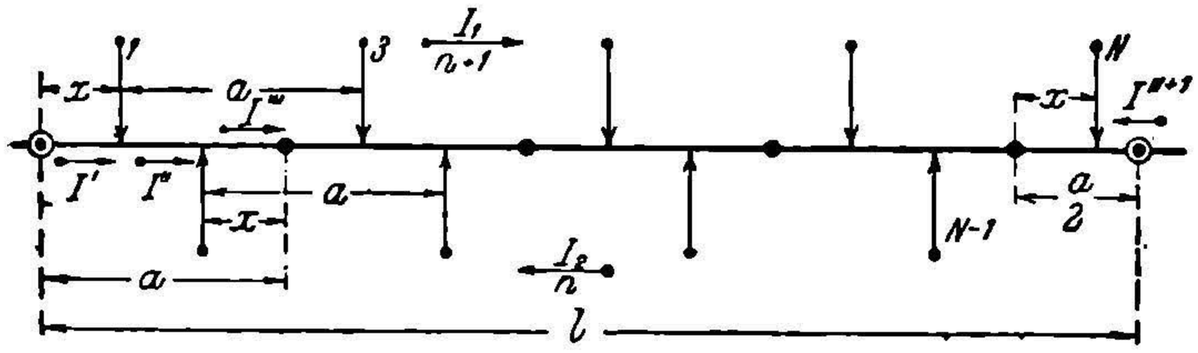


Рис. 657. Схема расположения поездов между питательными пунктами при условии $n+1$ поездов в одном направлении и n в другом.

Для дальнейших преобразований нужно иметь в виду соотношение:

$$\sum_{y_{k-1}y_k=1\times 2}^{y_{k-1}y_k=(n-1)n} y_{k-1}y_k = \frac{n(n^2-1)}{3}.$$

Подставляя данное соотношение в выражение (567), производим интегрирование и новый цикл упрощений. В результате можно выразить в следующей искомое среднее значение падения напряжения простой форме:

$$\Delta U_{cp} = \left[n\left(\frac{n^2}{n+0,5} + 1\right)(I_1 + I_2) + I_1\right]\frac{zl}{12(n+0,5)}. \tag{568}$$

Пользуясь тем же методом, находим для среднего значения падения напряжения у поездов с током I_2 следующую формулу:

$$\Delta U_{cp} = \left[(n+1)\left(\frac{n^2}{n+0,5} + 1\right)(I_1 + I_2) + I_2\right]\frac{zl}{12(n+0,5)}. \tag{569}$$

Выражения (568) и (569) дают средние значения падения напряжения для поездов с токами I_1 и I_2 при условии, что они занимают те перегоны, которые указаны на рис. 657. Нетрудно видеть, что при таких условиях поезда с токами I_2, как более удаленные от подстанций, находятся в отношении падений напряжения в менее выгодных условиях. Однако, после прохождения одного перегона картина меняется. После этого в невыгодное положение попадают поезда с током I_1. В виду того, что

БГВ УИУНТ (ДІІТ)

данная картина обычно периодически меняется, падение напряжения для каждого поезда следует определять как среднее за все время его движения, учитывая невыгодные и выгодные его положения по отношению к подстанциям. Комбинируя выражения (568) и (569), можно получить искомую формулу для поездов с током I_1 в следующем виде:

$$\Delta U_{cp} = \left[\frac{n(n+1)}{n+0{,}5}\left(\frac{n^2}{n+0{,}5}+1\right)(I_1+I_2)+I_1\right]\frac{zl}{12(n+0{,}5)}. \qquad (570)$$

Та же формула для поездов с током I_2:

$$\Delta U_{cp} = \left[\frac{n(n+1)}{n+0{,}5}\left(\frac{n^2}{n+0{,}5}+1\right)(I_1+I_2)+I_2\right]\frac{zl}{12(n+0{,}5)}. \qquad (571)$$

Разобранные случаи падения напряжения являются наиболее характерными. Однако, на практике имеется много случаев, когда движение поездов совершается по иным графикам. Очень часто может иметь место такое движение, при котором в одну сторону продолжительное время идет значительно больше поездов, чем в другую, которое, иными словами, совершается по графику среднему из симметричного и чисто одностороннего. Для примера на рис. 658 и 659 представлены два таких характерных случая.

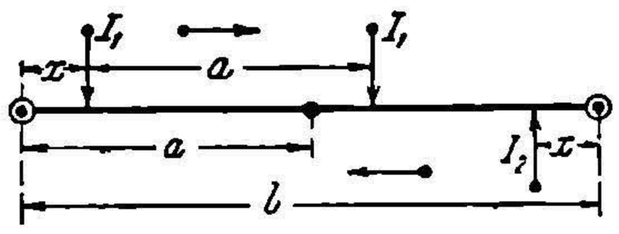


Рис. 658. Схема распределения нагрузок при трех поездах между питательными пунктами.

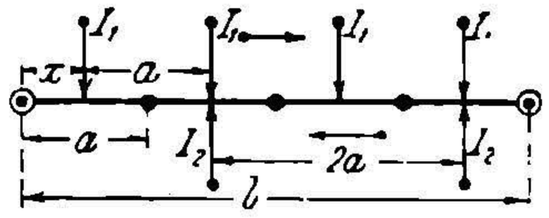


Рис. 659. Схема распределения нагрузок при шести поездах между питательными пунктами.

Если задаться целью составлять расчетные формулы отдельно для всех возможных случаев движения, то не подлежит сомнению, что здесь придется встретиться с непреодолимыми препятствиями. Единственный возможный способ широко охватить поставленную задачу — это попытаться составить по возможности небольшое число формул, которые бы можно было с достаточной точностью применять к наиболее часто встречающимся случаям движения.

Анализ выведенных выше формул и затем проверочное определение падений напряжения методом сечения графика показывают, что наиболее характерные и наиболее часто встречающиеся типы движения можно охватить двумя формулами.

Для двухстороннего движения при однопутных железных дорогах, а также и для многопутных при электрическом соединении контактных проводов можно пользоваться формулой:

$$\Delta U_{cp} = \left(\frac{\Delta il}{2}+\frac{I}{N}\right)\frac{zl}{6}. \qquad (572)$$

Ток в формуле (572) следует брать равным I_1 или I_2, смотря по тому, определяется ли падение напряжения для поездов первого или второго направления.

Очень важен случай одностороннего движения поездов, когда не имеется встречного движения, а поезда движутся в одном направлении. Этот случай выводится из формулы (563) путем приравнения тока I_2 нулю:

$$\Delta U_{cp} = \frac{N^2+1}{12N} Izl. \qquad (573)$$

Следует обратить особое внимание на то, что при одном поезде на линии нужно пользоваться последней формулой, а не формулой (572).

При многопутных дорогах с разделенными в электрическом отношении контактными проводами рекомендуется пользоваться обеими формулами (572) и (573), причем вторую применять для определения падения напряжения в каждом из контактных проводов, а первую — для рельсовой сети, полагая, что рельсы электрически связаны, и что на падение напряжения в них влияют токи поездов обоих путей. При таких условиях общее падение напряжения в рабочей сети любого пути определится как сумма падений в его контактном проводе и в рельсах. Здесь следует еще раз заметить, что рекуперируемые токи в формулах (572) и (573) должны входить со знаками минус.

Все выведенные формулы относятся к случаю двухстороннего питания рабочего провода. Естественно, что все сделанные предположения справедливы и для

НВ УДУНТ (ДІІТ)

питания одностороннего, причем выкладки тогда значительно проще. Можно даже с достаточной степенью точности исходить непосредственно из выведенных уже формул, как это, например, сделано автором (Л. 196). Однако, для более точного решения дается вывод, непосредственно относящийся к одностороннему движению. Схема движения представлена на рис. 660.

Здесь задача очень упрощается благодаря тому, что распределение токов по отдельным участкам находится элементарно просто:

$$\left.\begin{aligned} I' &= n(I_1 + I_2) \\ I'' &= (n-1)I_1 + nI_2 \\ I''' &= (n-1)I_1 + (n-1)I_2 \\ &\dots\dots\dots\dots\dots \\ I^{N-1} &= I_1 + I_2 \\ I^N &= I_2 \end{aligned}\right\} \qquad (574)$$

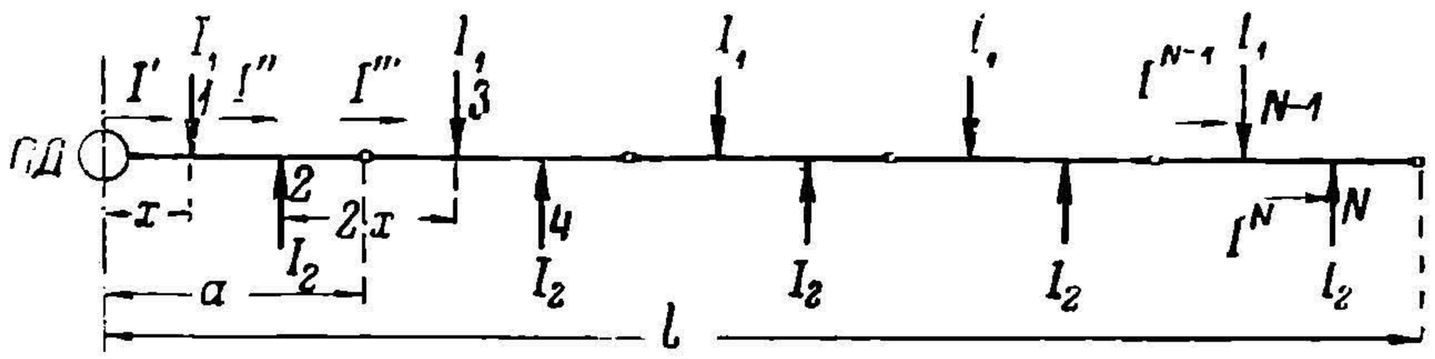


Рис. 660. Распределение нагрузок при одностороннем питании рабочей сети.

Зная распределение токов, уже никакого труда не составляет определить падение напряжения. Общая формула для среднего его значения применительно к поезду с током I_1 по тому же самому принципу, что и в случае двухстороннего движения, может быть выражена в виде:

$$\Delta U_{cp} = \frac{2z}{na}\int_0^{\frac{a}{2}} \{(I_1 + I_2)n^2 x + [I_1(n-1) + I_2 n](n-1)(a-2x) + (I_1 + I_2)(n-1)^2 2x + \dots + (I_1 + I_2)2x\}\, dx$$

Произведя интегрирование и вынося за скобку общий член, получаем выражение:

$$\Delta U_{cp} = \left\{(I_1 + I_2)\frac{n^2}{2} + [I_1(n-1) + I_2 n](n-1) + (I_1 + I_2)(n-1)^2 + \dots + (I_1 + I_2)\right\}\frac{za}{2n}.$$

Данное выражение легко приводится к следующему:

$$\Delta U_{cp} = \left[(I_1 + I_2)\frac{n^2}{2} + I_1\sum_{y_k=1}^{y_k=n-1} y_k^2 + I_2\sum_{y_{k-1}y_k=1\times 2}^{y_{k-1}y_k=(n-1)n} y_{k-1}y_k + (I_1 + I_2)\sum_{y_k=1}^{y_k=n-1} y_k^2\right]\frac{za}{2n}.$$

Упростив данное выражение тем же методом, что и в предыдущем, можно легко представить его в виде:

$$\Delta U_{cp} = [4n^2(I_1 + I_2) - 3nI_1 + 2I_1 - I_2]\frac{zl}{12n}. \qquad (575)$$

Формула эта выведена для поезда с током I_1. В данном случае ΔU_{cp} означает падение напряжения для данного поезда среднее за период до встречи с поездами, имеющими ток I_2. В течение этого периода поезда с I_1 были в общем ближе к питательному пункту, чем с током I_2. В следующий за встречей момент они уже должны оказаться в менее выгодном положении. Для этого периода таким же самым образом можно вывести следующую формулу:

$$\Delta U_{cp} = [4n^2(I_1 + I_2) + 3nI_1 + 2I_1 - I_2]\frac{zl}{12n}. \qquad (576)$$

НБ УПУНТ (ДІІТ)

На основании последних двух формул, комбинируя их в одну, можно дать формулу для ΔU_{cp} при движении поезда по всему участку, так как в общем случае поезда того или другого направления попеременно занимают то более, то менее выгодное положение. На базе предыдущих положений можно представить выражение для среднего падения напряжения при одностороннем питании в виде:

$$\Delta U_{cp} = \left(2\Delta il + \frac{2I_1 - I_2}{N}\right)\frac{zl}{6}. \tag{577}$$

Для того же случая при движении поездов в одном направлении очень просто выводится формула:

$$\Delta U_{cp} = \frac{2N^2 + 1}{6N} Izl. \tag{578}$$

Определение падений напряжения до точек токораздела. При нескольких поездах между подстанциями искомое падение напряжения определяется тем поездом, который дает точку токораздела или сам граничит с областью токораздела, так как, например, в случае симметричного движения точка токораздела периодически переходит в область разделов. Метод определения исследуемой величины можно оставить прежним, причем так же, как и раньше, в основу анализа целесообразно положить случай двухстороннего симметрического движения при четном количестве поездов между подстанциями. При таких условиях задача, по существу, сводится к определению для центрального поезда с большим нагрузочным током среднего падения напряжения за период, протекающий между встречами его с двумя следующими друг за другом смежными поездами противоположного направления. Если взять при $N = 2n$ случай четного числа пар поездов n, то для центрального поезда с током I_1, полагая $I_1 > I_2$, найдем среднее падение напряжения за указанный выше период согласно рис. 656 и уравнениям (561):

$$\Delta U_{cp} = \frac{2z}{a}\int_0^{\frac{a}{2}} \Big\{(I_1k_1 + I_2k_2)\,x + [I_1(k_1 - 1) + I_2k_2](a - 2x) + \\ + [I_1(k_1 - 1) + I_2(k_2 - 1)]\,2x + \ldots + \left[I_1\left(k_1 - \frac{n}{2}\right) + I_2\left(k_2 - \frac{n}{2}\right)\right]2x\Big\}\,dx.$$

Если же n — число нечетное, то уравнение примет вид:

$$\Delta U_{cp} = \frac{2z}{a}\int_0^{\frac{a}{2}} \Big\{(I_1k_1 + I_2k_2)\,x + [I_1(k_1 - 1) + I_2k_2](a - 2x) + \\ + [I_1(k_1 - 1) + I_2(k_2 - 1)]\,2x + \ldots + \left[I_1\left(k_1 - \frac{n-1}{2}\right) + \right. \\ \left. + I_2\left(k_2 - \frac{n-1}{2}\right)\right]2x\Big\}\,dx.$$

Произведя соответствующие подстановки и упрощения, можно оба эти уравнения свести к одному:

$$\Delta U_{cp} = \left[I_1\left(n^2 + \frac{1}{3}\right) + I_2\left(n^2 - \frac{1}{3}\right)\right]\frac{zl}{8n}. \tag{579}$$

Другой важный случай движения имеем тогда, когда в одном направлении число поездов на один больше, чем в другом. Здесь, как и выше, необходимо также различать два случая. Если считать в одном направлении $n+1$ поездов, а в другом n, то приходится отдельно определить падение напряжения для случая, когда n — четное число, и для случая, когда n — число нечетное.

Для n четного среднее значение падения напряжения до точек токораздела (рис. 657) определяется поездом с током I_1. Руководствуясь прежним методом, можно формуле для данного случая придать вид:

$$\Delta U_{cp} = \left[n\left(n + 1 + \frac{1}{6n+3}\right)(I_1 + I_2) + \frac{2}{3}I_1\right]\frac{zl}{8(n+0{,}5)}. \tag{580}$$

Для движения с n нечетным числом поездов центральное место на линии занимает уже не поезд с током I_1, а один из поездов с током I_2, который и определяет собой точку токораздела. Для этого случая искомое среднее значение падения напряжения определится выражением:

$$\Delta U_{cp} = \left[(n+1)\left(n + \frac{1}{6n+3}\right)(I_1 + I_2) + \frac{2}{3}I_2\right]\frac{zl}{8(n+0{,}5)}. \tag{581}$$

НВ УДУНТ (ДІІТ)

При нормальных однопутных графиках взаимное положение поездов с I_1 и I_2 периодически меняется. Вследствие этого точка токораздела определяется попеременно то одним, то другим поездом. В этом случае искомое падение напряжения должно определяться как среднее для поездов с током I_1 и I_2. Для n четного искомое среднее падение напряжения можно выразить формулой:

$$\Delta U_{cp} = \left[n \quad n+1+\frac{1}{6n+3}\right)+\frac{1}{3}\Big]\frac{(I_1+I_2)zl}{8(n+0{,}5)}. \tag{582}$$

Для n нечетного таким же образом можно преобразовать и формулу (581):

$$\Delta U_{cp} = \left[(n+1)\left(n+\frac{1}{6n+3}\right)+\frac{1}{3}\right]\frac{(I_1+I_2)zl}{8(n+0{,}5)}. \tag{583}$$

На основании выведенных выражений, в качестве общей формулы, применимой для любого числа и положения поездов между подстанциями, может служить формула:

$$\Delta U_{cp} = \left(\frac{\Delta il}{2}+\frac{\pm I_1 \mp I_2}{3N}\right)\frac{zl}{4}. \tag{584}$$

При расчете опасного падения напряжения по формуле (584) следует брать комбинацию или верхних, или нижних знаков, при которой получается более тяжелый случай. При рекуперации энергии знаки перед рекуперируемым током должны быть изменены на обратные.

Для чистого одностороннего графика опасное падение напряжения определяется равенством:

$$\Delta U_{cp} = \left(N+\frac{1}{3N}\right)\frac{Izl}{8}. \tag{585}$$

При питании сети с одного конца искомое падение напряжения должно определяться поездом, наиболее удаленным от питательного пункта. Для поезда с током I_1, если предположить, что он находится от питательного или отсасывающего пункта в большем удалении, среднее падение напряжения до встречи согласно предыдущему можно определить формулой:

$$\Delta U_{cp} = \left(\Delta il+\frac{I_1-I_2}{2}\right)\frac{zl}{2}. \tag{586}$$

В следующий момент падение напряжения будет уже определяться поездом с током I_2:

$$\Delta U_{cp} = \left(\Delta il+\frac{I_2-I_1}{2}\right)\frac{zl}{2}. \tag{587}$$

При непрерывном движении, когда места поездов все время взаимно меняются и когда искомые падения напряжений фиксируются то поездом с током I_1, то поездом с током I_2, среднее падение напряжения должно определяться по выражению:

$$\Delta U_{cp} = \frac{\Delta izl^2}{2}. \tag{588}$$

Для движения с односторонним направлением среднее падение напряжения, как это легко вывести, должно выражаться формулой:

$$\Delta U_{cp} = \frac{INzl}{2}. \tag{589}$$

Следует обратить внимание на то, что при $I_1 = I_2$ формулы (588) и (589) дают одни и те же значения для обоих случаев движения.

Пределы точности аналитических формул. При выводе формул для падения напряжения был применен метод обобщения наиболее частых случаев. Автор (Л. 196) произвел оценку выведенных формул для целого ряда наиболее характерных типов движения. Оказалось, что при условии соблюдения допущений, сделанных при выводе предлагаемых формул, точность обобщенных формул для самых разнообразных видов движения получается весьма высокая. Для формул (572) и (573) эта точность — порядка 1%, а для формулы (584), при небольшом количестве поездов, она значительно меньше. Для наиболее неблагоприятных случаев она лежит в пределах 12%. Когда между подстанциями имеется больше трех поездов, ошибка резко снижается. Учитывая, что при расчете тяговых сетей вообще очень трудно получить абсолютную точность, можно полагать, что предполагаемые формулы достаточно пригодны, тем более что наиболее важные формулы дают точность очень высокую.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Кроме указанного, при пользовании приведенным аналитическим методом расчета следует обратить особое внимание на следующие обстоятельства. При выводе всех вышеприведенных формул предполагалось, что в течение всего периода движения поезда потребляют постоянные по величине токи, равные среднему их значению. Это предположение достаточно справедливо для дорог дальнего следования или вообще дорог с длинными перегонами между остановками. На дорогах же с относительно короткими перегонами поезд идет под током обычно только часть всего времени нахождения его на перегоне. На дорогах пригородных и городских время движения поезда под током сокращается до половины и даже до одной трети всего времени. Вопрос еще осложняется тем, что перегоны между подстанциями бывают неодинаковой длины, и ток за период его потребления не остается величиной постоянной.

Ввиду указанных обстоятельств выведенные формулы при коротких перегонах нуждаются в поправочных коэфициентах, причем с этим приходится считаться в первую очередь при определении падения напряжения до токоприемника поезда. Как уже было отмечено, это падение напряжения необходимо относить ко времени движения поезда под током, так как только в течение этого периода для поезда важно то или другое напряжение на его токоприемнике. Ввиду чрезвычайного разнообразия тех случаев, которые могут здесь представиться на практике, дать общую универсальную поправку к выведенным формулам, конечно, не представляется возможным. Но так как предварительное определение среднего значения падения напряжения бывает обычно неизбежным, то приходится так или иначе искать выход из создавшегося затруднения. Необходимо иметь особые поправочные коэфициенты, хотя бы ориентировочного типа, для внесения их в основные формулы. Такие коэфициенты приведены в табл. 87.

ТАБЛИЦА 87.

Данные для коэфициента k_t.

Отношения $\frac{T_a}{T_k}$	Число поездов между смежными станциями					Примечание
	1	2	4	6	10	
$T_a = {}^3/_4\ T_k$	1,4	1,2	1,12	1,1	1,05	T_a — время нахождения поезда под током. T_k — время нахождения поезда на перегоне. Можно положить: $k_t = 1 + \left(\frac{T_k}{T_a} - 1\right)\frac{1,1}{N}$
$T_a = {}^1/_2\ T_k$	2	1,7	1,35	1,25	1,1	
$T_a = {}^1/_3\ T_k$	3	2,1	1,8	1,4	1,25	

Коэфициенты табл. 87, показывающие величину поправки и обозначаемые в дальнейшем через k_t, выведены на основании анализа установленных выше уравнений и сопоставления их с наиболее вероятными случаями на практике, причем еще раз необходимо отметить, что на приведенные коэфициенты нужно смотреть лишь как на ориентировочные, приемлемые только для предварительных подсчетов, не требующих большой точности. Для внесения поправок значения ΔU_{cp}, получаемые по формулам (572), (573), (577) и (578), нужно умножить на k_t.

Все сделанные заключения по внесению поправочных коэфициентов в основные формулы относятся к определению напряжения до токоприемника поезда. По отношению к определению падения напряжения вдоль линии до точек токораздела вопрос обстоит более благоприятно. Так как нормы по борьбе с блуждающими токами обычно устанавливаю опасное падение напряжения как среднее за достаточно длительный срок, то возможность нахождения одних поездов под током, других — без тока существенного значения на искомое падение напряжения не оказывает.

Однако, некоторое влияние изменения величин потребляемых токов и здесь все-таки сказывается. Объясняется это тем, что поезда во время, когда потребляется ими ток, могут находиться в различных положениях по отношению к питательным и отсасывающим пунктам. При одном графике движения потребление тока может происходить в местах, примыкающих к питательным пунктам, при других же это

НБ УГУНТ (ДІІТ)

может иметь место в районах, примыкающих к середине участка или вообще удаленных от питательных пунктов. Указанное обстоятельство, естественно, влияет на падение напряжения не только до токоприемника, но и до токоразделов. При достаточно значительном количестве поездов на линии отмеченное явление, однако, существенного значения не имеет. Ввиду этого допустимо в формулы, определяющие падение напряжения до токоразделов, особых поправочных коэфициентов не вводить.

Определение потерь в проводах. Потери мощности и энергии в рабочей сети являются одним из существеннейших факторов, с которыми приходится считаться при определении экономического сечения проводов. Умение определить их предварительно в общей форме, пока еще не установлены основные элементы проектируемой дороги, имеет в некоторых отношениях еще большее значение, чем определение падения напряжения. Как было указано, установление потерь в проводах можно вести двумя способами. Можно исходить или из обычного способа, основанного на пространственном распределении токов, или же — если известны для каждого поезда потребляемый им ток и падение напряжения до его токоприемника — их можно установить как сумму произведений из токов на соответствующие падения напряжения для всех тех поездов, которые находятся на рассматриваемом участке. При последующих выкладках положен в основу первый метод, как наиболее универсальный.

При условии сохранения прежних обозначений для симметричного графика (рис. 656) потери в проводах, средние за период, после которого взаимное положение поездов снова восстанавливается, определяются выражением:

$$P_n = \frac{2r_{eff}}{a}\int_0^{\frac{a}{2}} \{(I_1k_1 + I_2k_2)^2 x + [I_1(k_1-1) + I_2k_2]^2 (a-2x) + \\ + [I_1(k_1-1) + I_2(k_2-1)]^2 2x + \ldots + [I_1(k_1-n) + I_2(k_2-n)]^2 x\}\, dx.$$

Подставляя вместо k_1 и k_2 их значения согласно уравнению (561) и произведя затем ряд упрощений, не приводимых здесь из-за их громоздкости, можем полученное выражение свести к более простой форме:

$$P_n = \left\{\frac{1}{6}(I_1^2 + I_1I_2 + I_2^2) + \left[\frac{1}{n}\sum_{y_k=1}^{y_k=n} y_k^2 - \frac{(n+1)^2}{4}\right] I_1^2 + \right. \\ + 2\left[\frac{1}{n}\sum_{y_{k-1}y_k=1\times 2}^{y_{k-1}y_k=(n-1)n} y_{k-1}y_k - \frac{n^2-1}{4}\right] I_1I_2 + \\ \left. + \left[\frac{1}{n}\sum_{y_k=1}^{y_k=n-1} y_k^2 - \frac{(n-1)^2}{4}\right] I_2^2 \right\} r_{eff}l.$$

Для дальнейших упрощений необходимо установить соотношение:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{1}{n}\sum_{y_k=1}^{y_k=n} y_k^2 - \frac{(n+1)^2}{4} = \frac{1}{n}\sum_{y_k=1}^{y_k=n-1} y_k^2 - \frac{(n-1)^2}{4} = \\ &= \frac{1}{n}\sum_{y_{k-1}y_k=1\times 2}^{y_{k-1}y_k=(n-1)n} y_{k-1}y_k - \frac{n^2-1}{4} = \frac{n^2-1}{12} \end{aligned}\right\}. \qquad (590)$$

В связи с последним равенством искомая формула получает весьма простой и удобный вид:

$$P_n = [n^2(I_1 + I_2)^2 + I_1^2 + I_2^2]\frac{r_{eff}l}{12}. \qquad (591)$$

Для случая движения в одну сторону $n+1$ поездов, а в другую — n и при условии периодического чередования числа поездов в том и другом направлении та же формула принимает вид:

$$P_n = \left[\frac{n(n+1)}{n+0{,}5}\left(\frac{n^2}{n+0{,}5} + 1\right)(I_1 + I_2)^2 + I_1^2 + I_2^2\right]\frac{r_{eff}l}{12}. \qquad (592)$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Путем анализа формул (591) и (592) и сопоставления их с рядом частных случаев, представляется возможным прийти к заключению, что для всех случаев двухстороннего питания пригодна универсальная формула:

$$P_n = (\Delta i^2 l^2 + I_1^2 + I_2^2)\frac{r_{eff} l}{12}. \qquad (593)$$

Предлагаемая формула дает исключительно благоприятные результаты. Как было проанализировано автором (Л. 196), ошибку следует считать не выше 1%. Нужно также заметить, что вид этой формулы чрезвычайно удобен для предварительных вычислений. В нее явно не входит количество поездов, приходящихся на каждую подстанцию. Ввиду этого при заданном токе потери в проводах определяются только в функции от расстояний между подстанциями. Последнее обстоятельство дает большие преимущества при выработке методов по подсчету экономических сечений рабочих проводов и экономических расстояний между подстанциями.

При одностороннем питании линии, придерживаясь прежнего метода, для всех видов движения нужно пользоваться формулой:

$$P_n = (2\Delta i^2 l^2 + I^2{}_1 + I_2^2 - I_1 I_2)\frac{r_{eff} l}{6}. \qquad (594)$$

Все формулы по расчету потерь в проводах, так же как и выше разобранные по расчету средних значений падения напряжения, выведены при условии постоянства токов, потребляемых поездами. В действительности это условие, особенно при коротких перегонах, не соблюдается. На таких перегонах, как уже указывалось, в большинстве случаев время работы поезда под током значительно меньше всего времени нахождения на них поезда. При таких условиях потери в проводах, пропорциональные квадратам токов, должны в действительности быть больше тех, которые определяются по выведенным формулам. Это следует из того, что всякое сгущение тока, среднего за данный период, по элементам этого периода неизбежно влечет за собою повышение квадратичного тока, среднего по тому же периоду. Точно установить для указанных случаев поправочные коэфициенты к формулам не представляется возможным, так как на эти коэфициенты, помимо соотношений между T_a и T_k, оказывают влияние длины отдельных перегонов и их чередование. Здесь можно дать только ориентировочные коэфициенты, пригодные, вообще говоря, лишь для предварительных расчетов. В качестве таковых, как показывает рассмотрение сущности вопроса, можно брать с достаточной степенью точности те же коэфициенты, что и для поправок в отношении падений напряжения (табл. 87).

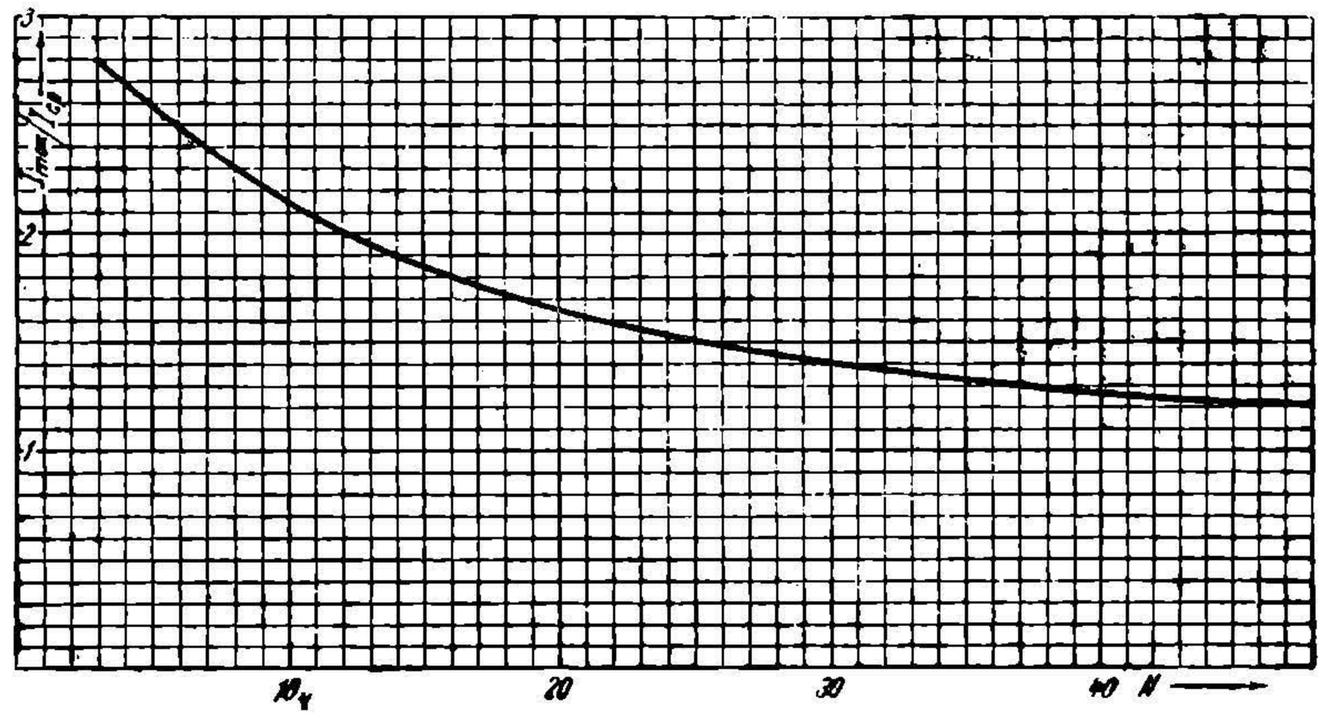


Рис. 661. Эмпирическая кривая отношений наибольших токов к средним для рабочей сети.

Определение наибольшего падения напряжения в рабочей сети. При изложенном расчете рабочей сети некоторое затруднение представляет установление наибольшего падения напряжения. Определять его приходится также приближенным методом. Для этой цели на исследуемом участке линии выбирается такой период движения, когда толчки нагрузки наиболее интенсивны. В этом интервале и устанавливается падение напряжения, причем положение поездов на линии фиксируется по большей части с некоторыми допущениями. Иногда можно применять для наиболее опасных моментов нагрузок метод построения графиков движения, что дает возможность правильней установить взаимное положение поездов и тем самым уточнить расчет.

В случае густого движения иногда рекомендуют пользоваться кривой (рис. 661), дающей соотношение между наибольшим и средним нагрузочным токами, а следовательно и соответствующими падениями напряжения в зависимости от числа поездов, курсирующих на данном участке пути (Л. 1 и 8). Кривая эта введена

НБ УГУНТ (ДІІТ)

в практику расчетов AEG. Составлена она на базе сравнения нормальных соотношений между пусковыми и средними токами потребления в трамвайных условиях движения с последующей затем ее проверкой для ряда реальных установок; кривой этой, естественно, можно пользоваться только при самых ориентировочных расчетах.

Расчет сложных рабочих сетей. В условиях городского движения приходится иметь дело со сложными контурами сетей контактного провода и особенно рельсовых путей, причем нередко контуры проводов и рельсов, находящиеся между питательными и отсасывающими пунктами, не совпадают друг с другом. Для упрощения расчетов часто приходится устанавливать отдельно падение напряжения в контактном проводе и в рельсовом пути. При подобного рода расчетах не нужно упускать из виду того основного требования, чтобы сумма токов, отходящих по питательным проводам для одной и той же подстанции, обязательно равнялась сумме токов, возвращающихся туда по отсасывающим фидерам.

Общие методы расчета положения питательных и отсасывающих пунктов остаются теми же самыми, что и в случае расчета обычных промышленно-осветительных сетей. Главные затруднения здесь заключаются только в установлении величины и положения нагрузок. Некоторое разъяснение данного вопроса может дать анализ вышеприведенных формул (572) и (584). Последние показывают, что в основу определения нагрузочных токов можно положить метод равномерной нагрузки, если пренебречь в этих формулах вторыми членами, стоящими в скобках, что допустимо при большом числе поездов, обычно имеющем место на городских железных дорогах. При таком допущении в рассматриваемом случае сложных сетей можно исходить из эквивалентных линейных нагрузок $\Delta i_э$, определяемых при расчете падения напряжения до токоприемника поезда, по формуле:

$$\Delta i_э = \frac{2}{3}\Delta i \tag{595}$$

и при расчете падения напряжения до точек токораздела по формуле:

$$\Delta i_э = \Delta i. \tag{596}$$

При таких условиях падения напряжения определяется, по общему для равномерно распределенной нагрузки правилу, на основании выражения:

$$\Delta U_{ср} = \frac{\Delta i_э l^2 z}{8}. \tag{597}$$

В эту формулу при определении падения напряжения до токоприемника $\Delta i_э$ нужно определять по формуле (595), а при определении его до токоразделов — по формуле (596).

При установлении падений напряжения в рельсовой сети требуется иметь одинаковый потенциал в отсасывающих пунктах. Если вся сеть питается от одной только подстанции, тогда это достигается по общему правилу расчета без особых дополнительных ограничений. В случае же нескольких подстанций вопрос осложняется. Одинаковый потенциал в отсасывающих пунктах можно получить только при соблюдении определенного правила в отношении расположения пунктов деления сфер действия отдельных подстанций. Если между смежными подстанциями имеется только один делительный пункт, то равенство потенциалов в отсасывающих пунктах может быть получено только при условии, если он поставлен в точке естественного раздела питания. Данная точка определяется по общему правилу расчета, если просчитать распределение токов в линии, соединяющей обе подстанции без разрыва ее в точке делительного пункта, а в предположении, что эта линия питается от одной и другой подстанций, как от обычных питательных пунктов.

Если смежные подстанции имеют по несколько делительных пунктов, то указанное правило их расположения не обязательно. Можно ограничиться только требованием, чтобы к каждой подстанции прилегали такие участки, питающие токи которых были бы в сумме равны тем токам, которые шли бы от этой подстанции, если расположить все делительные пункты в точках естественного раздела питания, определенных как и в предыдущем случае при условии одинакового потенциала всех отсасывающих пунктов (Л. 345).

Таким образом, вопрос об уравнении потенциала отсасывающих пунктов при нескольких подстанциях разрешается только путем правильного выбора положения делительных пунктов. Подрегулировка реостатами в данном случае помочь делу

НБ УрГУНТ (ДІІТ)

не может. Она имеет значение только в отношении регулирования потенциала отсасывающих пунктов, прилегающих к одной подстанции.

Приведенные формулы в случае интенсивного движения дают достаточно надежные результаты. При расчете сети равномерно распределенные токи приходится часто заменять сосредоточенными нагрузками, определяемыми по принципу эквивалентности падения напряжения. Величина эквивалентных нагрузок устанавливается согласно общим методам расчета сетей.

При распределении питательных и отсасывающих пунктов следует стремиться по возможности к симметричному их распределению. Совмещение их не обязательно, но вообще по условиям эксплоатации желательно.

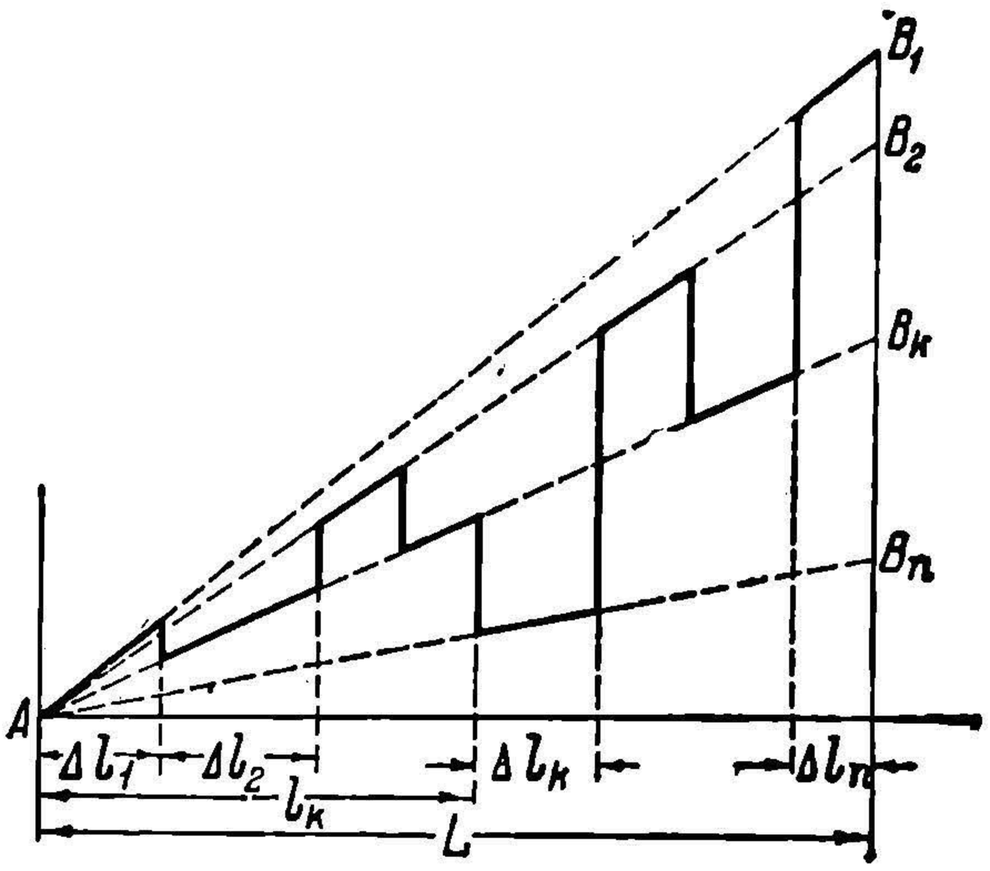


Рис. 662. Диаграмма для определения падения напряжения при одностороннем питании с учетом изломов профиля.

4. Аналитический расчет падения напряжения при учете профиля и изменения скоростей движения.

Предыдущий метод расчета рабочей сети был построен на принятии токов средними за период движения между двумя смежными подстанциями. В реальных условиях профиль местности меняется, а в соответствии с этим изменяются и величины токов по отдельным его элементам. Метод сечения графика движения учитывает указанное. Аналитическое же решение данного вопроса встречает чрезвычайные трудности, и не пользоваться при нем в большей или меньшей степени графиком поездов невозможно.

Решение данного вопроса в общем случае возможно только при условии, если на участках питания находится по одному поезду. Прежде всего рационально разобрать случай одностороннего питания. В этом случае при условии неизменности уклона местности на всем рассматриваемом участке падение напряжения, как это нетрудно сообразить, должно меняться по закону прямой линии. На рис. 662 нанесен ряд прямых линий AB_1, $AB_2 \ldots AB_n$, которые дают зависимость падений напряжения от расстояний по длине участка L при допущении, что уклоны, для которых построены эти прямые, остаются по всей длине неизменными. При выводе расчетных уравнений нужно мысленно разбить весь участок L на n элементов, в пределах которых уклон принимается за постоянный. Пользуясь методом установившихся скоростей для каждого такого элемента Δl_k можно установить, какой на этом участке потребляется ток I_k, какая должна быть на нем скорость движения v_k и сколько требуется времени Δt_k для его прохождения. При переходах поезда с одного элемента профиля на другой падение напряжения будет изменяться, очевидно, по ломаной сплошной линии.

Для каждого элемента профиля среднее падение напряжения может быть выражено так:

$$\Delta U_k = \frac{I_k z}{\Delta l_k} \int_{l_k}^{l_k + \Delta l_k} x dx = I_k z \left(l_k + \frac{\Delta l_k}{2} \right).$$

Среднее же по времени падение для всего участка L определится формулой

$$\Delta U_{ср} = \frac{z}{\sum_{k=1}^{k=n} \Delta t_k} \sum_{k=1}^{k=n} I_k \left(l_k + \frac{\Delta l_k}{2} \right) \Delta t_k. \qquad (598)$$

Таким же образом можно найти и расчетную формулу при питании участка с двух сторон (рис. 663). В данном случае текущее падение напряжения для

НБ УГУНТ (ДІІТ)

каждого уклона выражается законом параболы. Для каждого данного участка среднее падение напряжения должно получить выражение:

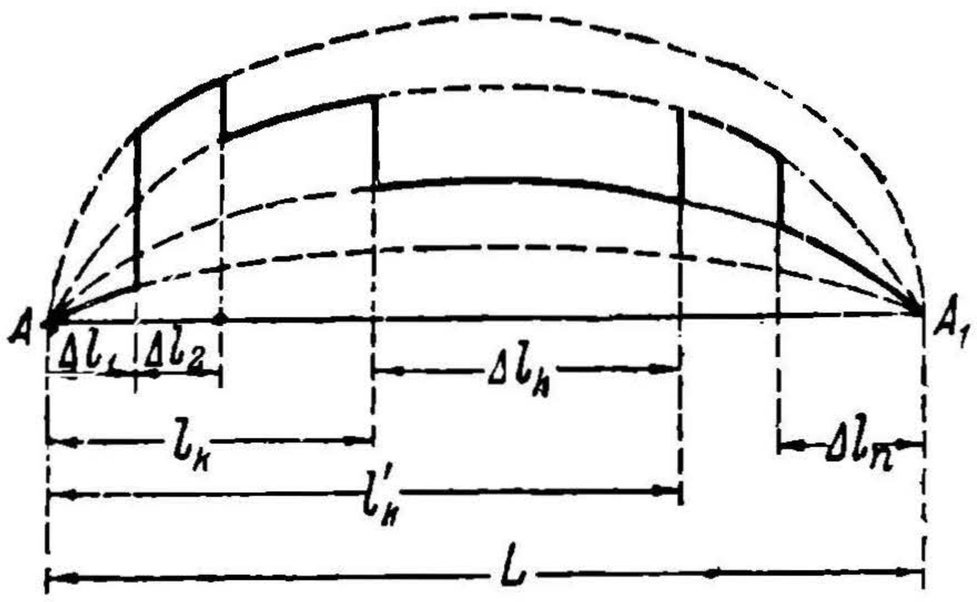


Рис. 663 Диаграмма для определения падения напряжения при двухстороннем питании с учетом изломов профиля.

$$\Delta U_{cp} = \frac{I_k z}{\Delta l_k} \int_{l_k}^{l'_k} \frac{(L-x)\,x\,dx}{L},$$

или

$$\Delta U_{cp} = \frac{I_k z}{\Delta l_k} \left(\frac{l'^2_k - l^2_k}{2} - \frac{l'^3_k - l^3_k}{3L} \right).$$

Отсюда искомое падение напряжения, среднее по времени для всего участка, выражается формулой:

$$\Delta U_{cp} = \frac{z}{\sum_{k=1}^{k=n} \Delta t_k} \sum_{k=1}^{k=n} I_k \left(\frac{l'^2_k - l^2_k}{2} - \frac{l'^3_k - l^3_k}{3L} \right) \frac{\Delta t_k}{\Delta l_k}.$$

Как уже было отмечено, расчет по разобранному методу, когда на один питательный участок приходится больше одного поезда, очень сильно осложняется и требует в том или другом виде применения графика движения поездов. Ввиду этого в подобных случаях лучше пользоваться методом графика в чистом его виде.

Здесь следует отметить работу проф. Минова, в которой дано решение вопроса об учете профиля местности в общем виде. Этот способ базируется на применении к расчету сети принципа определения моментов инерции фигур. Однако, этот метод, представляя несомненный интерес, требует все-таки данных о графиках движения поездов и о кривых потребления ими тока (Л. 290).

5. Применение методов теории вероятности к расчету рабочих сетей.

Как уже отмечалось выше, движение поездов в реальных условиях часто значительно отступает от теоретических графиков движения. Особенно это относится к трамвайному движению. Это обстоятельство вызвало предложение применять к расчету рабочих сетей методы, разрабатываемые теорией вероятности. Первые попытки в этом направлении были сделаны проф. Вульфом. Позже появились работы Костромитина, Зильберталя и Розенфельда (Л. 333, 334 и 291).

Применение методов теории вероятности для расчета падений напряжения и потерь мощности базируется на нижеследующих основных предпосылках. При любом количестве поездов N на линии предполагается, что они могут занимать любое положение вдоль пути и брать любые токи из тех, какие для них возможны. При этом делаются два основных допущения: первое, что все возможные положения поездов на линии одинаково вероятны, и второе, что все рассматриваемые поезда одного типа.

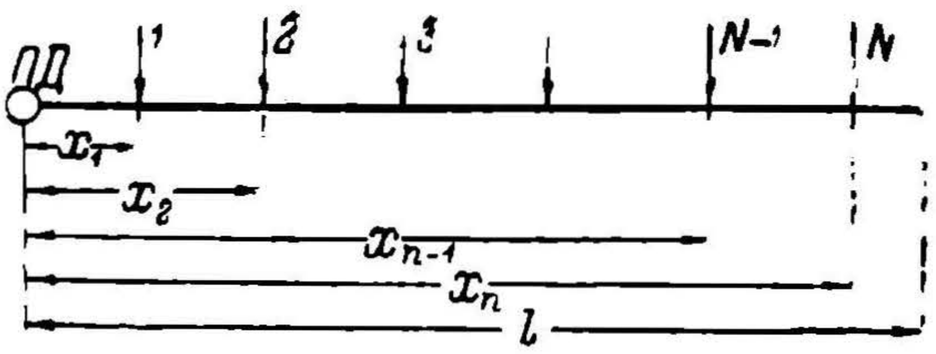


Рис. 664. Схема распределения нагрузок к методу определения падений напряжения по теории вероятности.

Для пояснения соответственного хода рассуждений здесь будет разобран случай определения среднего падения до точки токораздела, т. е. в данном случае до наиболее удаленных поездов, в случае одностороннего питания. Согласно рис. 664 предположено, что на линии, длиною l, имеются N одинаковых поездов, которые, вообще, могут занимать какое угодно положение по отношению друг к другу, но местоположение которых для рассматриваемого момента при $n = N$ определяется значениями:

$$x_1,\ x_2, \ldots x_k, \ldots x_N.$$

Каждый из этих поездов, как уже было отмечено, может потреблять любой возможный для него ток: $I_1,\ I_2, \ldots I_k, \ldots I_N$. Допустим, что общее время нахождения

НБ УДУНТ (ДІІТ)

каждого поезда на рассматриваемом участке равно T. Предположим далее, что согласно кривой расхода тока $I=f(t)$ ток I_1 потребляется поездом в течение времени Δt_1, I_2 — в течение Δt_2 и т. д. При таком условии вероятность, что каждый данный поезд будет потреблять ток I_1, определяется отношением $\frac{\Delta t_1}{T}$, вероятность потребления тока I_2 — отношением $\frac{\Delta t_2}{T}$ и т. д. Зная отдельные токи и вероятность их потребления, можно по правилу теории вероятности установить ожидаемый ток I_0. Для определения его достаточно найти математическое ожидание согласно формуле:

$$I_0 = \sum_{k=1}^{k=N} I_k \frac{\Delta t_k}{T} = I. \tag{600}$$

Как следует из формулы, ожидаться должен ток, равный среднему току потребления на данном участке пути.

При таком условии для любого мгновенного положения поездов согласно рис. 664 падение напряжения до точки раздела — или, в данном случае, до наиболее удаленного от питательного пункта поезда — определится выражением:

$$\Delta U = [I(x_N - x_{N-1}) + 2I(x_{N-1} - x_{N-2}) + \ldots + I(N-1)(x_2 - x) + INx_1]z$$

или

$$\Delta U = Iz \sum_{k=1}^{k=N} x_k. \tag{601}$$

Какова же вероятность данного падения напряжения? Для ее установления сначала нужно определить вероятность W_n, взятого положения поездов на линии. Очевидно, что вероятность нахождения первого поезда на расстоянии x_1 от питательного пункта определится отношением $\frac{dx_1}{l}$, второго на расстоянии x_2 — отношением $\frac{dx_2}{l}$ и т. д. Вероятность же, что поезда одновременно могут занять принятые положения, должна определиться произведением отдельных вероятностей:

$$W_n = \frac{dx_1 dx_2 \ldots dx_N}{l^N}. \tag{602}$$

Нетрудно заметить, что искомая вероятность полученного по формуле падения напряжения больше только что найденной W_n. В самом деле, то же самое падение напряжения может возникнуть, если поменяются местами поезда *1* и *2*, поезда *1* и *3*, поезда *2* и *3* и т. д. Очевидно, что вероятность полученного падения напряжения больше вероятности принятого положения поездов в число раз, равное количеству перестановок из числа поездов N. Отсюда вероятность найденного падения напряжения определяется выражением:

$$W_{\Delta u} = W_n N!$$

Теперь уже легко найти и конечную искомую величину — ожидаемое падение напряжений до точки токораздела или, в данном случае, ожидаемое падение напряжения до наиболее удаленного поезда. Для этого на базе мгновенного значения напряжение ΔU и вероятности его наличия достаточно определить математическое ожидание, которое и будет соответствовать искомой величине среднего падения напряжения. По общему правилу теории вероятности для данного случая математическое ожидание определится формулой:

$$\Delta U_{cp} = \frac{Iz}{l^N} \int_0^l dx_N \int_0^{x_N} dx_{N-1} \ldots \int_0^{x_2} dx_1 \sum_{k=1}^{k=N} x_k. \tag{603}$$

После последовательного интегрирования получается

$$\Delta U_{cp} = \frac{N!}{(N-1)!} \frac{l^{N+1}}{2l^N} Iz$$

или

$$\Delta U_{cp} = \frac{INzl}{2}. \tag{604}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

По изложенному принципу можно определить падения напряжения при двухстороннем питании. Точно так же можно установить падения напряжения до токоприемника, учитывая только время нахождения поезда под током. Представляется также возможным определить и потери мощности в проводах. Все формулы для вычисления указанных величин выведены проф. Розенфельдом (Л. 291). Они приведены в табл. 88. Следует иметь в виду, что коэфициенты, фигурирующие в формулах, подчинены отношениям:

$$a = \frac{T_k}{T_a}$$

и σ — относительное средне-квадратичное отклонение:

$$\sigma^2 = \frac{I_\theta^2 - I^2}{I^2},$$

где I_θ — средний квадратичный ток поезда.

ТАБЛИЦА 88.

Падения напряжения в рабочей сети по методу теории вероятности.

№№	Наименование	Формулы для определения падения напряжения и потерь мощности
1	Среднее падение напряжения до токораздела при одностороннем питании	$\frac{IzlN}{2}$
2	Среднее падение напряжения до токоприемника за все время работы поезда при одностороннем питании	$\frac{IzlN}{3}\left(1+\frac{1}{2N}\right)$
3	Среднее падение напряжения до токоприемника за время хода под током при одностороннем питании	$\frac{IzlN}{3}\left(1+\frac{3a-2}{2N}\right)$
4	Средняя потеря мощности при одностороннем питании	$\frac{I^2 r_{eff}\, lN^2}{3}\left(1+\frac{1+3\sigma^2}{2N}\right)$
5	Среднее падение напряжения до токораздела при двухстороннем питании	$\frac{IzlN}{8}\left(1+\frac{1}{3N}\right)$
6	Среднее падение напряжения до токоприемника за все время работы поезда при двухстороннем питании	$\frac{IzlN}{12}\left(1+\frac{1}{N}\right)$
7	Среднее падение напряжения до токоприемника за время хода под током при двухстороннем питании	$\frac{IzlN}{12}\left(1+\frac{2a-1}{N}\right)$
8	Средняя потеря мощности при двухстороннем питании	$\frac{I^2 r_{eff}\, lN^2}{12}\left(1+\frac{1+2\sigma^2}{N}\right)$

При выводе разобранного выше метода теории вероятности пришлось по самой его сущности исходить из принципа одинаковой вероятности всех возможных положений поездов. Это положение, естественно, должно ограничить область применения данного метода. Нужно иметь в виду, что всякое железнодорожное движение — и, в частности, даже трамвайное, имеет определенный характер. Отступления от теоретического графика в реальных условиях конечно, неизбежны. Однако, характер этих отступлений иного порядка, нежели предполагаемый теорией вероятности. Например, случай скопления поездов в одной точке пути при большом количестве их и одновременном потреблении всеми ими тока практически трудно себе представить даже в катастрофических случаях. Особенно приходится обратить внимание на указанное потому, что в расчет нормальной работы сети нельзя вводить случаи катастрофического порядка.

По своей сущности метод теории вероятностей наиболее приемлем для линий с особо беспорядочным движением. Такими линиями могут являться трамвайные магистрали, в которые вливаются поезда с прилегающих участков.

6. Определение постоянных рабочей сети.

Определение активных сопротивлений рабочей сети. Для определения падения напряжения согласно выведенным выше формулам необходимо знать сопротивление линии z, которое в общем случае может состоять из активной и реактивной составляющих.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

При постоянном токе приходится считаться только с омическим сопротивлением. При переменном вопрос осложняется. С одной стороны, здесь необходимо учитывать согласно общим законам повышение омического сопротивления, с другой стороны, необходимо считаться с появлением реактивных составляющих.

У проводов, выполняемых из меди и ее сплавов, при тех сечениях, которые применяются для контактных проводов, активное сопротивление при постоянном и переменном токе практически является одним и тем же. Опыты Lichtenstein'a, произведенные с проводом сечением в 100 mm², показали, что в пределах частот от 15 до 50 Hz сопротивление практически не отличается от такового же при постоянном токе.

Несколько иначе дело обстоит с проводами и тросами, выполняемыми из стали. У них при переменном токе сопротивления ощутительно выше, чем при постоянном токе. По данным Zickler'a коэфициент увеличения сопротивления α при переменном токе можно определить по формулам:

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= 1 + 0{,}84k^4 \ldots \text{ для } k \leqslant 1 \\ \alpha &= 0{,}758 + \sqrt{1{,}34k^2 - 0{,}183} \ldots \text{ для } k \geqslant 1 \text{ до } k = 3 \\ \alpha &= 0{,}758 + 1{,}159k \ldots \text{ для } k \geqslant 3 \end{aligned}\right\}, \tag{605}$$

где $\alpha = \frac{\text{сопротивление при переменном токе}}{\text{сопротивление при постоянном токе}}$ и

$$k = 0{,}0005d\sqrt{\frac{\nu\mu}{\rho}}.$$

В последнем выражении d — диаметр провода в mm, ν — частота, μ — магнитная проницаемость и ρ — удельное сопротивление.

Для ориентировочных подсчетов можно также пользоваться формулой:

$$r_{eff} = \frac{7{,}5}{d}\sqrt{\nu}\ \Omega/\text{km}. \tag{606}$$

Значительно более трудная задача — определять активные сопротивления рельсов, так как здесь, помимо самих рельсов, приходится учитывать сопротивления стыков. Сопротивление самих рельсов по большей части определяется в зависимости от весового показателя G_p, дающего вес одного метра рельсов в kg. Согласно общей формуле сопротивление рельса можно выразить формулой:

$$r_p = \frac{1000\rho}{Q}\ \Omega/\text{km}.$$

Весовой показатель:

$$_p = 0{,}001\gamma\, Q \text{ kg}.$$

Из последних двух формул:

$$r_p = \frac{\gamma\rho}{G_p}. \tag{607}$$

Имея формулу (607), теперь нужно только установить величины удельного веса γ и удельного сопротивления ρ. В отношении первой величины особых сомнений не возникает. Ее можно принять равной общеизвестной величине 7,8. В отношении же установления ρ приходится весьма считаться с составом материала рельсов. Табл. 89 дает представление о материале для третьего контактного рельса и о влиянии его состава на удельное сопротивление.

ТАБЛИЦА 89.

Характеристика материалов контактного рельса.

Состав материала в процентах и удельное сопротивление	Manhattan ж. д.	New-York Cen. ж. д.	Hudson ж. д.
Углерода	0,073	0,10	0,090
Марганца	0,340	0,60	0,440
Серы	0,073	0,05	0,080
Фосфора	0,069	0,10	0,088
Удельное сопротивление	0,135	0,14	0,128

ЯНБ УДУНТ (ДІІТ)

Для характеристики ходовых рельсов может служить табл. 90, в которой приведены данные о русском рельсе типа II*a*. Удельное сопротивление американских рельсов получается около 0,215. Если принять ρ в среднем около 0,195 и γ равным 7,8, то формула (607) примет вид:

$$r_p = \frac{1{,}5}{G_p}\ \Omega/\text{km}. \qquad (608)$$

ТАБЛИЦА 90.
Данные рельса типа II*a*.

Состав материала	%
Марганца .	0,73—1,12
Серы .	0,03—0,11
Кремния	0,08—0,20
Углерода .	0,39—0,55
Фосфора	0,02—0,04
Удельное сопрот. .	0,19—0,22

Очень неопределенно решается вопрос о сопротивлении стыков. Как показывают опыты, сопротивление это в общем случае складывается из сопротивлений соединительного стыкового кабеля и поверхностей контакта присоединения его к телу рельсов. В эксплоатационных условиях контактное сопротивление получается очень значительным, в среднем — такого же порядка как и соединительного кабеля. В некоторых же случаях оно может и далеко его превосходить. По данным американских опытов, как указывает Poschenrider, сопротивления стыков для трамваев колеблются от 2×10^{-5} до $9 \times 10^{-5}\Omega$. Lichtenstein, экспериментируя в условиях открытого полотна железнодорожного типа, пришел к цифре в 1,1 $10^{-4}\Omega$. Без стыковых же соединений эта цифра поднимается до 6,1 $10^{-4}\Omega$. Следует обратить внимание на то, что в условиях эксплоатации, когда, вследствие ржавчины, поверхности контактов начинают играть все большую роль, опыты отмечают относительно небольшое изменение общего сопротивления стыка, даже если сечения соединительных кабелей меняются в таких пределах, как от 50 до 100 mm².

Для расчета сопротивления рельсового пути, состоящего из N_p ниток рельсов и при n стыках на километр можно пользоваться формулой:

$$r_p = \left(\frac{1{,}5}{G_p} + 1{,}1n\,10^{-4}\right)\frac{1}{N_p}. \qquad (609$$

Заметим, что эта формула приложима только к стыковым соединениям, соединяемым с рельсами путем расклепки или развальцовки их головок. В случае же приварки головок к рельсу сопротивление стыкового соединения определяется только соединительным кабелем. При сварных стыках сопротивлением их можно вообще пренебрегать.

При переменном токе сопротивление рельсов сильно возрастает. Опыты Lichtenstein'a показали, что сопротивление рельсов при переменном токе сильно возрастает с увеличением частоты и увеличением сечения рельсов. Для учета влияния переменного тока предлагалось много различных формул. В частности Zickler применительно к приведенным выше формулам (605) для рельсов предлагает коэфициент k определять из выражения:

$$k = 0{,}002\,\frac{Q}{p}\sqrt{\frac{\nu\mu}{\rho}}, \qquad (610)$$

где Q — сечение рельса в mm² и p — периметр в mm.

Особого внимания заслуживает формула Hüldschiner'a, выведенная из опытов Lichtenstein'a применительно к одной нитке рельсов:

$$r_{eff} = \frac{1{,}5}{G_p} + \frac{Q\nu}{\cdot 1{,}4 \times 10^6}\ \Omega/\text{km}.$$

Результаты опытов Lichtenstein'a можно охватить формулой

$$r_{eff} = \frac{1{,}5}{G_p} + (\nu G_p + 3{,}7n)\ 10^{-4}\Omega/\text{km}. \qquad (611)$$

В эту формулу введено влияние стыков, сопротивление которых взято по последним литературным данным для переменного тока (Л. 296). Без стыковых соединений сопротивление стыков ориентировочно можно принимать для каждой нитки рельсов равным 0,1 Ω/km.

В Германии довольно сильно распространена для определения сопротивления рельсов приближенная эмпирическая формула:

$$r_{eff} = \frac{26\sqrt{\nu}}{p}\ \Omega/\text{km}. \qquad (612)$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Определение реактивных составляющих сопротивления рабочей сети. При переменном токе, помимо активных сопротивлений, необходимо считаться с реактивными. Реактивные составляющие падений напряжения получаются от индуктивного действия проводов, причем в условиях рабочей сети, с одной стороны, ввиду относительно небольших напряжений, с другой — ввиду больших токов приходится считаться практически только с электромагнитной индукцией. При наличии контура с током, в данном случае состоящего из контактного провода и рельсов, получается магнитный поток, пронизывающий этот контур. Этот поток при переменном токе индуктирует в своем контуре э. д. с. самоиндукции, а воздействуя на другие контуры, создает в них э. д. с. взаимоиндукции. В случае нескольких контуров с переменным током, они оказывают взаимное индуктивное влияние друг на друга. В результате получается э. д. с., являющаяся источником реактивного падения напряжения.

При определении реактивных составляющих падений напряжений можно пользоваться известной формулой Maxwell'a. Однако эта формула практически приложима, главным образом, к простейшим одноконтурным системам. Пользоваться ею при большом количестве проводов, принадлежащим различным контурам,— задача очень сложная. Ввиду этого Behn Eschenbourg уже в 1904 году предложил для расчета реактивных падений напряжения принцип „отдельных" проводов. Этот метод сначала встретил многих противников. Даже такие видные электротехники, как Emde, доказывали абсурдность этого принципа, исходя из положения, что в природе нет „отдельных" проводов, а есть только контуры с прямыми и обратными проводами. И только после трудов Guttsmann'a и особенно Sumec'a этот метод получил полное право гражданства.

Согласно данной теории, коэфициент взаимоиндукции между двумя „отдельными" проводами, идущими параллельно на расстоянии l и находящимися друг от друга на расстоянии a_{12}, определяется выражением:

$$M_{12} = 2\left(\ln\frac{2l}{a_{12}} - 1\right)10^{-4}\text{H/km}. \qquad (613)$$

Таким же образом коэфициент самоиндукции „отдельного" провода:

$$L = 2\left(\ln\frac{2l}{R} + 0{,}25\mu - 1\right)10^{-4}\text{H/km}. \qquad (614)$$

В последнем выражении μ означает эквивалентную магнитную проницаемость провода, а R — радиус его периферии в cm. Если периферия провода не окружность, то под R нужно подразумевать радиус окружности круга, равного по площади сечению данного провода.

Значительные затруднения представляет определение магнитной проницаемости μ. Для меди, алюминия и бронзы, собственно, вопрос решается очень просто, так как для этих металлов ее можно принимать равной единице. Но для стали и железа величина μ очень сильно колеблется. Помимо состава материала и степени его насыщения, как показывают опыты, на магнитную проницаемость оказывает большое влияние величина и конфигурация сечения провода. Например, по опытам Lichtenstein'a для круглого сечения в 700 mm^2 при $\nu = 25$Hz и $I = 100$A получалось $\mu = 77{,}5$. Между тем, как для нормального рельса при тех же ν и I значение μ опускалось до 15. При расчете рабочей сети определение магнитной проницаемости особенно важно для рельсов.

На основании опытов Lichtenstein'a Huldschiner рекомендует при $\nu \leqslant 50$ Hz для рельсов применять формулу:

$$\mu = 25 - \frac{\nu}{2{,}8}, \qquad (615)$$

для железных же проводов и тросов:

$$\mu = 200 - 2\nu. \qquad (616)$$

7. Особенности расчета рабочей сети при переменном токе.

Рабочая сеть однофазного тока. Ход расчета реактивных сопротивлений рабочей сети при однофазном токе можно проследить, исходя из схемы проводов, приведенной на рис. 665 и взятой применительно к дороге однофазного тока.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Реактивное падение напряжения для „отдельного“ провода на один километр линии, по схеме рис. 665, согласно общим правилам теоретической электротехники может быть изображено в виде:

$$\Delta\bar{U}'_x = 2\pi\nu(\bar{I}_a L_a + \bar{I}_A M_{aA} + \bar{I}_B M_{aB} + \bar{I}_b M_{ab}). \qquad (617)$$

По такому же правилу только путем взаимного перемещения индексов можно определить падение напряжения и для любого другого провода.

В случае однофазного тока для практических целей можно принимать векторы токов отдельных проводов совпадающими во времени. В пространстве же токам различных направлений необходимо приписывать разные знаки. В разбираемом примере предполагается токам в контактном проводе и в фидере условно приписать знак плюс, а токам в ходовых рельсах — знак минус, причем токи прямого и обратного направления должны быть связаны равенством:

$$I_a + I_b = I_A + I_B.$$

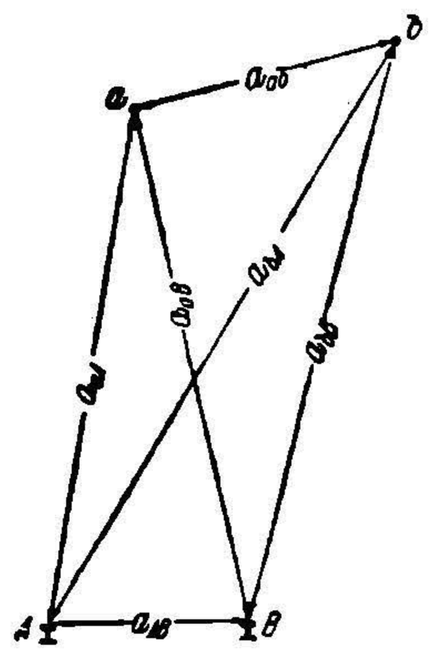


Рис. 665. Схема рабочей сети однопутной электрической железной дороги с фидером.

При сделанных предположениях выражение (617) может быть представлено формулой:

$$\Delta U'_x = 4\pi\nu\left[I_a\left(\ln\frac{2l}{R_a} + 0{,}25\mu_a - 1\right) - I_A\left(\ln\frac{2l}{a_{aA}} - 1\right) - I_B\left(\ln\frac{2l}{a_{aB}} - 1\right) + I_b\left(\ln\frac{2l}{a_{ab}} - 1\right)\right]10^{-4}\ \text{V/km},$$

или кратко:

$$\Delta U'_x = 2\pi\nu L_e I_a \qquad (618)$$

Здесь L_e означает эквивалентный коэфициент самоиндукции, определяемый выражением:

$$L_e = 2\left(\ln\frac{\frac{I_A}{I_a}\ \ \frac{I_B}{I_a}}{\frac{a_{aA}}{R_a}\ \ \frac{a_{aB}}{a_{ab}}\ \ \frac{I_b}{I_a}} + 0{,}25\mu_a\right)10^{-4}\ \text{H/km}. \qquad (619)$$

Разобранный частный случай легко развить в общий, когда имеются a, b, $c,\ldots k,\ldots n$ прямых проводов и A, B, $C,\ldots K,\ldots N$ обратных. Общее выражение для любого провода прямого направления с номером k можно представить в виде:

$$L_e = 2\left(\ln\frac{\frac{I_A}{I_k}\ \ \frac{I_B}{I_k}\ \ \frac{I_K}{I_k}\ \ \frac{I_N}{I_k}}{\frac{a_{kA}}{I_a}\ \ \frac{a_{kB}\ldots a_{kK}\ldots\ldots a_{kN}}{I_b}\ \ \frac{}{I_n}} + 0{,}25\mu_k\right)10^{-4}\ \text{H/km}. \qquad (620)$$

$$\frac{}{I_k}\ \ \frac{}{I_k}\ \ \frac{}{I_k}\ \ \frac{}{I_k}$$
$$a_{ka}\ \ a_{kb}\ldots R_k\ldots\ldots a_{kn}$$

Аналогичное выражение для обратных проводов:

$$L_e = 2\left(\ln\frac{\frac{I_a}{I_K}\ \ \frac{I_b}{I_K}\ \ \frac{I_k}{I_K}\ \ \frac{I_n}{I_K}}{\frac{a_{Ka}}{I_A}\ \ \frac{a_{Kb}\ldots a_{Kk}\ldots a_{Kn}}{I_B}\ \ \frac{}{I_N}} + 0{,}25\mu_K\right)10^{-1}\ \text{H/km}. \qquad (621)$$

$$\frac{}{I_K}\ \ \frac{}{I_K}\ \ \frac{}{I_K}\ \ \frac{}{I_K}$$
$$a_{KA}\ \ a_{KB}\ldots R_K\ldots a_{KN}$$

На основании приведенных выражений полное реактивное падение напряжения в разбираемой системе (рис 665), определяемое по какой-либо из имеющихся в ней замкнутых петель, например по петле из контактного провода и одного рельса, должно получить форму:

$$\Delta U_x = 4\pi\nu\left[I_a\left(\ln\frac{\frac{I_A}{I_a}\ \ \frac{I_B}{I_a}}{\frac{a_{aA}}{R_a}\ \ \frac{a_{aB}}{a_{ab}}\ \ \frac{I_b}{I_a}} + 0{,}25\mu_a\right) + I_A\left(\ln\frac{\frac{I_a}{I_A}\ \ \frac{I_b}{I_A}}{\frac{a_{Aa}}{R_A}\ \ \frac{a_{Ab}}{a_{AB}}\ \ \frac{I_B}{I_A}} + 0{,}25\mu_A\right)\right]10^{-4}\ \text{V/km}. \qquad (622)$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

При суммировании падений напряжения в прямых и обратных проводах следует брать, как это и сделано в выражении (622), арифметическую сумму этих падений, не считаясь со знаком минус перед падением напряжения в рельсах, так как этот знак возник в результате условно приписываемого токам отрицательного значения.

Ввиду несколько отличающихся друг от друга коэфициентов самоиндукции обоих рельсов и в целях приведения токов в них к одной и той же величине, в формуле (621) целесообразно брать значения L_b для рельсов как средне-арифметические из коэфициентов самоиндукции обоих рельсов. При сделанных предположениях, беря для примера частный случай

$$I_a = I_b = I_A = I_B \text{ и } \mu_a = 1,$$

можно представить реактивное сопротивление рассматриваемой цепи с отнесением его к току I_a в виде:

$$x = 4\pi\nu \left[\ln \frac{a^2_{aA} a_{aB} \sqrt{a_{bA} a_{bB}}}{R_a R_A a_{ab} a_{AB}} + 0{,}25\,(1 + \mu_A) \right] 10^{-4} \Omega/\text{km}. \qquad (623)$$

Для нормальной однопутной железной дороги без фидеров при $I_a = 2I_A = 2I_B$ $a_{aA} = a_{aB} = a$ и $a_{AB} = b$ то же сопротивление:

$$x = 4\pi\nu \left[\ln \frac{a^2}{R_a \sqrt{R_A b}} + 0{,}25\,(1 + 0{,}5\mu_A) \right] 10^{-4} \Omega/\text{km}. \qquad (624)$$

Для двухпутной дороги в общем случае (рис. 666), с отнесением попрежнему сопротивления к току I_a при обозначениях

$$\alpha = \frac{I_p}{I_a} \text{ и } \beta = \frac{I_b}{I_a}:$$

$$x = 4\pi\nu \left[\ln \frac{a^{2\alpha + \frac{\beta+1}{2}} a_{aC}^{\alpha + \frac{\beta+1}{4}} a_{aD}^{\alpha + \frac{\beta+1}{4}}}{R_a R_A^{\alpha} b^{\alpha} c^{\alpha+\beta} m^{\frac{\alpha}{2}} (c+b)^{\frac{\alpha}{2}}} + 0{,}25\,(1 + \alpha\mu_A) \right] 10^{-4} \Omega/\text{km}. \qquad (625)$$

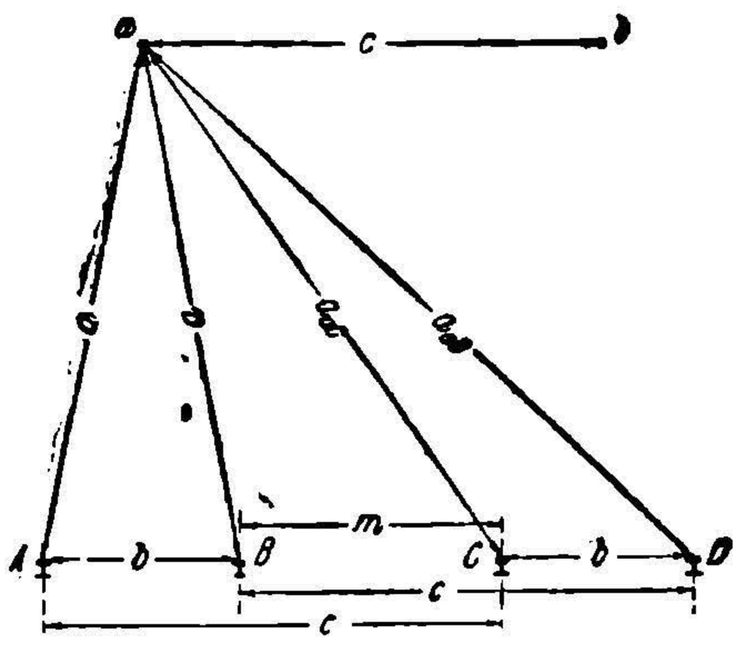


Рис. 666. Схема рабочей сети двухпутной электрической железной дороги.

Здесь I_a и I_b представляют токи в контактных проводах одного и другого направления, а I_p — ток в рельсах, причем принята одинаковая его величина для каждой из четырех ниток.

Определив активное и реактивное сопротивления одного километра рабочей сети, можно установить полное сопротивление на основании общего правила:

$$z = \sqrt{r^2_{eff} + x^2}\ \Omega/\text{km}. \qquad (626)$$

При определении падения напряжения следует ставить полученное значение для z в выведенные выше формулы падений напряжения. Однако, при таком методе необходимо правильно определять токи I_a, I_p, I_b, входящие в формулы реактивных сопротивлений. Все эти формулы составлялись с отнесением сопротивлений к току I_a, т. е. к току в контактном проводе, который выносился за скобки, в результате чего формула для падений напряжения должна иметь вид:

$$\Delta U_{cp} = I_a z l. \qquad (627)$$

В данную формулу входит ток, имеющийся в контактном проводе. В общем случае при движении поездов, как это, например, видно из рис. 656, распределение токов в рабочей сети непрерывно меняется. При выводе всех формул для падений напряжений (572), (573) и пр. это изменение учитывалось. Если все эти формулы свести в одно выражение, то последнее можно представить в виде:

$$\Delta U_{cp} = k_l I z l. \qquad (628)$$

Сопоставляя полученное выражение с формулой (627), можно констатировать, что в общем случае движения поездов ток I_a должен быть эквивалентен члену

НБ УДУНТ (ДІІТ)

$k_l I$. Очевидно, в данном случае коэфициент k_l будет учитывать влияние изменения тока I_a, обусловленного как передвижением поездов, так и числом поездов на линии. Таким образом, вопрос об определении тока I_a (а там, где это требуется и тока I_p) сводится к установлению коэфициентов k_l согласно формулам (572) и (573). В соответствии с этим для однопутных железных дорог при двухстороннем графике имеет место соотношение:

$$I_a = 2I_p = k_l I = \frac{1}{6}\left(\frac{\Delta l l}{2I} + \frac{1}{N}\right) I. \tag{629}$$

Для однопутных дорог с односторонним движением:

$$I_a = 2I_p = k_l I = \frac{N^2+1}{12N} I. \tag{630}$$

Для двухпутных дорог с параллельным соединением обоих контактных проводов:

$$I_a = 2I_p = k_l I = \frac{1}{12}\left(\frac{\Delta i l}{2I} + \frac{1}{N}\right) I. \tag{631}$$

Значительно сложнее дело обстоит при отсутствии параллельного электрического соединения между контактными проводами. Тогда распределение токов в отдельных проводах и в рельсах в общем случае неодинаково. Для примера на рис. 667 представлен один из простейших случаев распределения токов, когда имеется по одному поезду на каждый путь, взятых в точках b и c, при условии равенства токов, ими потребляемых. При определении активных падений напряжений можно оперировать с каждым контактным проводом и рельсами отдельно. Для каждого контактного провода можно применять формулу для одностороннего движения (573), а для рельсов — двухстороннего движения при параллельном соединении проводов (572). При определении же реактивных падений напряжений из-за неодинакового распределения токов по отдельным участкам линии картина весьма осложняется. При определении реактивных составляющих нельзя рассматривать провода независимо друг от друга. В частности, если обратиться к рис. 667, то при установлении активного падения напряжения не важно то, что на участке bc токи в проводах сдвинуты в пространстве под углом 180°, так как падение в каждом проводе определяется независимо от падения в другом. Для определения же реактивных составляющих это обстоятельство имеет существенное значение. В данном случае индуктивные эффекты проводов действуют навстречу друг другу. Если бы токи в этих проводах, как это нормально бывает при параллельном соединении обеих контактных линий, шли в одну сторону, то индуктивные их эффекты складывались бы.



Рис. 667. Схема распределения токов в контактных проводах и рельсах для двухпутной дороги при изолированных проводах каждого пути друг от друга.

Точный учет индуктивного влияния при раздельном питании проводов отдельных путей представляет очень большие трудности. Ввиду этого, здесь допустимо пойти на некоторые допущения. Идя на некоторый расчетный запас, можно падения напряжения, как активное, так и реактивное, определять для контактных проводов по формуле раздельного питания, а для рельсов — по формуле электрически связанного питания. При таком условии для контактных проводов:

$$I_a = k_l I = \frac{N^2_a + 1}{12N_a} I \tag{632}$$

и для рельсов

$$I_p = k_l I = \frac{1}{24}\left(\frac{\Delta i l}{2I} + \frac{1}{N}\right) I. \tag{633}$$

В формулах (632) и (633) N означает попрежнему общее количество поездов между смежными подстанциями или питательными пунктами, а N_a — число поездов, которое питается от того контактного провода, для которого определяется падение напряжения. Следует также напомнить, что токи I, фигурирующие во всех форму-

НБ УГУНТ (ДИИТ)

лах, определяющих падение напряжения, соответствуют средним нагрузочным токам для поездов того направления, для которого определяется падение напряжения. При рекуперации, как и раньше, перед рекуперируемыми токами нужно ставить знак минус.

Вышеприведенные формулы для определения токов I_a относятся к двухстороннему питанию. По такому же принципу их можно определить и для одностороннего питания, но только для данного случая нужно пользоваться не формулами (572) и (573), а (577) и (578).

Особенности расчета рабочей сети трехфазного тока. При трехфазном токе методика расчета падения напряжения остается той же самой, как и при однофазном. Осложнения здесь заключаются только в том, что вместо арифметического или алгебраического сложения и вычитания приходится иметь дело с геометрическими выкладками, так как токи в отдельных проводах системы имеют различные фазы. Ход расчета падений напряжения при трехфазной системе можно видеть из нижеприводимого примера применительно к нормальной одноколейной железной дороге (рис. 668).

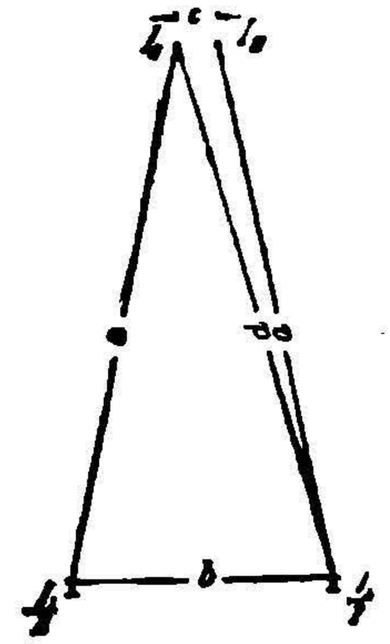


Рис. 668. Схема рабочей сети при трехфазной тяге.

Реактивное падение напряжения в каждом рельсе:

$$\Delta\bar{U}'_x = 4\pi\nu\left[\frac{\bar{I}_I}{2}\left(\ln\frac{2l}{R_I}+0{,}25\mu_I-1\right)+\frac{\bar{I}_I}{2}\left(\ln\frac{2l}{b}-1\right)+\right.$$
$$\left.+\bar{I}_{II}\left(\ln\frac{2l}{a}-1\right)+\bar{I}_{III}\left(\ln\frac{2l}{d}-1\right)\right]10^{-4}\ \text{V/km}.$$

То же и в контактном проводе:

$$\Delta\bar{U}''_x = 4\pi\nu\left[\bar{I}_{II}\left(\ln\frac{2l}{R_{II}}+0{,}25\mu_{II}-1\right)+\bar{I}_{III}\left(\ln\frac{2l}{c}-1\right)+\right.$$
$$\left.+\frac{\bar{I}_I}{2}\left(\ln\frac{2l}{a}-1\right)+\frac{\bar{I}_I}{2}\left(\ln\frac{2l}{d}-1\right)\right]10^{-4}\ \text{V/km}.$$

Отсюда падения напряжения для петель, состоящих из рельсов и каждого контактного провода, при допущении $a=d$:

$$\Delta\bar{U}_{x\,I\,II}=\Delta\bar{U}_{x\,I\,III}=4\pi\nu\left[\bar{I}_I\left(\ln\frac{a^2}{c\sqrt{R_I b}}+\frac{\mu}{8}\right)-\bar{I}_{II}\left(\ln\frac{c}{R_{II}}+0{,}25\right)\right]10^{-4}\ \text{V/km}. \qquad (634)$$

Таким же самым образом падение напряжения в петле контактных проводов:

$$\Delta\bar{U}_{x\,II\,III}=4\pi\nu\left[\ln\frac{c}{R_{II}}+0{,}25\right](\bar{I}_{II}-\bar{I}_{III})\,10^{-4}\ \text{V/km}. \qquad (635)$$

В приведенных формулах (634) и (635) сложение и вычитание отдельных членов, зависящих от токов, следует производить, как было уже указано, геометрическим путем, причем соотношения между токами отдельных фаз должны подчиняться основному закону трехфазной цепи:

$$\bar{I}_I+\bar{I}_{II}+\bar{I}_{III}=0.$$

Полное падение напряжения в рассматриваемых петлях, учитывая активные и реактивные сопротивления цепи, можно определить выражениями:

$$\Delta\bar{U}_{I\,II}=\Delta\bar{U}_{I\,III}=\bar{I}_I z_I-\bar{I}_{II}z_{II}\ \text{V/km}, \qquad (636)$$

$$\Delta\bar{U}_{II\,III}=(\bar{I}_{II}-\bar{I}_{III})\,z_{II}\ \text{V/km}. \qquad (637)$$

Здесь приняты обозначения:

$$z_I=\sqrt{r^2_{eff}+\left(\frac{4\pi\nu}{10^4}\right)^2\left(\ln\frac{a^2}{c\sqrt{R_I b}}+\frac{\mu}{8}\right)^2};$$

$$z_{II}=z_{III}=\sqrt{r^2_{eff}+\left(\frac{4\pi\nu}{10^4}\right)^2\left(\ln\frac{c}{R_{II}}+0{,}25\right)^2} \qquad (638)$$

В качестве расчетного падения напряжения допустимо принимать среднее арифметическое из падений напряжений между отдельными фазами:

$$\Delta U=\frac{\Delta U_{I\,II}+\Delta U_{II\,III}+\Delta U_{I\,III}}{3}. \qquad (639)$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Для многопутных дорог, а также при наличии фидеров, метод расчета падения напряжения остается, по существу, тем же самым.

Абсолютные значения токов I_I, I_{II} и I_{III}, как и при однофазной системе, следует определять, исходя из средних токов соответствующих фаз поездов, с введением вышеприведенных коэфициентов k_t.

Правила определения напряжения у токоприемника поезда. Очень важным вопросом при расчете сетей переменного тока является правильное определение величины напряжения у токоприемника поезда. Точно его можно найти путем геометрического вычитания падения напряжения в линии из напряжения у подстанции.

Однако, такой метод требует большой затраты работы. В некоторых случаях можно ограничиваться арифметическою разностью. Величину ошибки можно видеть из значения коэфициента δ, определяющего отношение потери напряжения к падению напряжения, причем под потерей напряжения, как известно, следует подразумевать абсолютную разность между напряжением у подстанции и у токоприемника. Для средней нагрузки рабочей сети, по данным Hüldschiner'a, при $\nu = 16^2/_3$ с переходом от сечения провода $Q = 50$ mm² к $Q = 150$ mm² коэфициент δ изменяется от 1 до 0,79. Для $\nu = 50$ Hz с переходом от $Q = 50$ mm² к $Q = 250$ mm² δ изменяется от 0,8 до 0,64. При предварительных подсчетах напряжения у токоприемника поезда можно исходить из арифметической разности, вводя указанный поправочный коэфициент. Для этой цели вычисленное полное падение напряжения сети нужно умножить на соответственную величину δ и арифметически вычесть полученное значение из напряжения на подстанции.

Для характеристики влияния реактивных составляющих на общее падение напряжения можно привести следующие числа. Для однопутной железной дороги с нормальной колеей при $Q = 100$ mm² и $G = 32$ kg/m Huldschiner дает табл. 91.

ТАБЛИЦА 91.

Сопротивления рабочей сети в Ω/km.

Ток	r	r_{eff}	x	z
Постоянный .	0,2	0,20	—	0,20
Однофазный 15 Hz	—	0,24	0,24	0,34
То же 50 Hz .	—	0,34	0,69	0,77

Порядок этих цифр подтверждается и практическими данными. Так, например, для шведских железных дорог при $\nu = 15$ Hz величины z определялись около 0,3—0,4 Ω/km. Как следует из приведенных данных, уже при частотах 15—$16^2/_3$ Hz реактивное падение напряжения получается одного порядка с активным. При частоте же промышленной, 50 Hz, реактивное падение напряжения значительно превалирует над активным.

Вследствие индуктивного действия отдельных проводов друг на друга общее сопротивление рабочей цепи при переменном токе сильно зависит от взаимного проложения проводов. На основании приведенных выше выкладок нетрудно видеть, что для понижения эффекта самоиндукции выгодно вести ток не по одному проводу, а по нескольким параллельным проводам, удаленным как можно больше друг от друга. В видах уменьшения падения напряжения целесообразно уменьшить сечение контактного провода с тем, чтобы за счет этого проложить параллельно ему идущий фидер, располагая его на опорах контактной системы.

По вычислению Hüldschiner'a, для взятого им среднего нормального случая при $\nu = 16^2/_3$ Hz и одном контактном проводе сечением $Q = 150$ mm², сопротивление сети на один километр определилось в 0,314 Ω. При подразделении же меди на контактный провод и фидер то же сопротивление получилось равным всего лишь 0,261 Ω. Если бы взять сопротивление 0 314 Ω для случая контактного провода и фидера, то сумма их сечений могла бы быть снижена до 90 mm². Если же нужно было бы получить сопротивление цепи 0,261 Ω при одном контактном проводе, то для него следовало бы взять сечение 600 mm². При частоте 50 Hz эффект подразделения одного провода на два параллельные еще более разителен.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

8. Влияние блуждающих токов на падение напряжения.

Влияние при постоянном токе. При рассмотрении процесса возврата тока по рельсовому пути было уже отмечено, что блуждающие токи должны содействовать уменьшению падения напряжения в рабочей сети. Чем больше тока ответвляется в окружающую почву от рельсов, тем меньше в них падение напряжения. Когда на линии находится один поезд при одностороннем питании, влияние блуждающих токов можно проанализировать с помощью уравнения (535), дающего изменение тока в рельсах в функции от расстояния.

Согласно этому уравнению, падение напряжения в рельсах для любого текущего положения поезда, находящегося от отсасывающего пункта на расстоянии l_x, может быть определено выражением:

$$\Delta U_{l_x} = Ir_p \int_0^{l_x} \frac{e^{x\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} + e^{(l_x - x)\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}}{1 + e^{l_x\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}} dx. \tag{640}$$

При длине всего участка l, наибольшее падение напряжения определяется для предела интегрирования $l_x = l$.

При этом пределе интеграл дает выражение:

$$\Delta U_{max} = \frac{2Ir_p}{\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} \frac{e^{l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} - 1}{\sqrt{\frac{r_p}{r_n}} + 1} \tag{641}$$

или в гиперболическом виде:

$$\Delta U_{max} = \frac{2Ir_p}{\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} \operatorname{tgh} \frac{l}{2}\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}. \tag{642}$$

Среднее падение напряжения поезда за время движения его на всем участке пути может быть выведено из текущего значения (641) по общему правилу нахождения средних значений:

$$\Delta U_{cp} = \frac{Ir_p}{l} \int_0^l dl_x \int_0^{l_x} \frac{e^{x\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} + e^{(l_x - x)\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}}{e^{l_x\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} + 1} dx.$$

Отсюда после интегрирования:

$$\Delta U_{cp} = \frac{2Ir_n}{l}\left(2\ln\frac{e^{l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} + 1}{2} - l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}\right). \tag{643}$$

Падение напряжения до точки токораздела при равномерно распределенной нагрузке с учетом блуждающих токов, определяется из формулы (541):

$$\Delta U = I_n r_p \int_0^l \frac{e^{(l-x)\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} - e^{-(l-x)\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}}{e^{l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} - e^{l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}} dx.$$

Интегрирование дает:

$$\Delta U = \frac{I_n r_p}{\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} \frac{e^{l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} + e^{-l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} - 2}{e^{l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} - e^{-l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}} \tag{644}$$

или в гиперболических функциях:

$$\Delta U = \frac{I_n r_p}{\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} \operatorname{tgh} \frac{l}{2}\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}. \tag{645}$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Среднее напряжение до токоприемника, при условии равномерно распределенной нагрузки, можно определить по формуле:

$$\Delta U_{cp} = \frac{I_n r_p}{l} \int_0^l dl_x \int_0^{l_x} \frac{e^{(l-x)\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} - e^{-(l-x)\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}}{e^{l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} - e^{-l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}} dx.$$

Интегрирование дает:

$$\Delta U_{cp} = \frac{I_n r_n}{l} \left(l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}} \frac{e^{l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} + e^{-l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}}{e^{l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}} - e^{-l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}}}} - 1 \right), \quad (646)$$

или

$$\Delta U_{cp} = \frac{I_n r_n}{l} \left(l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}} \operatorname{ctgh} l\sqrt{\frac{r_p}{r_n}} - 1 \right). \quad (647)$$

На основании приведенных формул можно составить себе представление о порядке влияния блуждающих токов на падение напряжения в рельсах. Так, например, для условий трамвайного движения, при $\frac{r_p}{r_n} = 0{,}1$ и $l = 3$ km, в случае достаточно большого количества поездов путем сравнения формул (597) и (646) можно установить, что блуждающие токи понижают падение напряжения в рельсах до точек токораздела приблизительно на 8,7%. Для среднего же значения падения напряжения до токоприемника (597) и (644) это снижение определяется цифрой порядка 6%. Следует указать, что точно установить в предварительных расчетах влияние блуждающих токов на падение напряжения очень трудно, так как величина переходного сопротивления рельсов r_n, как уже было отмечено, очень сильно колеблется под влиянием ряда местных условий, зависящих от типа пути, состояния погоды и состава почвы.

При рассмотрении вопроса о блуждающих токах на однофазных железных дорогах было уже указано, что наличие их так же, как и при постоянном токе, сказывается в уменьшении общего сопротивления рабочей сети. Только здесь картина получается более сложная. Осложнение это вызывается разобранным выше индуктивным взаимодействием между контактным проводом и рельсами.

Теоретический анализ влияния блуждающих токов при однофазной тяге на падение напряжения произведен в упомянутой выше работе Benda и Voigtländer'a. Решение вопроса ими дано на базе анализа отдельных составляющих рельсового тока (553). В работе этой предположено, что падение напряжения в рельсах вызывается только составляющей I''_p. В индуктивном же взаимодействии с контактным проводом участвует весь ток I_p. При таких условиях падение напряжения, применительно к схеме однопутной железной дороги (рис. 665), может быть определено на основании выражения (648), если исходить из контура, состоящего из контактного провода a и рельса A:

$$\Delta \bar{U} = \bar{I}_a z_a + \bar{I}_b 2\pi\nu M_{ab} + \bar{I}_A 2\pi\nu M_{aA} + \bar{I}_B 2\pi\nu M_{aB} - \bar{I}''_A z_A - \bar{I}''_B 2\pi\nu M_{AB}. \quad (648)$$

В этом выражении составляющие I_a и I_b соответствуют току I_1, составляющие I_A и I_B—току I_p, а I''_A и I''_B—току I''_p. Как было уже сказано, индуктивный эффект рельсового тока определяется полными токами в них I_A и I_B, что и отражено в третьем и четвертом членах данного выражения. Перед этими членами поставлены знаки плюс. Это сделано в предвидении того, что при выражении этих токов через I_1 перед ними появятся знаки минус. Это и должно быть именно так, потому что индуктивный эффект рельсовых токов I_A и I_B должен противодействовать магнитодвижущей силе тока в контактном проводе, взятого со знаком плюс. Падение напряжения в рельсе A определяется пятым и шестым членами. Так как падение напряжения в рельсах должно увеличивать общее падение напряжения, то перед этими членами поставлены знаки минус, которые при замене токов перейдут в плюсы, что и повлечет за собою требуемое возрастание ΔU.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Как видно из рис. 665, общий ток контактной системы I_1 разбивается в данной схеме на I_a и I_b. Точно так же и рельсовый ток I_p составляется из I_A и I_B В целях упрощения расчетов целесообразно, вместо отдельных составляющих, иметь дело с их результирующими I_1 и I_p.

При движении токов по двум параллельным проводам, связанным эффектом взаимоиндукции, например по *a* и *b*, к суммарному их току можно перейти согласно выражению:

$$\dot{I}_a Z_a + \dot{I}_b j 2\pi\nu M_{ab} = \dot{I}_1 Z_1 = \dot{I}_1 \frac{Z_a Z_b - (j 2\pi\nu M_{ab})^2}{Z_a + Z_b - j 4\pi\nu M_{ab}} . \qquad (649)$$

Этим соотношением можно пользоваться как для фидера, так и для опорного троса. Точно так же его можно применять и для второго контактного провода при двухпутных дорогах. Рельсы в нормальных случаях можно считать симметричными по отношению к контактному проводу. При практических расчетах можно исходить из соотношений:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_B;\ \dot{I}_p = \dot{I}_A + \dot{I}_B;\ \dot{I}''_p = \dot{I}''_A + \dot{I}''_B \text{ и } M_{aA} = M_{aB}.$$

В дальнейшем нужно также иметь в виду замену:

$$Z_p = 0{,}5\,(Z_A + j\,2\pi\nu\,M_{AB}) . \qquad (650)$$

При таких условиях основное уравнение (648) примет вид:

$$\Delta\dot{U} = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_p j 2\pi\nu M_{kp} - \dot{I}''_p Z_p .$$

Подставляя для I_p и I''_p значения из формулы (553), получаем:

$$\Delta\dot{U} = \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_1 K\left(1 - \frac{1 - e^{-sl}}{Sl}\right) j\,2\pi\nu M_{kp} + \dot{I}_1 \frac{1 - e^{-sl}}{Sl} Z_p . \qquad (651)$$

Путем небольших преобразований это выражение приводится к окончательному виду:

$$\Delta\dot{U} = \dot{I}_1 \left[Z_1 - K j 2\pi\nu M_{kp} + (1 - K)\frac{1 - e^{-sl}}{Sl}(Z_p - j 2\pi\nu M_{kp}) \right],$$

или кратко:

$$\Delta\dot{U} = \dot{I}_1 Z_e . \qquad (652)$$

По этому же методу можно составить уравнение и для определения падения напряжения при двухпутной железной дороге. В целях упрощения можно предполагать, что ток между всеми четырьмя рельсовыми нитками распределяется поровну.

Для практических вычислений по формуле (652) необходимо уметь определять постоянные Z_1, $M_{кр}$ и Z_p. В отношении активных составляющих можно руководствоваться данными, приведенными выше. Что касается реактивных составляющих, построенных на определении коэфициентов самоиндукции и взаимоиндукции, то здесь приходится руководствоваться другой теорией, а не теорией отделенных проводов. На основании данных Pollaczek'a коэфициент самоиндукции должен определяться по индуктивностям внутренней и внешней.

Коэфициент самоиндукции L_1 от внутренней индукции для круглых проводов определяется по формуле:

$$L_1 = \frac{\pi\nu}{2}\,10^{-4}\ \text{H/km}. \qquad (653)$$

Для меди и бронзы магнитная проницаемость принимается равной единице. Для рельсов Benda рекомендует формулу:

$$L_1 = \frac{1}{p}\sqrt{\frac{\rho\mu}{\nu}}\,10^{-4}\ \text{H/km}. \qquad (654)$$

Здесь p—периметр рельса в cm и ρ—удельное сопротивление в электромагнитных единицах, принимаемое в среднем равным $1{,}9 \times 10^4$. Весьма сложно дело обстоит с μ. Опыты показывают, что величина ее зависит очень сильно от величины тока и частоты. Для средних значений тока в каждом рельсе от 50 A до 100 A колебания μ достигают 160—100. При $p = 60$ cm и $\nu = 16^1/_3$ Hz L_1 колеблется в пределах от 7×10^{-4} H/km до $5{,}5 \times 10^{-4}$ H/km.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Внешний коэфициент самоиндукции предлагается определять по формуле:

$$L_2 = \left(1 + 2\ln\frac{2}{3{,}56\pi R\sqrt{2\nu k_0}} - j\frac{\pi}{2}\right)10^{-4}\ \text{H/km}. \qquad (655)$$

В этой формуле R — радиус проводника в cm, для рельсов — радиус окружности круга по площади равного сечению рельса, а k_0 — проводимость почвы в единицах *CGSM*. Для Европы k_0 колеблется в пределах $10^{-12} - 10^{-13}$.

По тому же самому принципу, вставляя только вместо R величину расстояния между проводами a_{12} в cm, можно определить и коэфициент взаимоиндукции между любыми двумя проводами *1* и *2*:

$$M_{12} = \left(1 + 2\ln\frac{2}{3{,}56\pi a_{12}\sqrt{2\nu k_0}} - j\frac{\pi}{2}\right)10^{-4}\ \text{H/km}. \qquad (656)$$

Для данных значений k_0, при $\nu = 16^2/_3$, величины L_2 и M_{12} можно определить по формулам:

$$L_2 = \left(23 - 2\ln R - j\frac{\pi}{2}\right)10^{-4}\ \text{H/km}; \qquad (657)$$

$$M_{12} = \left(23 - 2\ln a_{12} - j\frac{\pi}{2}\right)10^{-4}\ \text{H/km}. \qquad (658)$$

Для иллюстрации разобранного метода рационально привести числовой пример. Принимаются следующие данные:

Сечение рельсового контактного провода	100 mm²
„ бронзового троса	30 „
Среднее расстояние между ними . . .	30 cm
Высота подвеса провода . . .	600 „
Ширина колеи .	143,2 „
Частота тока	$16^2/_3$ Hz
Активное сопротивление рельсов включая сопротивление почвы	0,11 Ω/km
Переходное сопротивление .	1,25 Ω/km.

При таких условиях вычисления дают следующие цифры:

$$Z_1 = 0{,}153 + j\,0{,}226 = 0{,}273\ e^{j56^\circ};$$
$$j2\pi\nu M_{кр} = 0{,}017 + j\,0{,}106 = 0{,}107\ e^{j81^\circ};$$
$$Z_p = 0{,}110 + j\,0{,}205 = 0{,}230\ e^{j62^\circ};$$
$$K = \frac{j2\pi\nu M_{кр}}{Z_p} = 0{,}465\ e^{j19^\circ};$$
$$S = \sqrt{\frac{Z_p}{r_n}} = 0{,}43\ e^{j31^\circ}$$

Отсюда искомое эквивалентное сопротивление цепи согласно формуле (652) для достаточно больших l, при которых можно положить $e^{-sl} = 0$:

$$Z_e \cong 0{,}146 + j\,0{,}176 + \frac{0{,}2 + j0{,}02}{l}\ \Omega/\text{km}.$$

Для $l = 10$ km получается:

$$Z_e \cong 0{,}166 + j\,0{,}178\ \Omega/\text{km}.$$

Последнее выражение дает $z_e = 0{,}24\ \Omega/\text{km}$, что значительно ниже результатов, даваемых методом „отдельных“ проводов.

Большую работу по исследованию сопротивлений рабочей цепи при однофазном токе проделал Forwald (Л. 299). На основании ряда опытов, произведенных в Швеции, Германии и Швейцарии, Forwald подтверждает, что при одностороннем отсасывании с плечами больше 18 km и с такими же — при двухстороннем падение напряжения в рельсовой цепи начинает очень мало зависеть от дальнейшего удлинения этих плеч. При таких условиях благодаря малой величине общего переходного сопротивления стыковые электрические соединения начинают играть меньшую роль. Точно так же практически не оказывают влияния на общее сопротивление рабочей сети высота подвески провода и рекомендуемое теорией Hüldschiner'a деление общего сечения между собственно контактным проводом и усиливающим проводом. Последние два обстоятельства объясняются тем, что при движении по земле токи удаляются на значительные расстояния от рельсов. Ввиду этого, если

БГУТ (ДІТ)

бы движение токов сконцентрировать по некоторой одной эквивалентной линии, то эта линия оказалась бы на очень значительном расстоянии от рельсов и еще дальше от верхних проводов. Поэтому некоторые изменения в высоте подвеса провода особого влияния на индуктивное взаимодействие между током в контактном проводе и токами возврата не оказывают. Точно так же и подразделение сечения между контактным проводом и фидером особой роли здесь не играет. Расстояние между проводом и фидером по сравнению с удалением их от эквивалентной линии возврата тока здесь получается относительно малым. По теории же Hüldschiner'a значительный эффект снижения реактивного сопротивления системы при подразделении сечения получается только тогда, когда линия возврата тока проходит достаточно близко к воздушным проводам, т. е. в случае, если токи преимущественно идут не по земле, а по рельсам или же по обратным воздушным проводам.

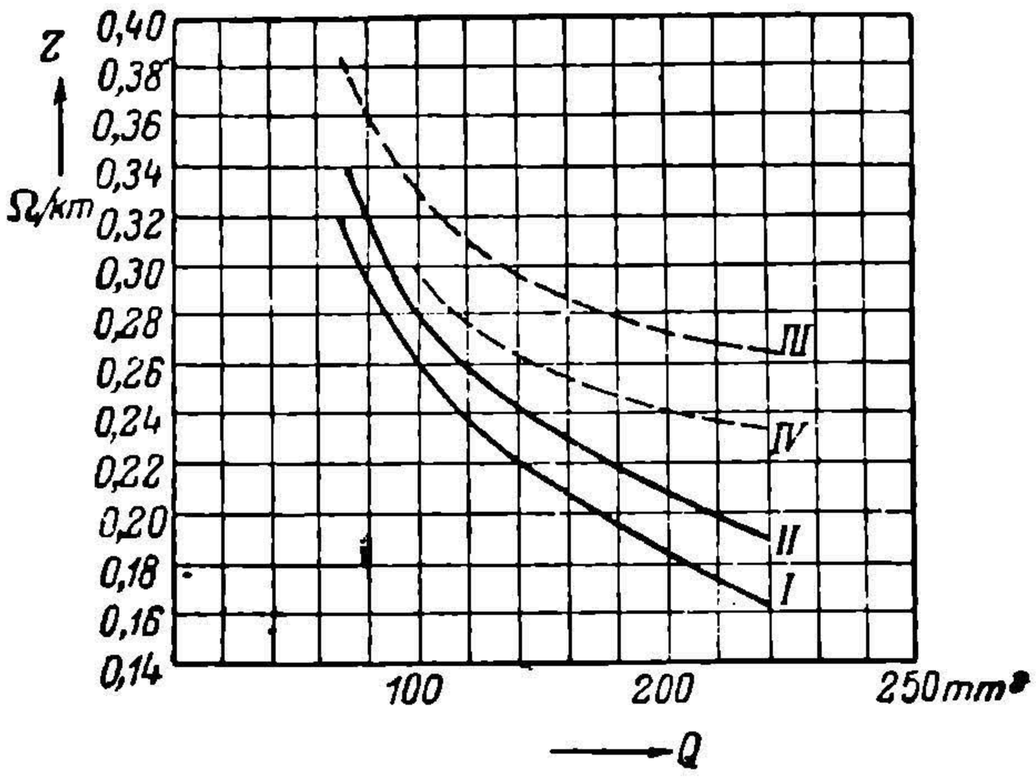


Рис. 669. Значения полного эквивалентного сопротивления на 1 km пути в зависимости от общего сечения контактных и усиливающих проводов.

На основании исследования опытного материала Forwald предлагает для дорог с плечами отсасывания больше 18 km пользоваться для определения полного сопротивления рабочей сети z_e в Ω/km кривыми рис. 669, построенными в функции от полного сечения Q воздушных проводов, включая контактный провод, опорный трос, а если они имеются, то и усиливающие провода. Кривая *I* дает z_e для рельсов с электрическими стыковыми соединениями, а кривая *II*—без таковых. Кривая *III* изображает z_e по вычислениям согласно постоянным Hüldschiner'a. Кривая *IV* дает то же при делении сечения пополам между контактным проводом и фидером. Все данные рис. 669 относятся к рельсам весом 40—45 kg/m и к частоте $16^2/_3$ Hz.

Как показывают приведенные кривые, Forwald считает z_e при плечах отсасывания больше 18 km практически зависящим только от сечения воздушных проводов. Из рис. 669 видно, что блуждающие токи снижают сопротивление рабочей сети весьма ощутительно.

Анализ влияния блуждающих токов как на основании теоретических выкладок, так и на основании опытных данных, с несомненностью показывает, что метод „отдельных" проводов, при условии пренебрежения токами утечки, дает преувеличенное падение напряжения в рабочей сети. С другой стороны, метод Benda и Voigtländer'a, основанный на ряде допущений и окончательно не проверенный на практике, особенно для частот порядка 50 Hz, пока не может считаться гарантией от преуменьшения падения напряжения. Повидимому, в данных условиях наиболее надежным решением вопроса является учет падения напряжения по среднему его значению из обоих методов.

9. Влияние токов рабочей сети на слаботочные провода.

Рабочие токи электрических железных дорог могут действовать на близлежащие установки двояким образом. В случае прохождения рабочего тока по рельсовому пути при заземленных слаботочных установках рассмотренные выше токи утечки могут проникать в активные части слаботочных систем и вносить в их работу недопустимые возмущения. В наибольшей степени это может угрожать телефонным устройствам, но и телеграфу эти токи нередко причиняют большие неудобства. Нужно, однако, заметить, что отмеченные влияния особо существенных осложнений не вносят, и с ними можно довольно легко бороться путем установки различного рода заградительных катушек и реле. При двухпроводных же системах с этими влияниями вообще практически можно не считаться.

Гораздо более серьезные осложнения вызываются индуктивным действием рабочих токов на слаботочные провода, причем, естественно, наибольшая опасность

НТБ УГУНТ (ДІІТ)

возникает при работе железной дороги на переменном токе. Как известно, индуктивный эффект при переменном режиме токов обусловлен явлениями электростатической и электромагнитной индукции. Особенно велика опасность при коротких замыканиях в линии, когда по цепям проходят большие токи и когда электромагнитный эффект становится особенно интенсивным. Вопрос еще больше осложняется, если, кроме контактного провода, поблизости от проводов слабого тока находится линия передачи.

Опасность от указанных влияний проявляется в различных направлениях. Прежде всего здесь необходимо считаться с непосредственной опасностью высоких напряжений, возникающих в слаботочных установках. Наблюдались случаи (например, на Миттенвальденской железной дороге), когда перенапряжения в слаботочных установках доходили до 2400—3000 V. Очень опасны также акустические удары, проявляющиеся в резкой форме при коротких замыканиях, когда через телефонный аппарат проходит значительное количество разрядной энергии. Большую опасность рабочие токи могут представлять, влияя на аппараты железнодорожной сигнализации и блокировки, что в некоторых случаях может явиться причиной аварий и крушений на линии.

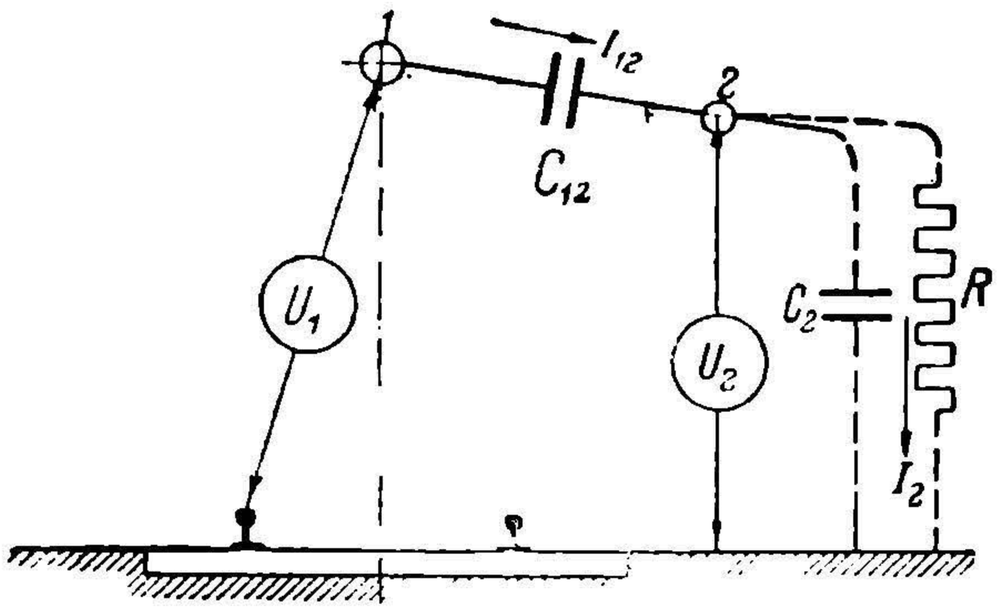


Рис. 670. Картина емкостного воздействия рабочей сети на однопроводную слаботочную цепь.

Практически, однако, рассматриваемые влияния представляют наибольшие затруднения при регулярно происходящих воздействиях, мешающих нормальной работе слаботочных установок. Из-за этого могут получаться выпадения знаков в телеграфной передаче, в телефонах—ложные вызовы, а главное, шум, мешающий разговору и часто даже делающий его совершенно невозможным. Борьба с мешающими явлениями практически представляет наибольшие трудности.

При изучении вопроса о влиянии рабочих токов на слаботочные провода прежде всего необходимо уяснить себе сущность электростатического эффекта. Явление это обусловлено, как известно, емкостными связями между отдельными проводами и между проводами и землею. В основу краткого рассмотрения данного вопроса будет положен здесь метод Schrottke. Последний исходит в своих выводах из емкостей, сосредоточенных в определенных пунктах системы. На рис. 670 представлена схема Schrottke для случая однопроводной слаботочной системы, причем через *1* обозначен рабочий провод, а через *2* — слаботочный. Предположим, что емкостный эффект между проводами *1* и *2* определяется сосредоточенной емкостью C_{12}, а между проводом *2* и землею — C_2 Сопротивление изоляции провода *2* от земли обозначается через R. Напряжение рабочего провода принимается равным U_1, а потенциал провода *2*, вызываемый данным электростатическим явлением, относительно земли приравнивается U_2.

При принятых обозначениях, если пренебречь потерями в проводах, легко получается выражение:

$$U_2 = U_1 \frac{\omega C_2}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \omega^2 (C_{12} + C_2)^2}}. \qquad (659)$$

Ток, идущий между проводами *1* и *2*, равен:

$$I_{12} = U_1 \omega C_{12} \sqrt{\frac{1 + \omega^2 R^2 C_2^2}{1 + \omega^2 R^2 (C_{12} + C_2)^2}}. \qquad (660)$$

Таким же самым образом ток, идущий от провода *2* на землю через изоляцию:

$$I_2 = U_1 \frac{\omega C_{12}}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 (C_{12} + C_2)^2}}. \qquad (661)$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

При двухпроводной системе (рис. 671) потенциалы в слаботочных проводах *2* и *3* определяются формулами:

$$U_2 = U_1 \frac{\omega\left(C_{12} + \frac{C_{13}C_{23}}{C_{13}+C_{23}+C_3}\right)}{\sqrt{\frac{1}{R_2^2}+\omega^2\left[C_{12}+C_2+\frac{C_{23}(C_{13}+C_3)}{C_{13}+C_{23}+C_3}\right]^2}}; \qquad (662)$$

$$U_3 = U_1 \frac{\omega\left(C_{13} + \frac{C_{12}C_{23}}{C_{12}+C_{23}+C_2}\right)}{\sqrt{\frac{1}{R_3^2}+\omega^2\left[C_{13}+C_3+\frac{C_{23}(C_{12}+C_2)}{C_{12}+C_{23}+C_2}\right]^2}}. \qquad (663)$$

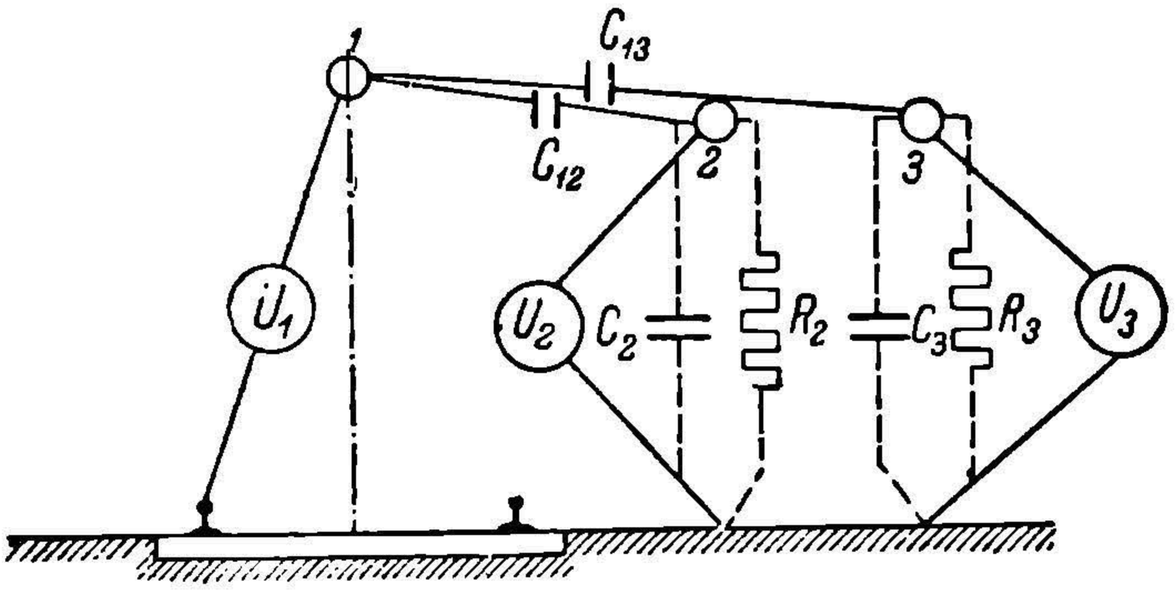


Рис. 671. Картина емкостного воздействия рабочей сети на двухпроводную слаботочную систему.

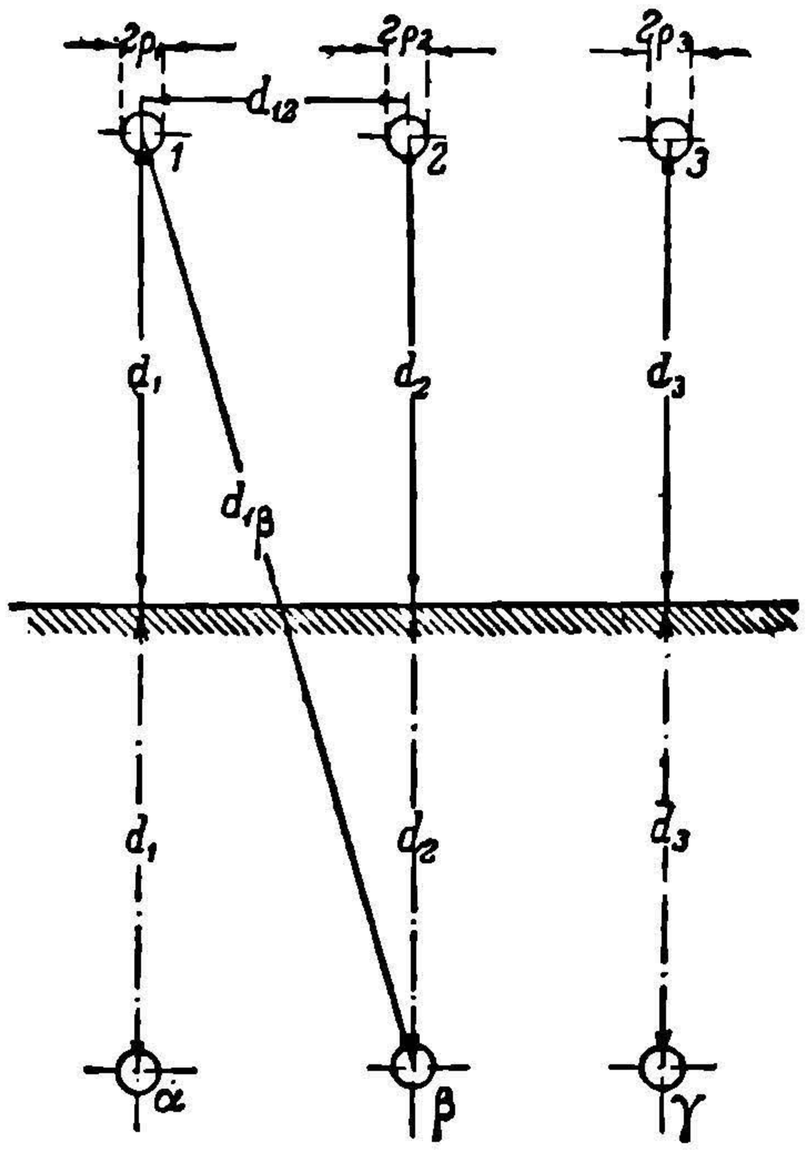


Рис. 672. Диаграмма для определения постоянных при емкостном эффекте.

При системе трех проводов (рис. 672) и длине их по l в m Schrottke дает для отдельных емкостей следующие выражения:

$$\left.\begin{aligned} C_1 &= \frac{l}{9}\,\frac{(a_2a_3-d^2)-(a_3b-cd)-(a_2c-bd)}{A}\ \text{mF}\\ C_2 &= \frac{l}{9}\,\frac{(a_1a_3-c^2)-(a_3b-cd)-(a_1d-bc)}{A}\ \text{mF}\\ C_3 &= \frac{l}{9}\,\frac{(a_1a_2-b^2)-(a_2c-bd)-(a_1d-bd)}{A}\ \text{mF}\end{aligned}\right\}; \qquad (664)$$

$$C_{12} = \frac{l}{9}\,\frac{a_3b-cd}{A}; \quad C_{13} = \frac{l}{9}\,\frac{a_2c-bd}{A} \quad \text{и} \quad C_{23} = \frac{l}{9}\,\frac{a_1d-bc}{A}. \qquad (665)$$

Здесь:

$$A = a_1(a_2a_3-d^2) - b(a_3b-cd) - c(a_2c-bd);$$

$$a_1 = 2\ln\frac{2d_1}{\rho_1};$$

$$a_2 = 2\ln\frac{2d_2}{\rho_2};$$

$$a_3 = 2\ln\frac{2d_3}{\rho_3};$$

$$b = 2\ln\frac{d_{1\beta}}{d_{12}};$$

$$c = 2\ln\frac{d_{1\gamma}}{d_{13}};$$

$$d = 2\ln\frac{d_{2\gamma}}{d_{23}}.$$

На основании приведенных формул можно вычислить те напряжения, под которыми находятся слаботочные провода по отношению к земле. Например, при рабочем напряжении 15 000 V и расстоянии слаботочного провода от контактного 3,7 m эти напряжения при частоте 25 Hz достигают значений порядка 150—175 V, если сопротивление R принять равным 2 000 Ω. С уменьшением R напряжение падает, а токи емкостной утечки растут. Когда слаботочные провода расположены на тех же опорах, что и контактный провод, измерения емкостных токов давали для них величины, доходящие до 1,5 mA/km. При таких токах работа слаботочных установок практически делается невозможной.

Кроме статической индукции, как уже было указано, при выяснении влияния рабочих токов на провода слабых токов приходится весьма считаться с индукцией электромагнитной, представляющей в большинстве случаев бóльшую опасность, чем электростатическая. Законы, которым подчиняется электромагнитная индукция,

НБ УИУНТ (ДІІТ)

были уже разобраны при определении индуктивных сопротивлений рабочей сети. По существу, основная формула взаимоиндукции (613) остается в силе. Однако, при практическом пользовании этой формулой по большей части получаются значительные отклонения от действительности, причем в слаботочных системах—большие, чем в разобранных выше рабочих сетях. Отклонения эти вызываются, главным образом тем, что в реальных условиях по рельсам, как уже выяснилось, идет только часть общего рабочего тока, другая же его часть отходит на большее или меньшее расстояние от рельсового пути, идя по окружающей почве. Это обстоятельство влечет за собою расширение зоны магнитного действия рабочих токов и увеличивает коэфициент взаимоиндукции. С другой стороны, если поблизости от рабочей сети имеются добавочные провода и тросы, то они оказывают на электромагнитную индукцию экранирующее действие. Это влечет за собою понижение *M*. В общем случае коэфициент взаимоиндукции часто определяют по формуле (613), но с введением в нее поправочного коэфициента *q*, колеблющегося в пределах от 0,5 до 5:

$$M_{12}=2\left(\ln\frac{2l}{a_{12}}-q\right)10^{-4}\ \text{H/km}. \qquad (666)$$

Полезно отметить, что новейшие теоретические работы Breisig'a и Rüdenberg'a, а также опытные данные показывают, что коэфициент взаимоиндукции в значительной степени зависит от частоты тока. Как общее правило, с увеличением частот он падает. По данным Breisig'a и Rüdenberg'a это объясняется тем, что с изменением частоты меняется картина распространения токов утечки в земле.

При выяснении влияния рабочих токов на слаботочные провода необходимо, кроме основных волн тока, принимать в расчет их высшие гармоники. Опасны гармоники, вызываемые зубчатостью роторов тяговых двигателей и особенно подстанционных агрегатов. Опасность усугубляется еще тем, что гармоники эти имеют частоты порядка 300—600 Hz, что соответствует частотам разговорных токов. Вследствие этого в целом ряде случаев такие гармоники делают совершенно невозможной работу телефонных установок. Примером могут служить случаи, имевшие место на австрийских и шведских железных дорогах.

Из мероприятий по уменьшению влияний рабочих токов на слаботочные провода нужно прежде всего указать на рациональность применения двухпроводных систем. При однопроводных слаботочных системах бороться с влияниями сильных токов практически почти невозможно. Нужно удалять провода слабых токов не меньше, чем на 4—5 km от рабочего провода. Только тогда можно рассчитывать при однопроводной системе избежать опасных воздействий.

При наличии двухпроводных систем рационально прибегать к транспозиции, меняя через определенные расстояния положение прямого и обратного провода по отношению к рабочему (Л. 329). Довольно хорошо действуют так называемые разрядные катушки, включенные между прямым и обратным проводами и посредине заземляемые, например, на рис. 671 между проводами *2* и *3*. Для основных токов они представляют большое самоиндукционное сопротивление, так как токи обеих половинок катушки создают магнитные поля одного и того же направления, а поэтому основные токи практически не могут переходить из одного провода в другой. Что же касается разрядных емкостных токов, стремящихся перейти из обоих проводов в землю, то они, проходя каждый по своей половине катушки, создают поля противоположного направления. Поэтому индуктивное сопротивление катушки для них будет мало, и они свободно будут проходить в землю, не заходя в аппараты, приключенные к проводам *2* и *3*. Очень радикальное мероприятие—применение кабельной подземной прокладки слаботочных проводов.

Все приведенные методы борьбы полезны, главным образом, в отношении понижения емкостного эффекта. Гораздо меньше их значение в отношении эффекта электромагнитной индукции, особенно при коротком замыкании. Однако, такое мероприятие, как кабельная прокладка, снижает и действие электромагнитной индукции. Объясняется это тем, что оболочка кабелей производит сильный экранирующий эффект вследствие образования в ней токов Фуко. Для усиления такого экранирующего эффекта иногда применяются специальные кабели с особой броней из меди или из железа. Полезно броню соединять электрически с оболочкой кабелей и с рельсовыми путями.

Приведенные меры выполняются на стороне слаботочных систем. На стороне рабочей сети для понижения эффекта влияния также применяют различного рода

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

мероприятия. Прежде всего рекомендуется по возможности сокращать расстояния между подстанциями. При переменном токе и относительно высоких напряжениях, 15 000—22 000 V, расстояния эти могли бы быть значительно больше применяемых на практике. На главных линиях теперь пролеты между подстанциями чаще всего колеблются в пределах 40—80 km, а на второстепенных линиях — около 80—100 km. За последнее время замечается некоторая тенденция в сторону увеличения этих расстояний.

Несколько спорным вопросом является способ питания рабочей сети: выгоднее ли применять двухстороннее или одностороннее питание. При нормальных условиях эксплоатации есть основание считать более рациональным питание двухстороннее. При этой системе, благодаря подходу тока к токоприемнику с двух сторон, эффект электромагнитной индукции должен снижаться. Однако, оно может оказаться более опасным при коротких замыканиях, если смежные подстанции выключатся неодновременно. В практике существующих дорог при однофазном токе доминирует применение одностороннего питания с изолированием проводов отдельных путей.

В видах ослабления эффекта влияния рационально как можно больше тока направлять по рельсам. При значительных токах утечки, как уже отмечалось, эффект электромагнитной индукции повышается. С этой точки зрения желательно улучшать рельсовые стыковые соединения.

Существуют установки, в которых осуществлен принцип трехпроводной системы. Тогда контактный провод и специальный провод для обратного тока располагаются по возможности близко друг к другу, благодаря чему их индуктивные влияния хорошо взаимно нейтрализуются. Рельсы здесь, будучи соединены с обоими проводами автотрансформаторами, являются как бы нейтральными проводами. Нужно указать, как это будет более подробно изложено в следующем отделе, что в практике некоторых стран, главным образом в Швеции, применение отсасывающих проводов и трансформаторов сильно развито. Все подобные конструкции преследуют одну и ту же идею—перевести ток из рельсов в обратный провод, располагаемый близко к контактному, и обеспечить по возможности близкий к 180° угол сдвига между токами в прямом и обратном проводах. Нужно иметь в виду, что при больших утечках угол сдвига тока в рельсах по отношению к току в контактном проводе значительно отличается от 180°. Это, естественно, сильно осложняет взаимную компенсацию влияний прямых и обратных проводов.

Из прочих способов борьбы с индуктивными влияниями следует отметить применение в некоторых случаях провода противонапряжения. По близости от контактного провода протягивается специальный провод относительно небольшого сечения, на который подается напряжение обратного знака по сравнению с контактным проводом. Естественно, что такой провод должен компенсировать электростатический эффект контактного провода.

Особые способы борьбы приходится применять в отношении высших гармоник. Здесь наиболее рационально воспользоваться принципом резонанса. В случае появления гармоник со стороны подстанций — к зажимам их приключаются емкость и самоиндукция, подобранные таким образом, что они составляют для гармоники цепь с общим сопротивлением, близким к нулю, и кроме того на пути гармоник в рабочую цепь ставятся соответственно подобранные дроссельные катушки. Благодаря этому гармоники не распространяются по рабочей сети, а замыкаются почти целиком на искусственно созданную цепь, которая для них как бы является короткой.

Значительно труднее бороться с гармониками, вызываемыми зубчатостью роторов двигателей. Одним из способов такой борьбы явилось применение скошенных впадин у однофазных коллекторных двигателей, о чем было упомянуто в главе II (табл. 11).

Чтобы дать представление о величинах напряжений, индуктируемых в слаботочных проводах, в условиях однофазных железных дорог различных стран, приведена табл. 91, где значения этих напряжений даны на 100 ампер-километров рабочего провода.

Из приведенной таблицы видно, что влияние рабочих токов на слаботочные провода весьма значительно. Большинство авторитетов придерживаются мнения, что при отсутствии специальных защитных мер даже в случае двухпроводных систем, более или менее надежную гарантию приемлемой работы слаботочных установок дает только удаление их проводов от рабочей сети не менее, чем на 100 m.

НБ УЭУНТ (ДІІТ)

ТАБЛИЦА 91.

Напряжения, индуктируемые в слаботочных проводах рабочим током электрических железных дорог.

№№	Дороги		V на 100 Akm	Примечание
1	Пригородные дороги Швеции	15	8,0	Воздушные провода. Расстояние от контактного провода 50 m. Без вспомогательных средств.
2	То же	15	0,3	При наличии отсасывающих трансформат ров.
3	Дороги маг. Швеции	15	3,8	Воздушные провода. Расстояние —100 m без вспомогательных мероприятий.
4	То же	15	0,1	С обратным проводом и отсасывающими трансформаторами.
5	Дороги Германии	$16^2/_3$	10,2	Воздушные провода. Рельсы без стыков. соедин.
6	То же	$16^2/_3$	6,3	Со стыковыми рельсовыми соединениями.
7	„	$16^2/_3$	2,2	Кабелевые провода. Соединение оболочек и брони кабелей с рельсами. Стыковые соединения.
8	Австрийские ж. д.	$16^2/_3$	7,5	Воздушные провода. Расстояние 40—50 m без стыковых соединений.
9	То же	$16^2/_3$	3,8—5,3	Со стыковыми соединениями.
10	„	$16^2/_3$	3,3—4,5	При наличии обратного провода.
11	Сан-Готардская ж. д.	$16^2/_3$	5,0	Кабельная проводка.
12	То же	$16^2/_3$	2,5	При соединении оболочек и брони кабелей с рельсами.

Однако, и эта цифра на практике является очень часто совершенно недостаточной. Вообще допускать индуктируемые напряжения в телефонных и телеграфных установках выше 300 V ни в коем случае не следует. В установках же для сигнализации эту норму рекомендуют снижать даже до 50 V.

Отдельные государства разрешают различно вопрос о борьбе с вредными влияниями своих тяговых установок переменного тока на слаботочные провода. Германия применяет, главным образом кабельную прокладку слаботочных проводов. Питание контактных проводов—одностороннее и при многопутных дорогах раздельное. Швейцария придерживается в общем тех же методов, что и Германия, применяя, однако, довольно часто питание двухстороннее В Австрии также доминирует кабельная проводка и одностороннее раздельное питание рабочей сети. Швеция работает очень часто при воздушных слаботочных системах, но зато применяет в большом масштабе отсасывающие трансформаторы и обратные провода. Тросы противонапряжения встречаются, главным образом, в Австрии.

Много споров и разногласий возбуждает еще до настоящего времени вопрос, в какой мере нужно опасаться индуктивных влияний при питании рабочих сетей электрических железных дорог постоянным током. Влияния эти обусловливаются с одной стороны высшими гармониками, а с другой—процессами неустановившихся режимов. Первые опасны, главным образом, с точки зрения мешающих воздействий, вторые же могут быть причиной значительных перенапряжений.

Высшие гармоники при постоянном токе могут происходить под влиянием коммутационного процесса от переменного тока в витках, замыкаемых щетками, а также от зубчатости якорей двигателей. Первые гармоники производят в телефоне низко-ревущий звук, вторые же—высоко-свистящий. Слышен также нередко треск, вызываемый искрообразованием в контроллерах и контакторах.

Очень сильные и опасные гармоники получаются при наличии на подстанциях ртутных выпрямителей. Среди этих гармоник очень часто встречаются гармоники с частотой 300—600 Hz, т. е. наиболее опасные с точки зрения мешающего эффекта в телефонных передачах. Борьба с гармониками ртутных выпрямителей ведется путем применения дроссельных катушек, а в особо опасных случаях—специальных резонаторов, составляемых, как уже указывалось из емкостей и самоиндукции.

Второй тип вредных влияний при постоянном токе связан с явлениями неустановившихся режимов. Наиболее опасный эффект получается при коротких замыканиях в рабочей сети, во время которых могут возникать значительные перенапряжения в слаботочных установках. Значительно меньший эффект обнаруживается при включениях и выключениях поездов и подстанций. При третьем контактном

НБ УДУНТ (ДІІТ)

рельсе, благодаря большой его самоиндукции, эффект неустановившихся режимов значительно слабее, чем при контактном проводе. Защита слаботочных установок от неустановившихся режимов при постоянном токе, если она применяется, преимущественно возлагается на разрядники.

Насколько опасны индуктивные влияния при постоянном токе в реальных условиях дороги, окончательно судить еще нельзя. Есть больше данных предполагать, что особой опасности они здесь не представляют. В этом отношении наиболее показательны данные эксплоатации дороги Ch. M. St. P. R. Провода связи здесь расположены очень близко к контактному проводу, местами на расстоянии всего лишь 10 m. Телефонная сеть выполнена двухпроводной, с хорошей изоляцией. Телеграфная же система—даже однопроводной. Слаботочная система защищается разрядниками. Никаких особо вредных возбуждений в слаботочных системах не происходит. При коротких замыканиях в рабочей сети, имеющей напряжение 3000 V, имели место в телефонах только небольшие акустические удары. Несколько более интенсивное действие при постоянном токе замечалось на французских железных дорогах, где во время коротких замыканий бывали случаи выпадения реле в слаботочных системах. Значительно большие осложнения на практике вызывают ртутные выпрямители. Примером может служить Северная железная дорога Московского узла, где вредные влияния, делавшие практически невозможным пользование связью, удалось устранить только с помощью резонаторов.

В отношении влияния на слаботочные провода линий передачи, служащих для питания тяговых установок, нужно сказать, что к ним относятся вообще все те правила, которые имеются для нормальных промышленных линий передачи (Л. 25) Особенно внимательно следует относиться к линиям передачи в тех случаях, когда они монтируются на тех же мачтах, что и контактный провод.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ОТДЕЛ ДЕВЯТЫЙ.

СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ.

I. СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ РАБОЧИХ СЕТЕЙ.

1. Секционирование сетей.

Как было отмечено в отделе электрического расчета рабочих сетей, контактная сеть электрических железных дорог должна конструироваться с разделением ее на отдельные секции, в электрическом отношении изолированные друг от друга. Это диктуется стремлением локализировать неисправности в рабочей сети на сколь возможно коротких участках дороги, так как в противном случае авария контактного провода в каком-либо одном месте линии вызвала бы приостановку движения на всей дороге. Кроме того, разделение рабочей сети на отдельные секции дает возможность при перерыве движения на всей дороге восстанавливать его по секциям. Без такого разделения все поезда, находящиеся на линии, могли бы тронуться почти одновременно и этим недопустимо перегрузить в процессе разгона сеть дороги.

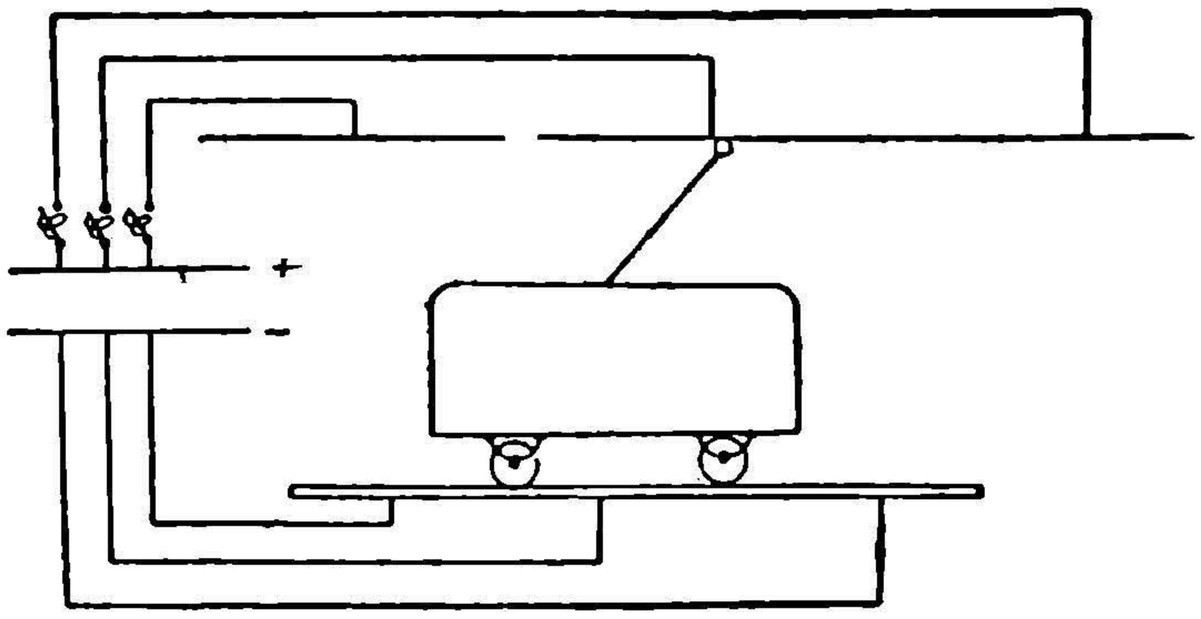


Рис. 673. Схема рабочей сети электрической железной дороги с секционированным и несекционированным участками.

Длина отдельных секций рабочей сети колеблется в широких пределах в зависимости от типа дороги. На дорогах городского типа она чаще всего берется в пределах от 0,5 до 2 km, на пригородных—от 4 до 20 km и на дальних—от 15 до 75 km и даже выше. Следует иметь в виду, что каждая секция, имеющая свой собственный питательный фидер, может подразделяться на подсекции, которые собственного индивидуального питания не имеют. На рис. 673 приведена схема сети с секционированным и несекционированным участками. На рис. 674 дана схема нормального секционирования при двухстороннем питании. Пример секционирования с подсекциями приведен на рис. 675. В тех случаях, когда желательно предохранить две соседних секции от перекрытия их токоприемниками поезда, применяют специальный промежуточный участок с самостоятельным фидером (рис. 676). Такая конструкция дает возможность локализировать неисправность секции, например короткое замыкание, в пределах вспомогательного участка, предохраняя последующую секцию. Особенно часто такие конструкции применяются при третьем контактном рельсе, где короткие замыкания наиболее часты, и где при длинных моторвагонных поездах линия токоприемников получается сильно растянутой.

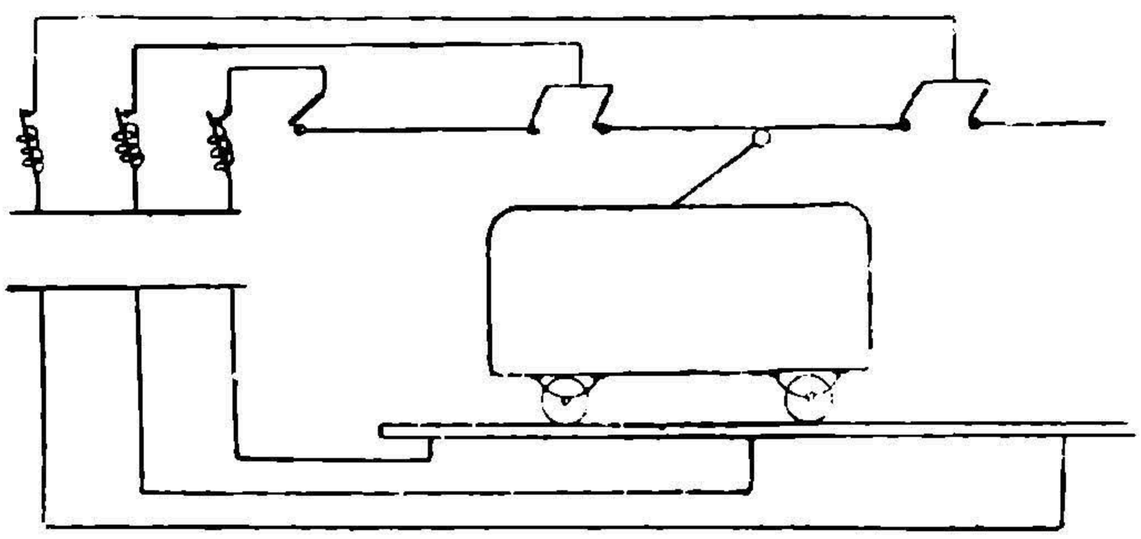


Рис. 674. Схема секционирования при двухстороннем питании рабочей сети.

БГУТ (ДИТ)

Сложнее дело обстоит с дорогами многопутными. Здесь приходится различать два основных принципа питания и секционирования. Первый состоит в раздельном питании отдельных путей при отсутствии электрической связи между их контактными проводами. При втором типе провода отдельных путей электрически

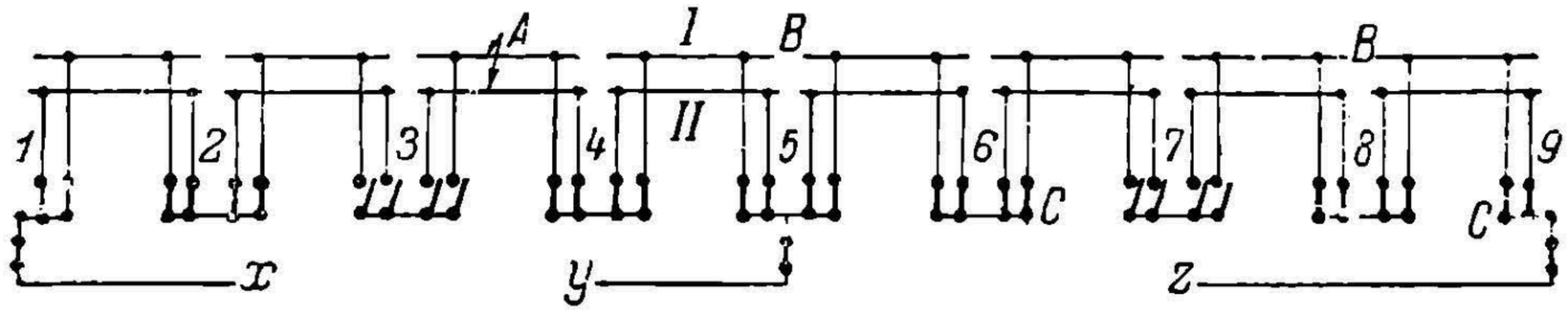


Рис. 675. Комбинированная схема секционирования рабочих сетей городских электрических ж.. д.

связываются друг с другом через определенные расстояния (рис. 677). Здесь через *ПД* обозначены питательные пункты, а через *П* переключательные посты. При практическом размещении последних желательно располагать их на станциях или разъездах. Преимущество раздельного питания — бо́льшая надежность работы дороги. В данном случае авария, имеющая место в каком-либо одном контактном проводе, не передается на прочие пути, где движение может итти нормально и бесперебойно. Преимущество второго типа заключается в лучшем использовании сечения проводов, что особенно важно, когда нагрузки отдельных путей значительно разнятся друг от друга. Первая система наиболее часто применяется при однофазном токе, когда, благодаря высокому напряжению в рабочей сети, падение напряжения можно держать в допустимых пределах при относительно небольших сечениях, и где, с другой стороны, то же высокое напряжение делает аварии в сети наиболее вероятными.

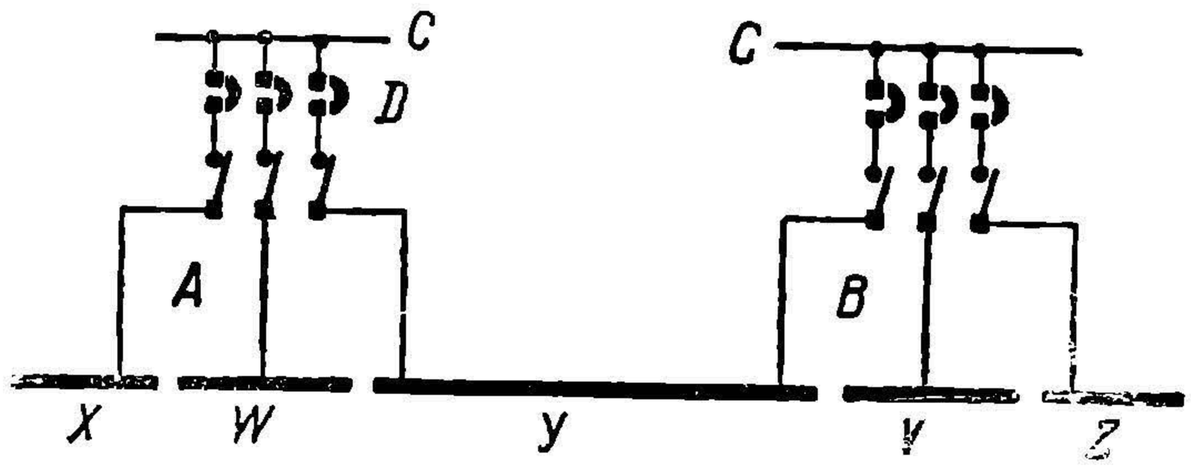


Рис. 676. Схема питания рабочей сети с промежуточным изолированным участком.

Оперирование с секционными выключателями производится различным образом. При невысоких напряжениях выключатели выполняются в виде простых рубильников и помещаются в кожухах или ящиках, крепящихся к опорам или располагаемых в особых небольших киосках (рис. 678). Управление такими рубильниками обычно простое ручное. При повышенных напряжениях, начиная примерно с 1000 V нормально прибегают к воздушным выключателям (рис. 679). Управление последними может быть местным или же дистанционным. В первом случае манипуляции с выключателями производятся персоналом железнодорожных станций или

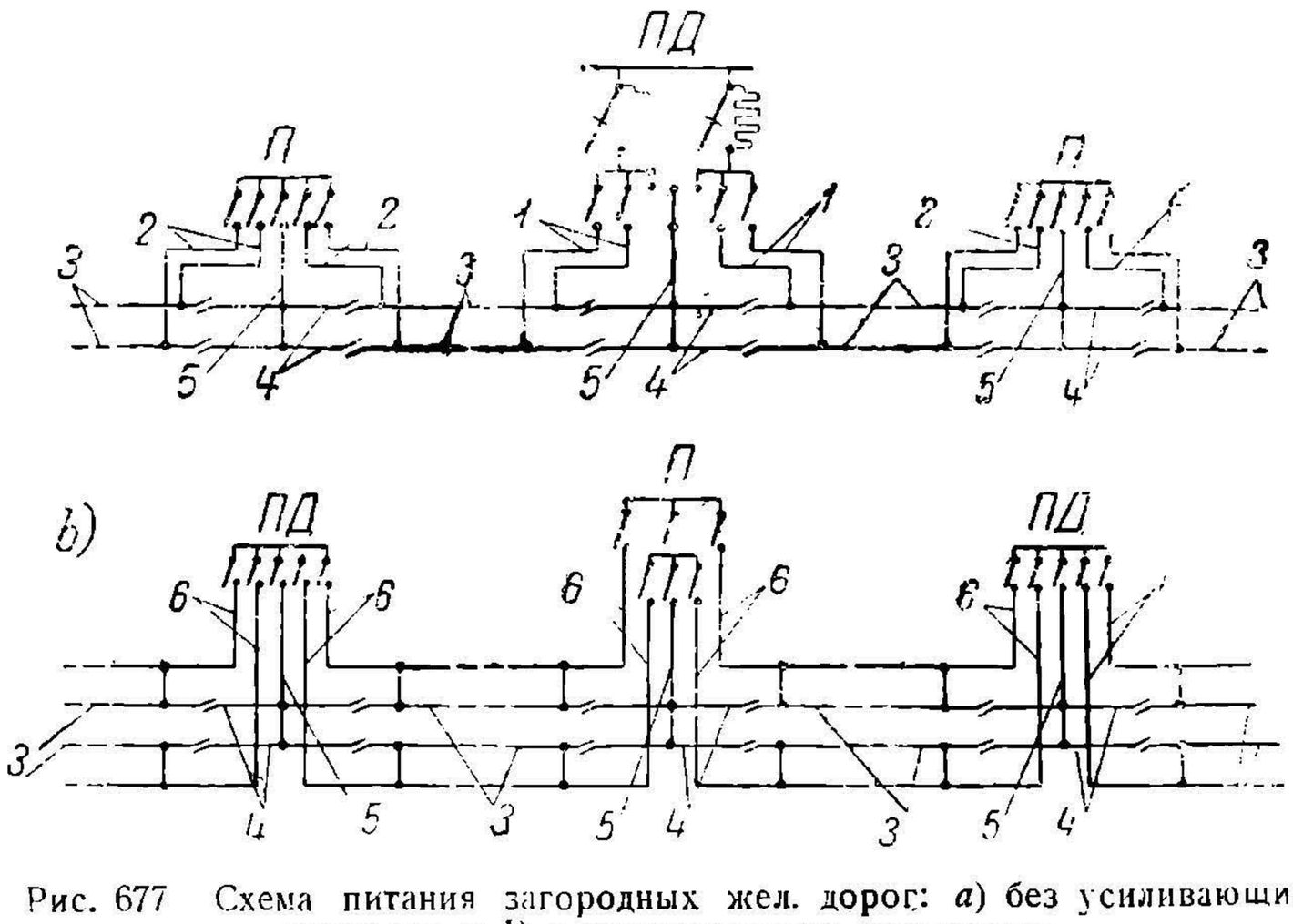


Рис. 677 Схема питания загородных жел. дорог: *a*) без усиливающих проводов и *b*) с усиливающими проводами.
1—фидера, 2—обходные провода, 3—провода главных путей, 4—провода станционных путей, 5—фидера для станционных путей и 6—усиливающие провода.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

разъездов по телефонному или телеграфному распоряжению диспетчера, находящегося в определенном пункте дороги. Обыкновенно у диспетчера имеется полная мнемоническая схема рабочей сети, на которой он производит одновременно

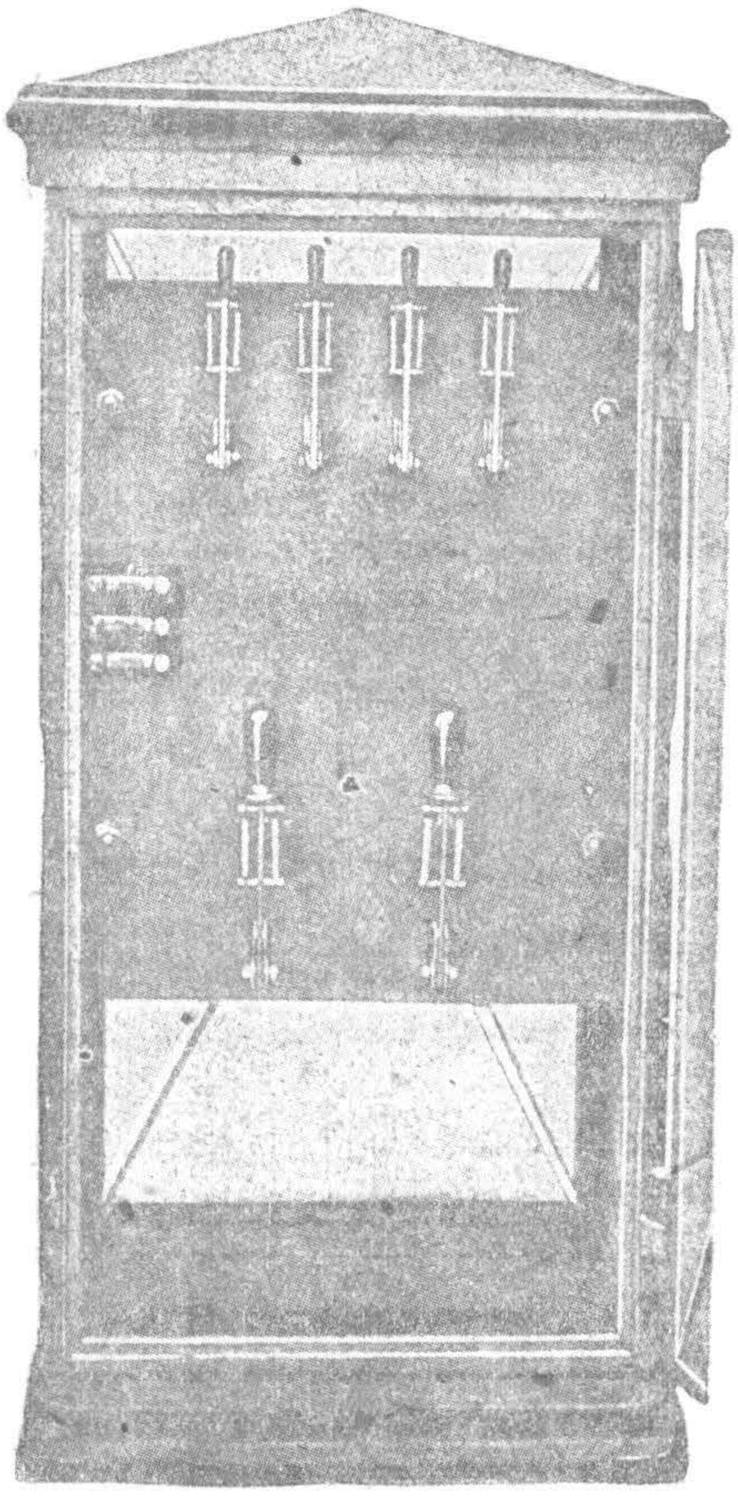


Рис. 678. Участковый киоск.

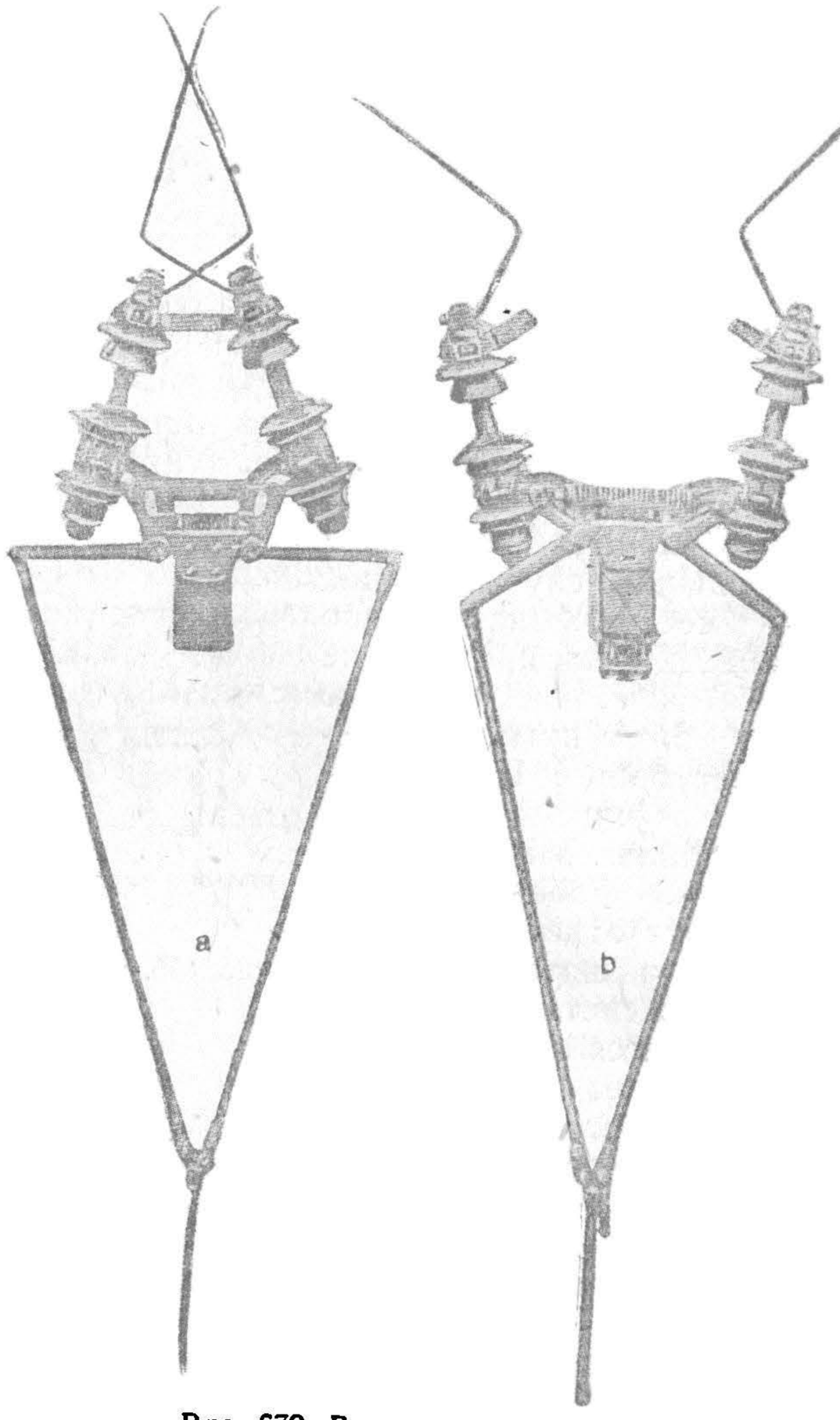


Рис. 679. Воздушные выключатели.

с подачей распоряжения, соответствующие перестановки. Во втором случае включение и выключение отдельных секций производится непосредственно самим диспетчером с помощью специальных проводов управления, связывающих отдельные выключатели с диспетчерским пунктом

Большим распространением теперь начинает пользоваться применение автоматизации выключения аварийных участков сети. По большей части это достигается помощью быстродействующих автоматов с регулировкой выдержки времени. При такой системе в первую очередь выключаются автоматы, лежащие ближе всего к аварийному пункту. При соответствующей регулировке системы выключение аварийных участков возможно без выключения главных питательных фидеров или всей подстанции.

Элементарная схема автоматизации секционирования приведена на рис. 680. Схема *a* дает понятие о принципе секционирования при одностороннем питании однопутной железной дороги. При аварии на участке *bc* выключается секционный автомат A_c. Автомат же A_n, находящийся на подстанционном фидере, благодаря большей выдержке времени, не выключается. В результате половина линии будет находиться под напряжением. Если бы автомата A_c не было, то вся линия оказалась бы без напряжения при аварии не только на участке *bc*, но и на участке *ab*.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

Схема *b* рис. 680 изображает в принципе блокировку при двухстороннем питании. Промежуточный секционный автомат A_c имеющий меньшую выдержку времени чем подстанционные, выключается раньше их и отъединяет таким образом неисправный участок от исправного. Только после этого выключается автомат той подстанции, которая питает находящийся под коротким замыканием участок.

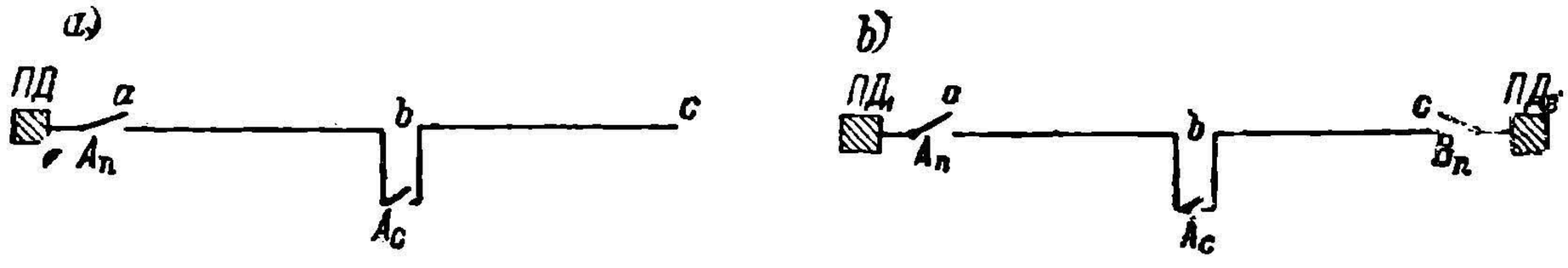


Рис. 680. Принципиальные схемы автоматического секционирования.

На рис. 681 приведены принципиальные схемы автоматического секционирования при двухпутных дорогах с электрическим соединением контактных проводов обоих путей. Схема *a* рис. 681 содержит промежуточный секционный пост, оборудованный автоматами, у которых выдержка времени меньше, чем у подстанционных. Благодаря такой схеме при аварии выключается только аварийный участок одного пути Вторая схема *b* рис. 681 дает несколько иное решение. Здесь, помимо секционного выключателя, имеются еще линейные выключатели A и A'_n, работающие по принципу нулевого реле. Они оказываются включенными только при наличии напряжения в прилегающем к ним контактном проводе. Если происходит в каком-либо месте короткое, например на участке *ab*, то сначала выключается секционный выключатель. Затем выключаются автоматы A_n и A'_n. После этого за отсутствием напряжения в линии, автоматически выключаются все линейные выключатели отключенной части сети. После этого путем пробного включения A_n и A'_n, через реостаты определяется аварийный участок пути. Преимущество данной схемы перед предыдущей в том, что при ней число пунктов соединения проводов обоих путей больше, чем при первой. Это дает возможность лучше использовать сечение рабочей сети. Нужно отметить, что секционные автоматы на приведенных схемах должны работать при обоих направлениях рабочего тока, проходящего через их обмотки. Короткое замыкание может случиться по ту и по другую сторону от секционного поста. При отсутствии таких автоматов приходится ставить вместо одного автомата два поляризованных. Из них один должен выключать систему при одном направлении тока, а второй — при противоположном.



Рис. 681. Принципиальные схемы автоматического секционирования при двухпутных ж. д. с электрическим соединением контактных проводов:

При переменном токе принципиальная сторона блокировки остается такой же, как и при постоянном. Выключатели здесь берутся масляные. При переменном токе выключение секционных выключателей очень часто базируют на реле напряжения, причем выдержка времени для них устанавливается выше, чем для автоматов подстанционных фидеров. Если взять элементарную схему *a* рис. 680 и применить ее к рассматриваемой системе, то работа должна протекать таким образом. При коротком на участке *bc* включается автоматически добавочное сопротивление в главную цепь масляника A_n. Ток в сети падает, а также понижается и напряжение. По прошествии определенного времени выдержки, если к этому моменту короткое не исчезнет, выключается секционный масляник A_c.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

При расчете секционирования рабочей сети приходится определять токи коротких замыканий. При этом полезно, помимо определения мощности самих выключателей, проверить и сечение контактного провода на плотность токов короткого замыкания. Расчет последних приходится вести, руководствуясь общей теорией этого вопроса (Л. 305).

При расчете эффекта токов короткого замыкания в контактном проводе приходится преимущественно оперировать с установившимися режимами. Для определения этих токов предварительно путем рассмотрения схемы проводов устанавливаются пункты, в которых короткое замыкание может быть наиболее опасным. Затем определяются контуры, по которым должны циркулировать токи коротких замыканий. Обычно эти контуры составляются из питательного фидера, контактного провода, ходовых рельсов, отсасывающего фидера и цепи преобразователя, работающего на данный участок провода. Нередко по отдельным частям контуров токов короткого замыкания идут токи от разных питательных фидеров или разных подстанций. Это преимущественно имеет место при многопутных ж. д. с электрическим соединением отдельных путей. В случае несвязанных контуров при определении токов короткого замыкания нормально составляется для каждого контура свое независимое уравнение э. д. с., действующих в процессе короткого замыкания. Оно составляется из э. д. с. преобразователя с учетом падения напряжения в нем и э. д. с. падений напряжения в прочих указанных элементах короткозамкнутого контура. В случае связанных контуров приходится иметь дело с соответствующим числом совокупных уравнений. При постоянном токе в уравнения включаются только падения напряжения омические. В случае переменных токов нужно учитывать падения напряжения активные и реактивные, определяя их по тому же правилу, как это было уже указано в отделе электрического расчета рабочих сетей. И при постоянном, и при переменном токах рационально учитывать уменьшение сопротивления рельсового пути из-за ответвления тока в землю.

При установлении влияния токов короткого замыкания на рабочую сеть приходится иногда считаться еще с одним осложнением. В некоторых случаях ток короткого замыкания оказывается меньше тока нормальной пиковой нагрузки. Это может получиться тогда, когда точки приложения пиковых нагрузок лежат относительно близко к питательному пункту. При таком условии с точки зрения допущенных падений напряжений могут оказаться пригодными провода с относительно небольшими сечениями. Последние могут быть настолько незначительными, а благодаря этому падения напряжения в удаленных пунктах от питательных пунктов настолько большими, что токи короткого замыкания, если последнее произойдет достаточно далеко от питательного пункта, могут оказаться меньше токов пиковой нагрузки. В результате максимальные выключатели, регулированные на максимально допустимый ток, в данном случае несколько выше пикового, не будут реагировать на короткое замыкание.

В качестве выхода из данного затруднения иногда рекомендуется усиливать сечения контактных проводов до такой величины, при которой токи короткого замыкания для любого пункта сети были бы меньше пиковых. С принципиальной точки зрения такой выход нельзя считать рациональным. Усиливать сечения, затрачивая цветной металл с целью увеличения токов короткого замыкания, противоречит сущности вопроса борьбы с ними. К этому допустимо прибегать только при отсутствии нужной аппаратуры. Наиболее рациональным выходом в данном случае нужно считать применение надлежащего секционирования контактного провода. Решение вопроса сводится к постановке быстродействующего максимального автоматического выключателя в каком-либо из пунктов контактного провода, находящегося от питательного пункта не дальше, чем критический пункт, после которого в случае короткого замыкания токи получаются меньше пиковых. Такой максимальный выключатель, отрегулированный на ток короткого замыкания, будет отключать находящийся за ним аварийный участок. Главный же максимальный выключатель подстанции будет выключать цепь во всех случаях, когда короткое замыкание будет происходить на участке до промежуточного выключателя.

В рассмотренном случае, когда токи короткого замыкания могут оказаться меньше токов пиковых, некоторую помощь в случае постоянного тока может иногда оказывать применение быстродействующих максимальных выключателей с индуктивным шунтом. Для нормальных токов и в частности для пиковых токов предполагается, что даже при возможных их колебаниях шунт ведет себя преиму-

НБ УГУНТ (ДІТ)

щественно, как омическое сопротивление. При коротком же замыкании в процессе резко выраженного неустановившегося режима шунт начинает вести себя, как достаточно большое реактивное сопротивление. В силу этого ток из шунта вытесняется и проходит в относительно большем процентном отношении через главную цепь автомата. Благодаря такому свойству индуктивных шунтов, систему можно

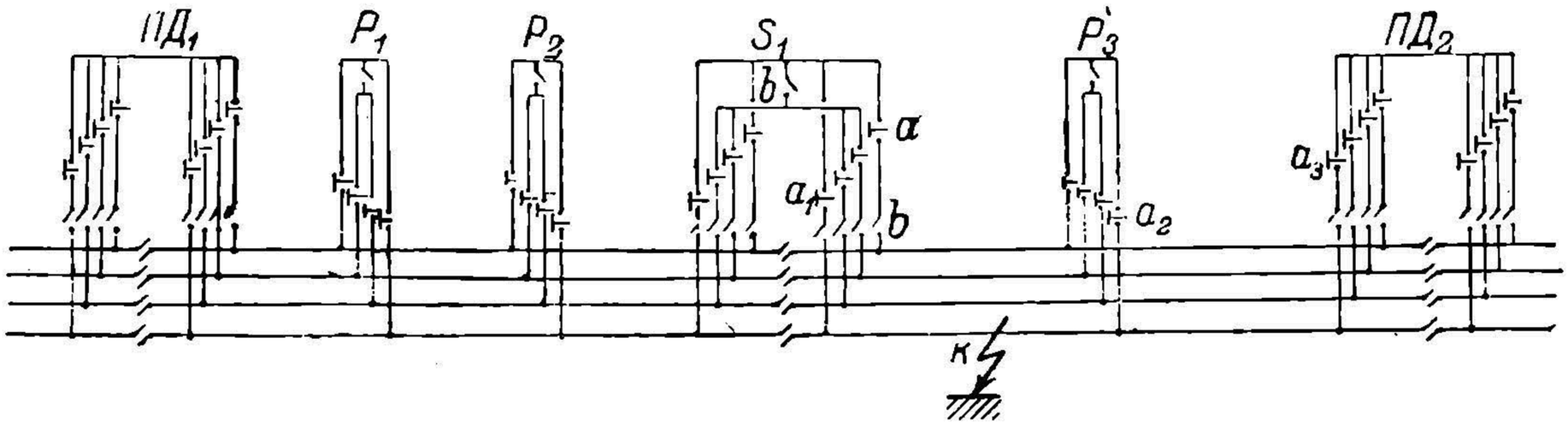


Рис. 682. Схема секционирования рабочей сети дороги Paris — Orléans.

так отрегулировать, что ток короткого замыкания, проходящий через рабочую обмотку автомата, сделается больше тока пикового, проходящего через ту же обмотку, даже в случае, если общий пиковый ток превышает ток короткого замыкания. Понятно, это происходит за счет того, что соответствующая часть пикового тока проходит через шунт, откуда ток короткого замыкания в значительной части своей вытесняется. Автоматы с индуктивными шунтами могут разрешить рассматриваемую задачу только для случаев, когда разница между пиковыми токами и токами короткого замыкания относительно невелика—чаще всего, если она не выше 10—25%. При расчете процесса короткого замыкания в случае индуктивных шунтов, естественно, приходится оперировать уже не с установившимся процессом, а с переходным (Л. 305).

В качестве примера секционирования рабочей сети постоянного тока можно привести схему четырехпутной дороги Paris — Orléans (рис. 682). Здесь через $ПД_1$ и $ПД_2$ обозначены подстанции, через S_1 — основной пост, исполняющий функции продольного и поперечного секционирования, через P_1, P_2 и P_3 — постовые будки или киоски для поперечного секционирования. Буквы a обозначают автоматы, b — простые выключатели. Расстояние между подстанциями принято около 20 km; такого же порядка расстояние и между главными постами. Посты же поперечного

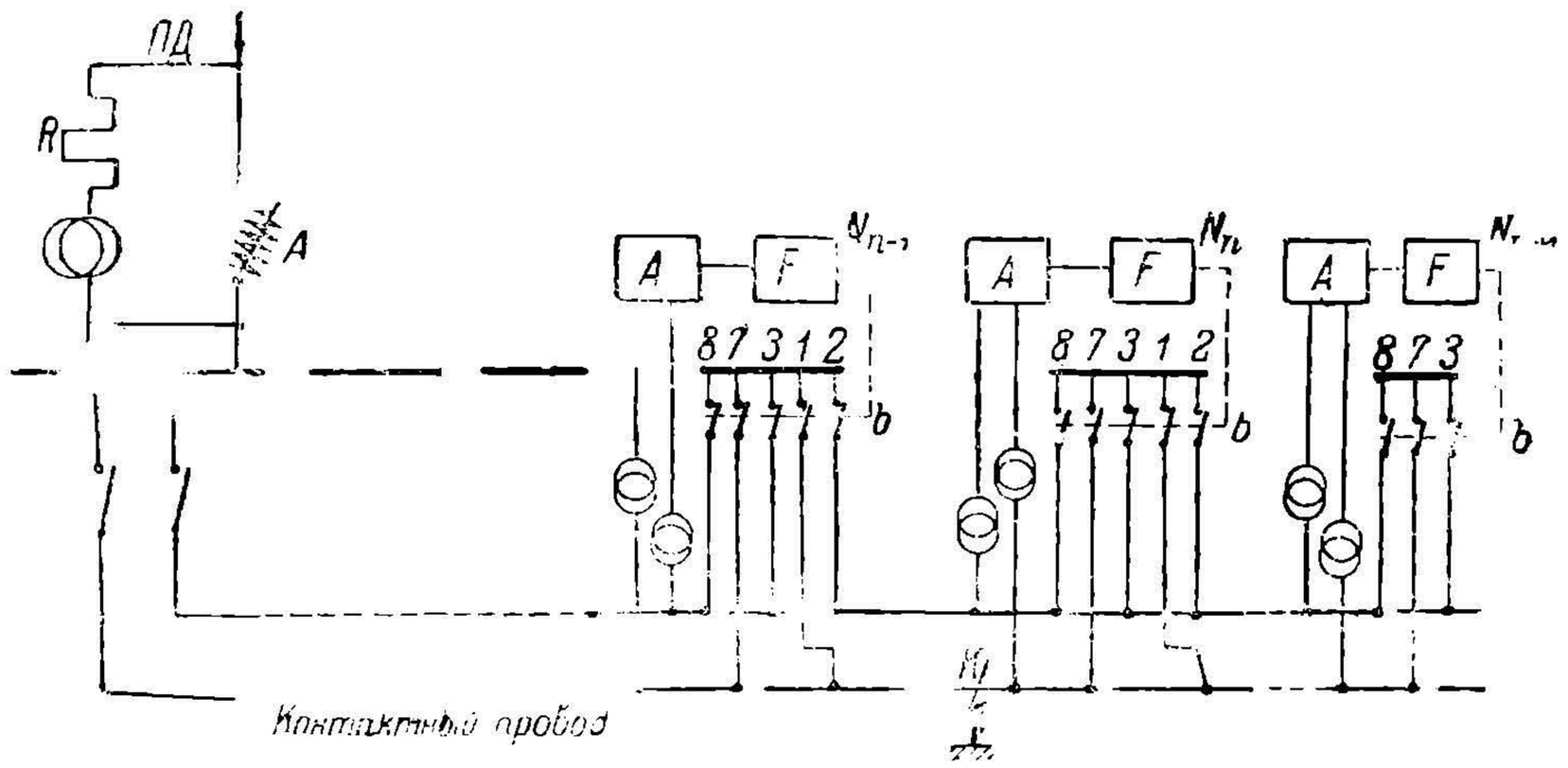


Рис 683. Схема секционирования рабочей сети дороги Salzburg — Zürich.

секционирования удалены друг от друга на 3—4 km. Операции при авариях протекают в следующем порядке. Пусть произошло короткое замыкание в точке K сети. Полный ток короткого замыкания пройдет при замкнутых выключателях в первую очередь через автоматы a_1 и a_2, в результате чего они будут выключены. Вслед за этим выключится автомат a_3 подстанции $ПД_2$. После этого весь аварийный участок будет отключен.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Несколько иная интересная система автоматической локализации аварий применена на швейцарской железной дороге однофазного тока Salzburg — Zürich (рис. 683). Здесь выключение аварийных участков достигается с помощью сервомоторов *A*, приводящих в движение контроллеры *F*. Назначение последних — выключать при аварии разъединители *b*. Приводятся в движение сервомоторы с помощью реле напряжений. Пусть короткое замыкание случилось в точке *K*. Вслед за этим сейчас же выключается подстанционный автомат. В цепи остается предохранительное сопротивление *R*, благодаря чему, несмотря на короткое замыкание, ток будет невелик, в данном случае — не выше 7А. Короткое замыкание системы вызовет, естественно, резкое падение напряжения в сети, благодаря чему реле напряжения приведут в движение сервомоторы, а следовательно, и контроллеры. Система регулируется таким образом, что контроллеры, начиная с наиболее удаленного пункта, в данном случае N_{n+1}, начинают выключать разъединители *b*. Выключение это производится до тех пор, пока не будет вырублен последний провод, идущий к заземленному участку. На приведенной схеме этому будет соответствовать выключатель *1* пункта N_{n-1}. После этого действие реле и сервомоторов прекращается, и можно приступить ко включению всех разъединителей *b* за исключением *1* и *7* пунктов N_{n-1} и N_n.

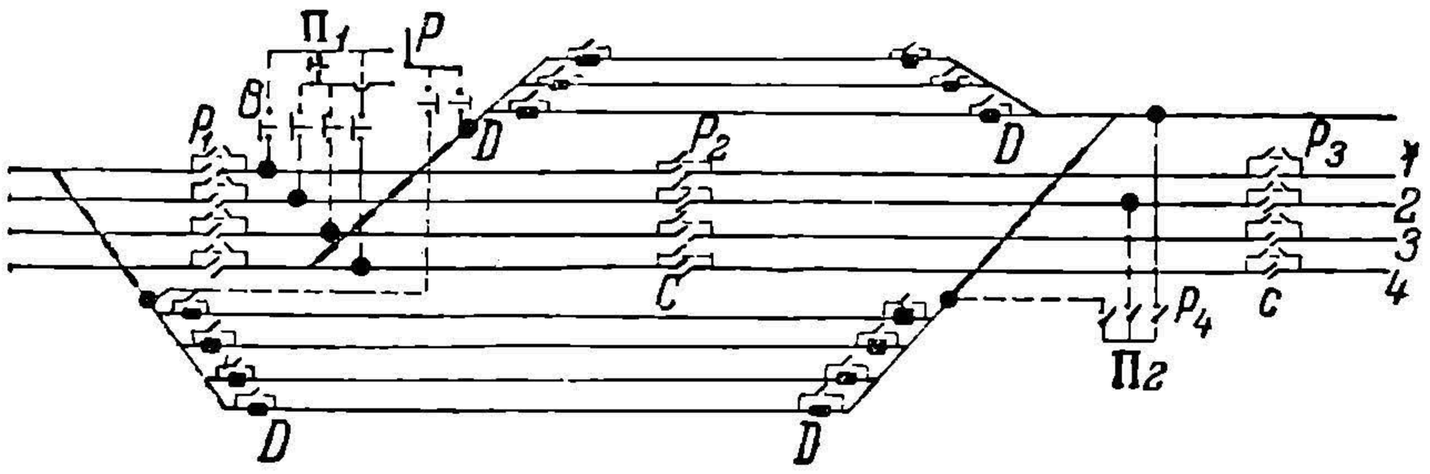


Рис. 684. Схема секционирования станционных путей.

Особо стоит вопрос о секционировании путей станций. Как общее правило, станционные пути рекомендуется отделять разъединителями от путей на перегоне. Это дает возможность защитить последние от коротких замыканий, возникновение которых наиболее вероятно на станциях. При большом развитии станционные пути в отношении секционирования разбиваются на отдельные группы. Ведущие в депо и погрузочные пути должны отделяться от прочих путей особыми разъединителями, выключение которых обязательно должно сопровождаться заземлением отключаемых участков, чтобы наиболее надежно защитить рабочий персонал на случай соприкосновения его с контактным проводом.

На рис. 684 приведена схема питания одной из станций дороги Paris — Orléans. Главный оперативный пост обозначен буквой $П_1$. Второй пост $П_2$ является вспомогательным. Работает он, главным образом, тогда, когда по тем или другим причинам приходится разъединять выключатель *P*. Буквами *C* обозначены места деления проводов на секции, производимого путем воздушных зазоров. Через *D* обозначены секционные делители, вставляемые в провод. *P*, P_1, P_2, P_3 и P_4 изображают выключатели простого действия, а *B* автоматы.

В некоторых случаях, преимущественно при одностороннем питании, для обеспечения подачи тока к отдельным перегонам, находящимся по ту и другую сторону станции, прибегают к обходным фидерам, связывающим эти перегоны.

2. Схемы питательных и отсасывающих сетей электрических железных дорог.

Для подводки тока от подстанций к питательным пунктам приходится иметь особые питательные фидера. Как уже отмечалось, в условиях магистральных и большинства пригородных железных дорог подстанции нормально располагаются около питательных и отсасывающих пунктов и соединяются с ними короткими фидерами. В условиях же городского транспорта при разветвленных рабочих сетях от каждой подстанции отходит по большей части несколько питательных и отсасывающих фидеров. Наиболее часто применяемые схемы фидерных цепей приведены на рис. 673 и 674. Значительно реже применяется схема рис. 685, недостаток которой — в большой разности потенциалов отдельных питательных пунктов.

Для более надежной и бесперебойной работы сети и более быстрого изъятия неисправного участка из общей сети иногда прибегают в трамвайной практике

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

к особому вспомогательному фидеру, идущему параллельно пути. Примером может служить схема, применяемая в некоторых случаях на английских трамвайных линиях (рис. 686). Преимущество этой схемы в том, что здесь можно сильно сократить длину отдельных секционных участков и тем самым в случае аварии ограничить перерыв движения небольшой длиной линии, имея возможность в то же время подавать ток на все исправные участки.

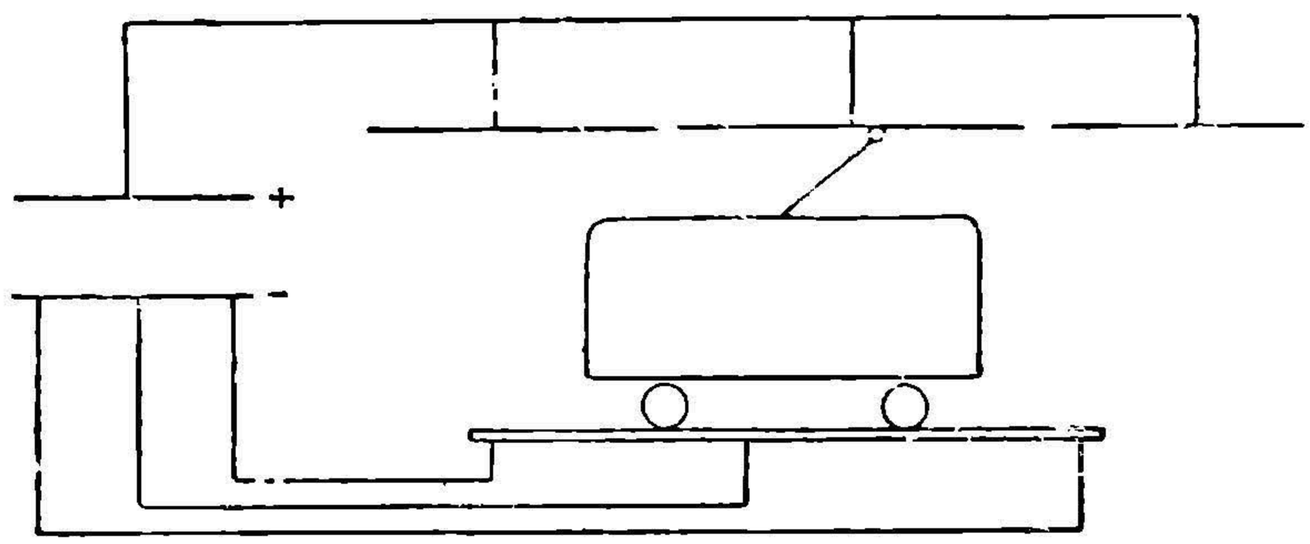


Рис. 685. Система питания рабочей сети одним общим фидером.

На рис. 687 приведена схема простейшего типа для питания однофазной железной дороги. Как уже было указано, при переменном токе бывает нужно в некоторых случаях принимать меры предосторожности против влияния токов контактных проводов на слаботочные провода. Одною таких схем наиболее часто применяемых на практике, например, на шведских железных дорогах, является схема рис. 688. Здесь, кроме контактного провода протянут еще вспомогательный фидер 1, связанный электрически с рельсами и через трансформаторы с контактным проводом. Назначение данной системы — переводить токи из рельсов с помощью отсасывающих трансформаторов в вспомогательный фидер, и, воспользовавшись его близостью к контактному проводу, уменьшить реактивное падение напряжения в рабочей сети и одновременно уменьшить влияние на слаботочные провода. Менее радикально действует старая схема Карр'а, в которой назначение сериесных трансформаторов — уменьшить падение напряжения в рельсовой сети (рис. 689).

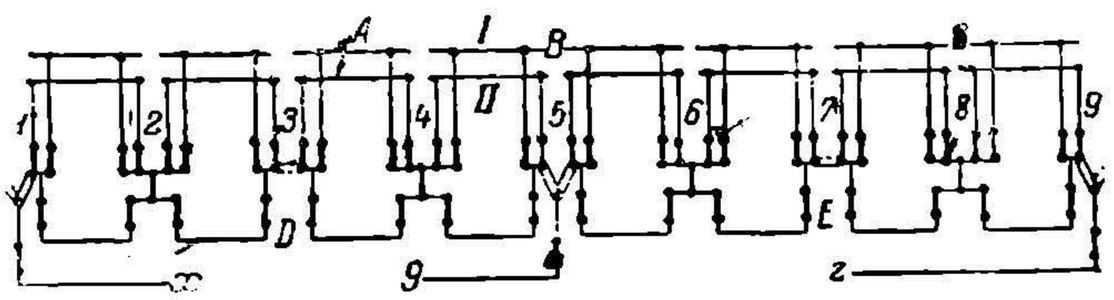


Рис. 686. Комбинированная система питания рабочей сети.

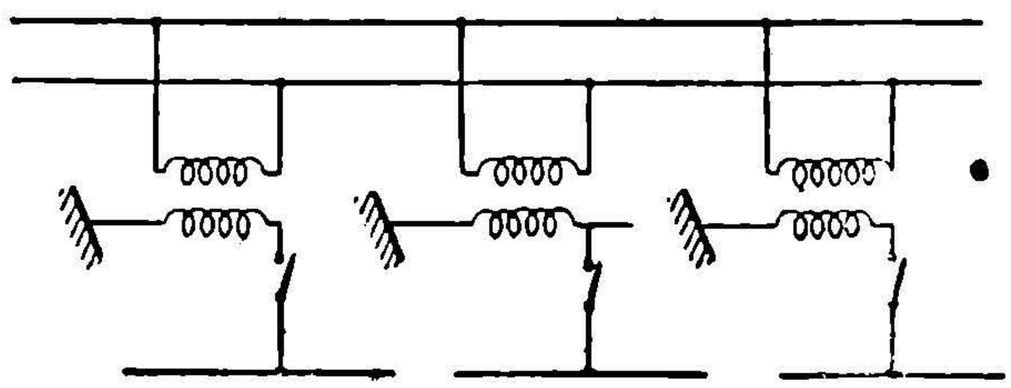


Рис. 687. Нормальная схема питания однофазной дороги.

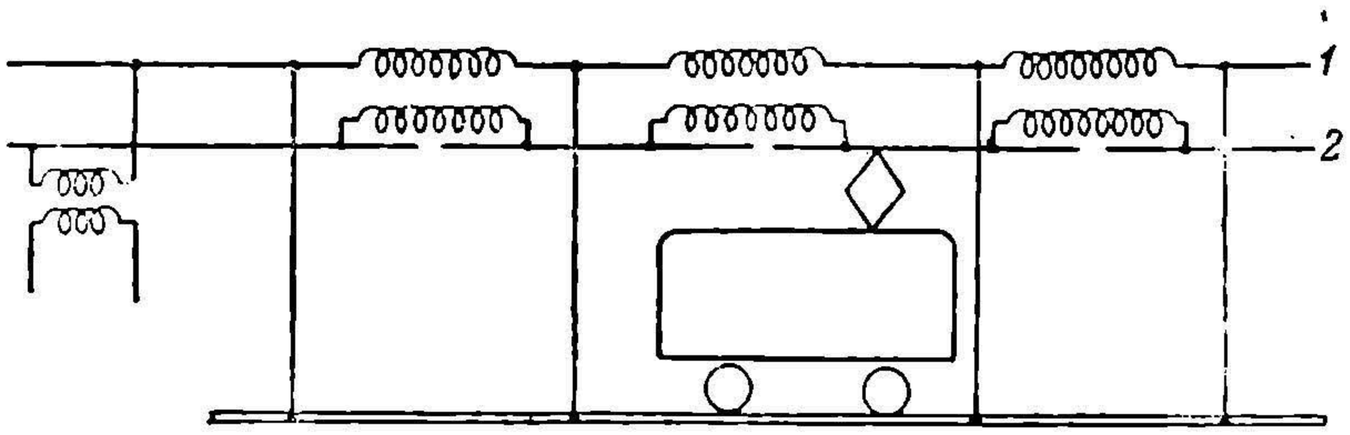


Рис. 688. Схема питания рабочей сети однофазной ж. д. с отсасывающими трансформаторами и добавочным проводом.

Особую систему питания однофазных железных дорог представляет собою так называемая трехпроводная схема (рис. 690), примененная на дороге Norfolk-Western и вообще находящая себе частое применение на американских железных дорогах. Здесь имеется вспомогательный уравнительный провод, который соединен с



Рис. 689. Схема питания рабочей сети однофазных ж. д. с трансформаторами для компенсации падения напряжения в рельсах.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

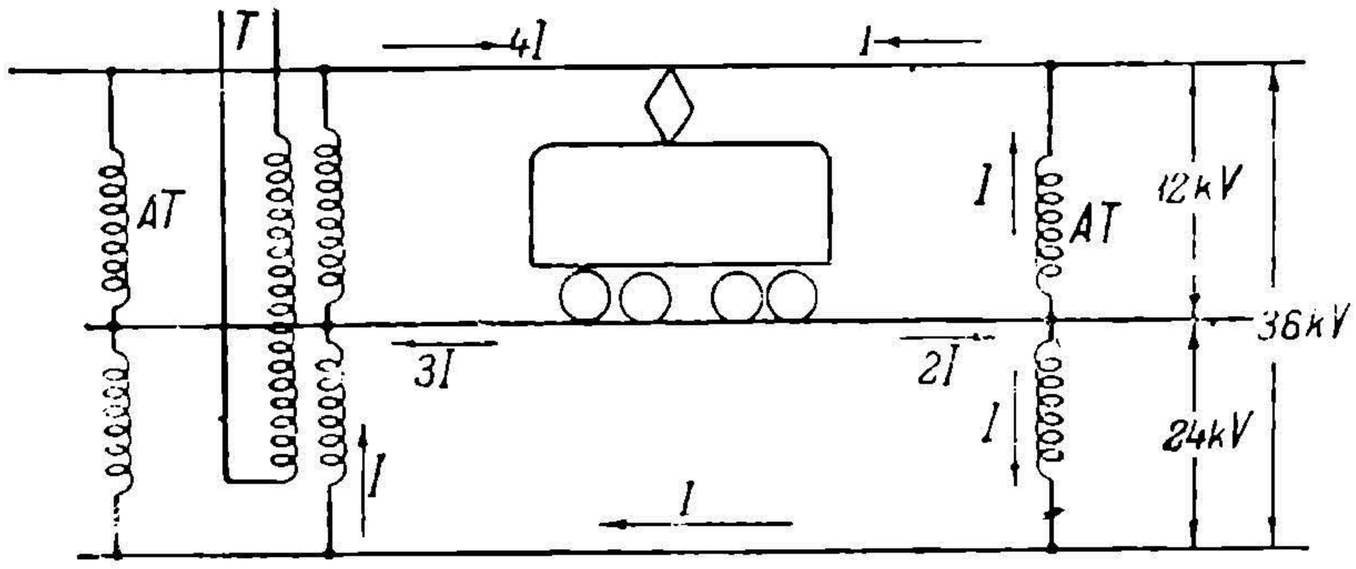


Рис. 690. Американская схема питания однофазной дороги со вспомогательным уравнительным проводом.

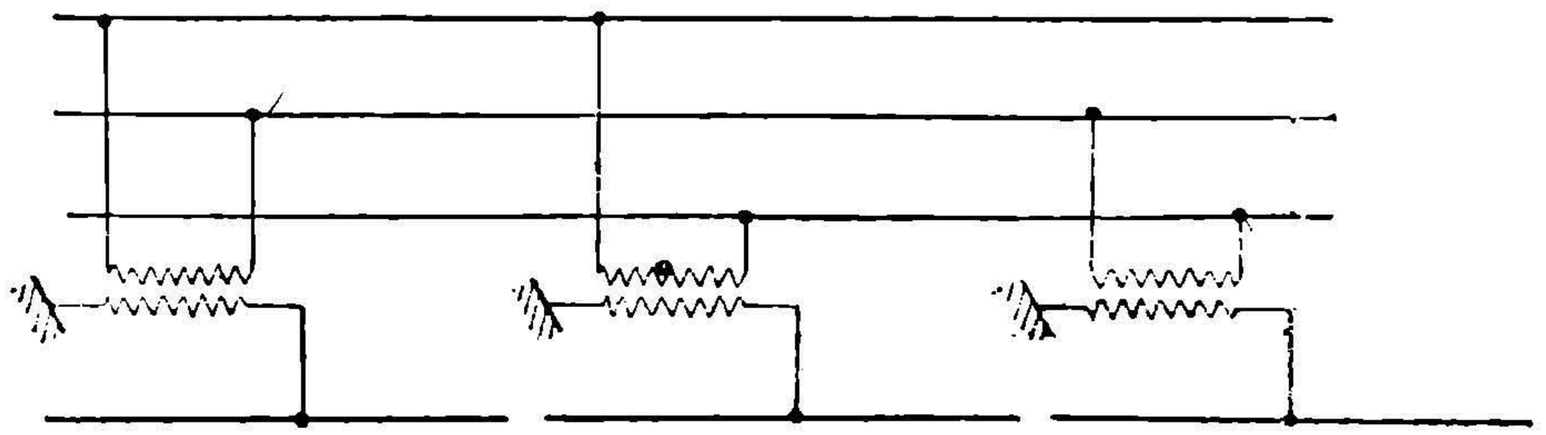


Рис 691. Простейшая схема питания однофазной рабочей сети от трехфазной линии передачи.

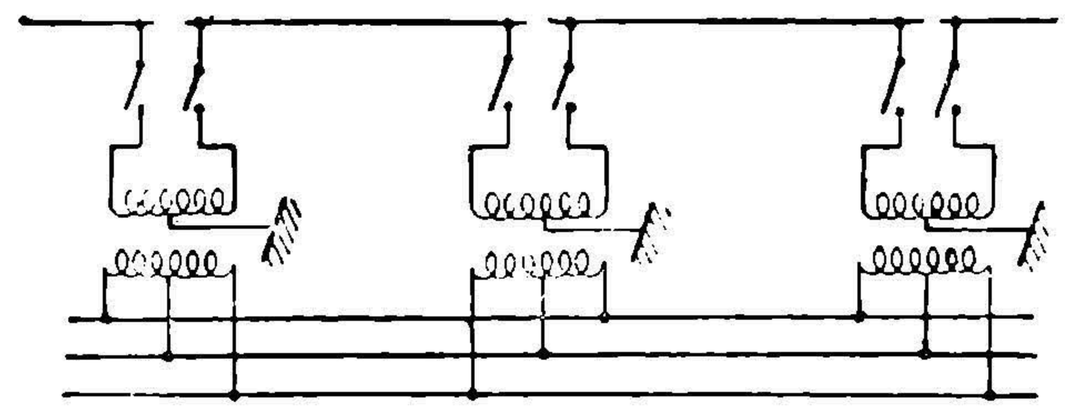


Рис. 692 Схема питания однофазной рабочей сети от трехфазной передачи с заземлением средней точки вторичной обмотки трансформаторов.

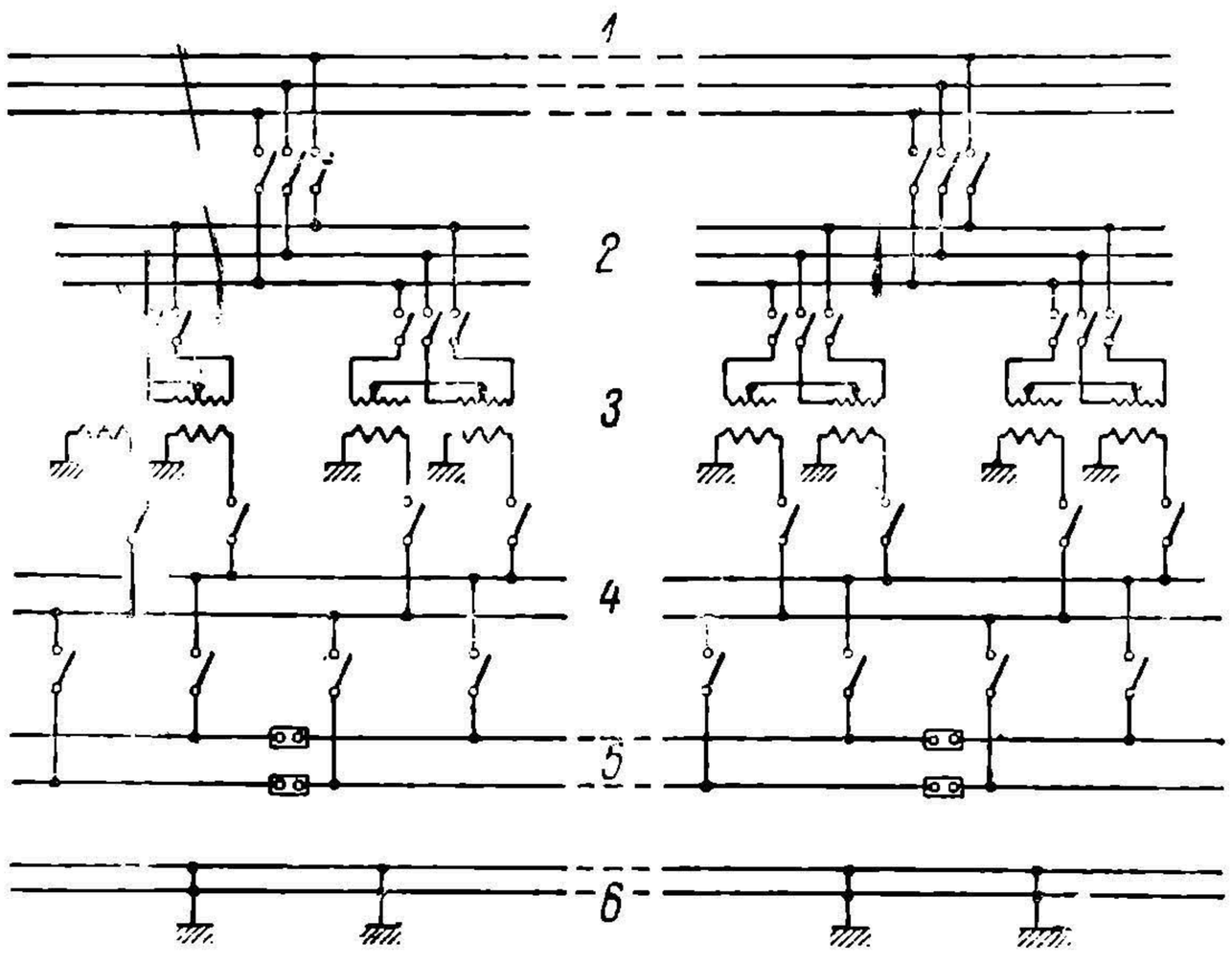


Рис. 693. Схема питания однофазной электрической железной дороги от трехфазной линии передачи по системе Scott'a.

контактным проводом и рельсами посредством автотрансформаторов *AT*. Питание же всей сети производится от подстанционного трансформатора *T*, у которого вторичная обмотка секционирована таким образом, что между контактным проводом и рельсами получается 12 kV, а между уравнительным проводом и рельсами — 24 kV.

Распределение токов при данном положении поезда в рабочей сети видно из той же схемы. Как показывают подсчеты Forwald'a, данная система питания благодаря разгрузке контактного провода и рельсов от токов позволяет увеличить расстояние между подстанциями в два раза. Кроме того, она понижает влияние на слаботочные провода. Отрицательная сторона такой системы — ее сложность и добавочные потери в автотрансформаторах (Л. 310).

Значительные трудности приходится преодолевать при питании однофазного контактного провода от трехфазной передачи, главным образом, из-за возможности неодинаковой нагрузки отдельных фаз. Наиболее простая схема питания однофазной дороги от трехфазной передачи приведена на рис. 691. Несколько видоизмененная система приведена на рис. 692. Можно также применить систему, основанную на принципе Scott'a (рис. 693). В случае питания однофазной дороги от мощных трехфазных передач общегосударственного пользования несимметрия в нагрузках отдель-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ных фаз особенно большого практического значения не имеет. Однако, в некоторых случаях несимметрия может быть и недопустимо значительной, неправильно перераспределяя напряжения в отдельных фазах. При таких условиях приходится ставить вопрос о фазных балансирах, перебрасывающих нагрузку от нагруженных фаз к недогруженным.

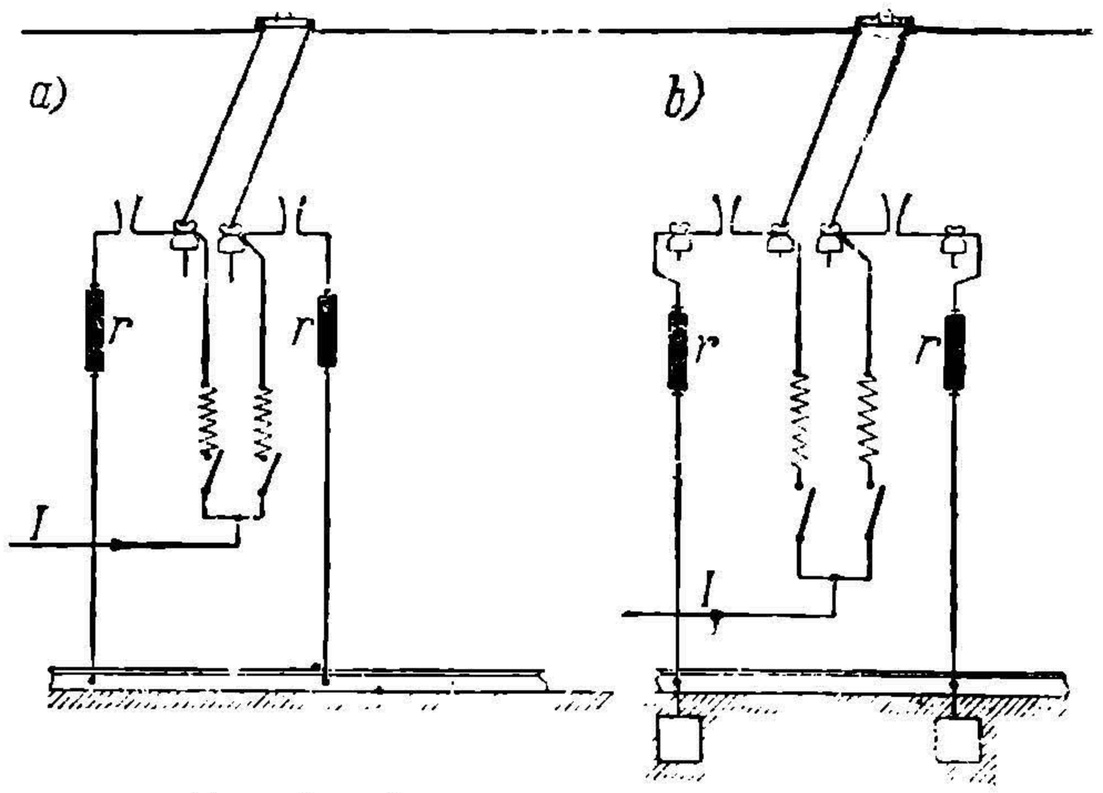


Рис. 694. Схемы питательных пунктов.

3. Устройство питательных и отсасывающих пунктов.

Нормальная схема устройства питательного пункта приведена на рис. 694. Каждый питательный пункт обязательно должен иметь выключатели для включения и выключения управляемой им секции. В случае подземных питательных кабелей ток к верхнему проводу подводится через кабель, проложенный по опоре в особой закрытой трубе. В том случае, если опоры трубчатые, соединительный кабель можно вести внутри опоры без особой защиты.

Для защиты линии от грозовых разрядов ставят в некоторых случаях у питательного пункта громоотводы с отражательными катушками. Громоотводы чаще всего ставятся в виде простых роговых разрядников. Иногда применяется система роговых выключателей с магнитным искрогасителем по системе Benischke (рис. 695-a). Оригинальна конструкция разрядника Вестингауза. Имеется коробка, в которой свободно могут передвигаться угольные рога. При образовании разряда воздух внутри коробки, нагреваясь, расширяется. Рога под давлением воздуха раздвигаются и этим движением разрывают дугу (рис. 695-b).

В простейшем случае выключатели и отражательные катушки монтируются в специальных ящиках, помещаемых на опорах. Ключи от питательных коробок хранятся у дежурного по линии. Для более сложных питательных пунктов строятся особые киоски, в которых сосредоточены выключатели, управляющие, как отдельными секциями контактного провода, так и вспомогательными фидерами.

В условиях железнодорожных линий, где на станциях и разъездах приходится управлять секционированными станционными путями, часто необходимо иметь специальные переключательные будки (рис. 682 и 684). Большим распространением в железнодорожной практике пользуются воздушные выключатели, монтируемые на опорах.

Особые требования приходится предъявлять к отсасывающим пунктам. В простейшем виде отсасывающее устройство состоит из фидера, идущего от рельса на подстанцию. Фидер требуется с нормальной кабельной изоляцией. Голая часть допускается только в месте отхода от пути на протяжении 1—3 m, не больше. Для наблюдения за потенциалом в точке отсасывания фидер должен иметь контрольную жилу, подающуюся на подстанцию. В некоторых случаях пункте отсасывания ставится специальный киоск (рис. 696). В него вводятся в первую очередь соединительные кабели от отсасывающих пунктов к шине *B*, и затем от нее идет основной

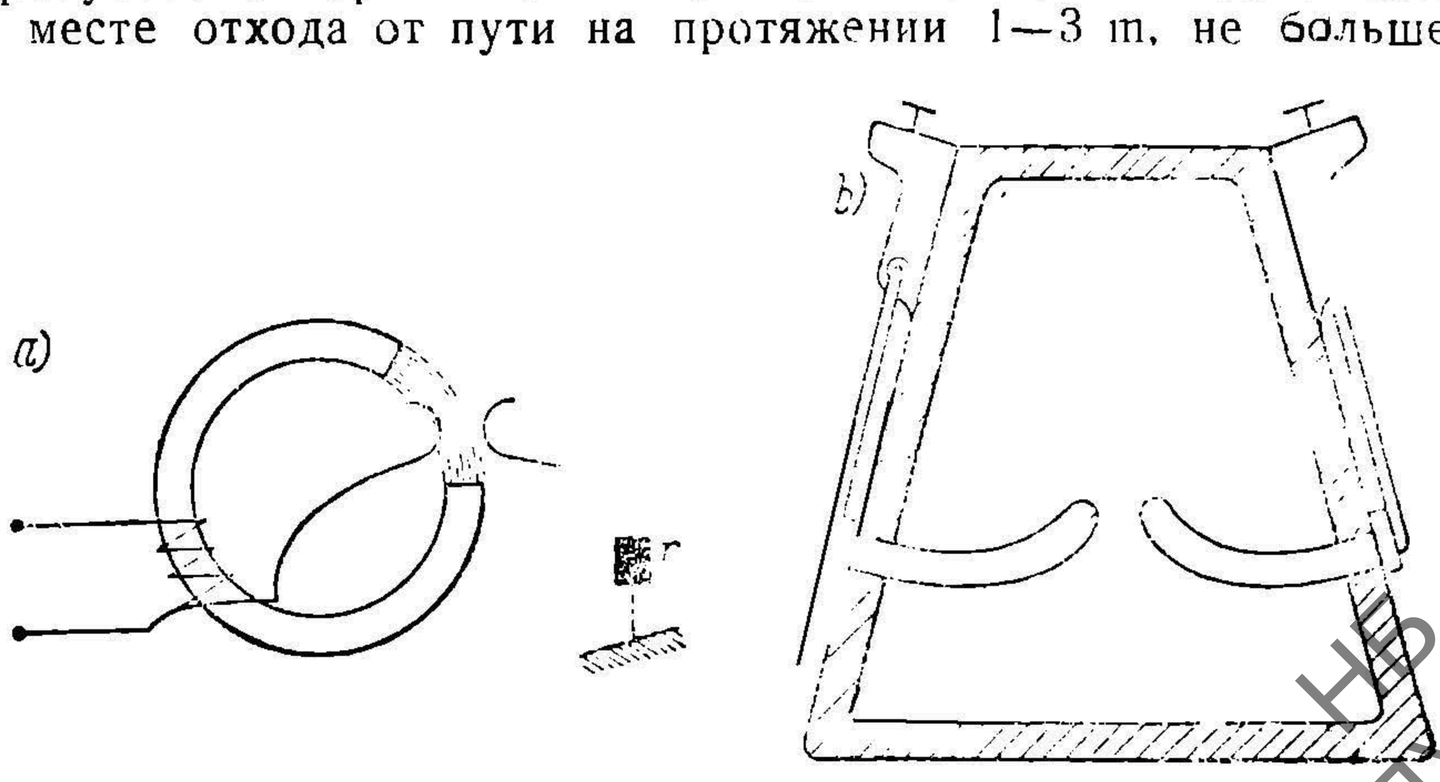


Рис. 695. Общий вид разрядников.

НВ УДУНТ (ДІІТ)

отсасывающий фидер на подстанцию. Наблюдение за состоянием потенциалов отсасывающих пунктов производится с помощью контрольных зажимов *D*. Наблюдать за ним можно или в самом киоске, или же отводить контрольные провода на под-

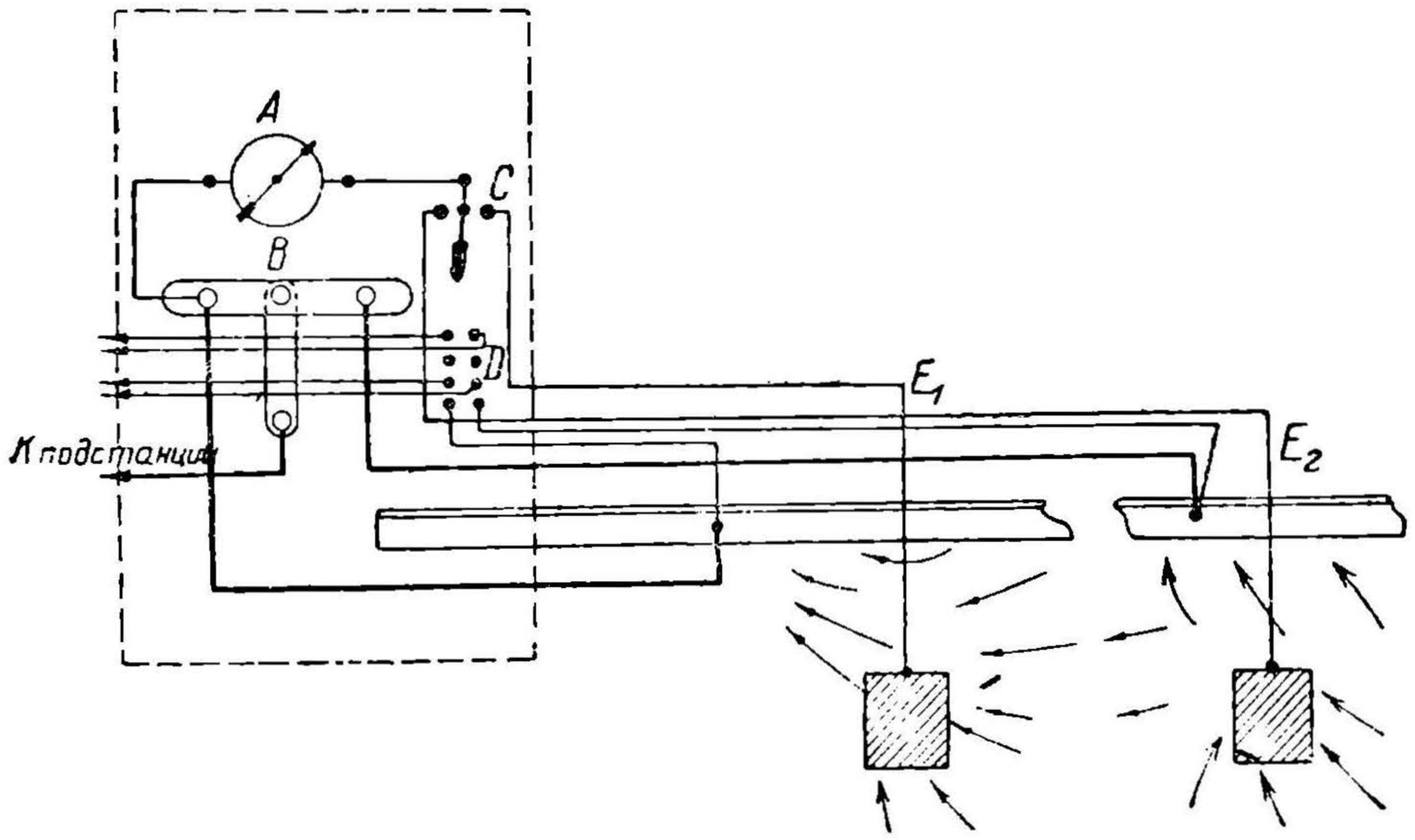


Рис. 696. Схема устройства отсасывающего пункта.

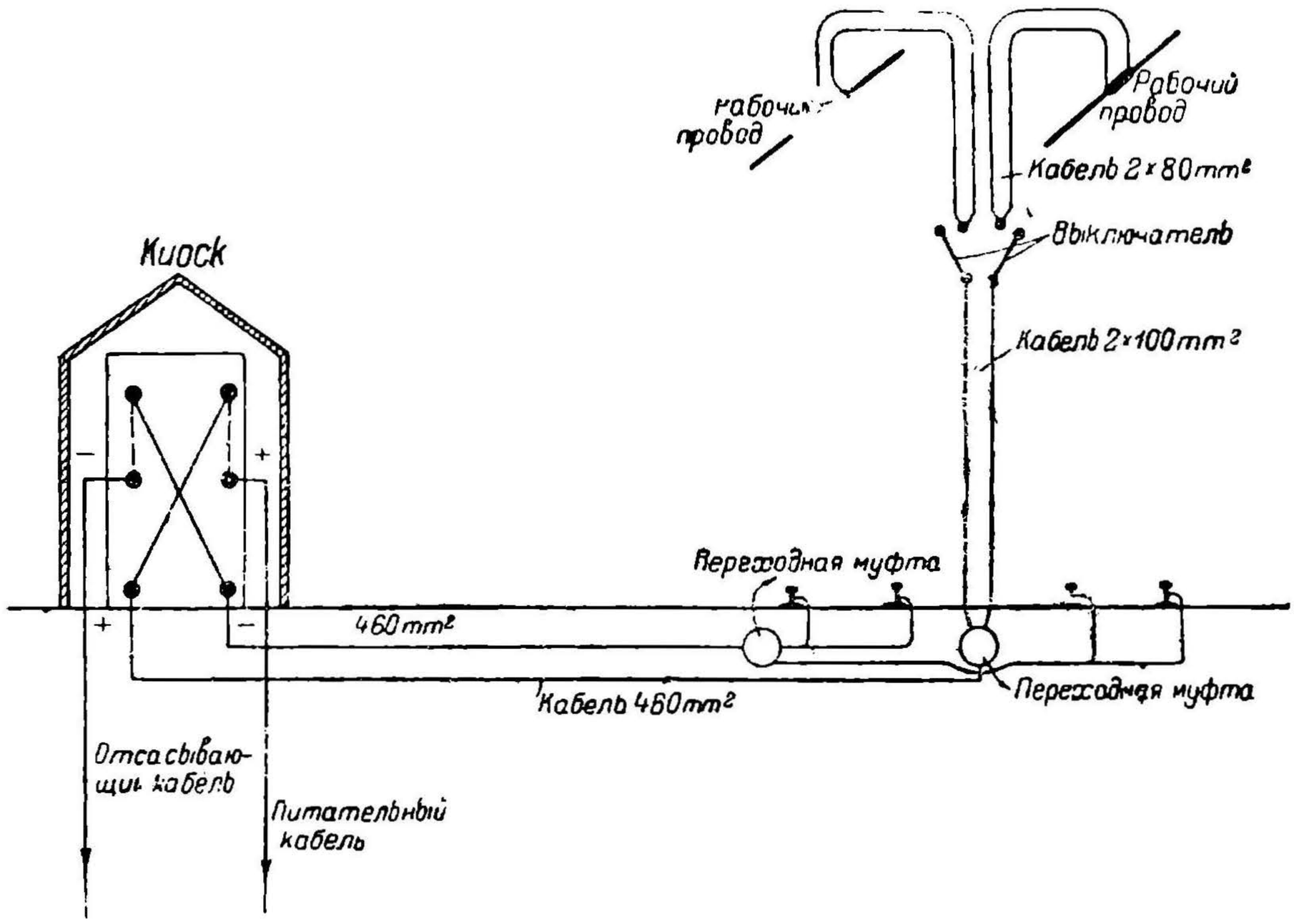


Рис. 697. Киоск питательного и отсасывающего пункта ленинградского трамвая.

станцию. Кроме этого, в киоске имеется приспособление для определения величины блуждающих токов. Оно состоит из заземленных проводов $E_1 - E_2$, приключаемых с помощью переключателя *C* через амперметр *A* к шине *B*.

В некоторых случаях питательные и отсасывающие ящики и киоски объединяются в один. При таких условиях очень часто применяют схемы взаимного замещения питательных и отсасывающих фидеров. В случае порчи питательного фидера включается вместо него отсасывающий. При этом делается допущение,

НБ УИУНТ (ДІІТ)

что установка временно до исправления может работать без отсоединенного отсасывающего фидера. Примером подобной установки может служить схема киоска ленинградского трамвая (рис. 697).

Питательные и отсасывающие подземные кабели прокладываются в особых канавах на глубине 0,5—0,75 m. Окружаются они высокосортным песком. Сверху прикрываются или кирпичем, или плоским камнем, или же специальными бетонными покрышками (рис. 698). Иногда они прокладываются в особых глиняных разъемных

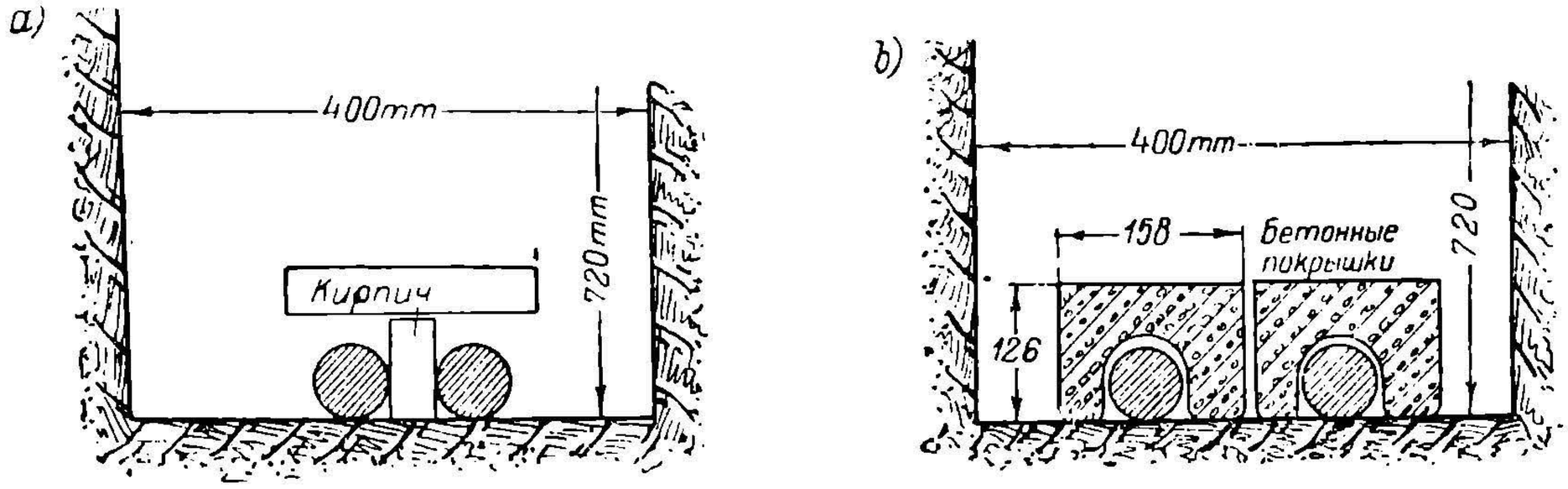


Рис. 698. Схемы укладки подземных кабелей

трубах. При прокладки кабелей под рельсами или вообще в местах, где возможна раскопка земли, а также при вводах и выводах с подстанции, рекомендуется вести кабели в чугунных трубах. В тоннелях питательные провода чаще всего проходят вдоль стен; их поддерживают крюки или бракеты. На дорогах надземного типа они прокладываются нормально в особых деревянных каналах, идущих вдоль третьего рельса. Соединение и ответвление кабелей производится с помощью муфт. Иногда применяют специальную пайку. При воздушной проводке питательные фидера прокладывают согласно общим правилам. В некоторых случаях частично удается использовать опоры контактного провода.

II ТЯГОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ.

1. Типы тяговых подстанций.

При изложении вопроса о подстанциях предположено дать только общую установку, считая, что подробному изложению должен быть посвящен специальный курс.

Назначение подстанций, как известно, заключается в преобразовании одного вида электрической энергии в другой. В условиях электрической тяги подстанции могут предназначаться для преобразования одного напряжения переменного тока в другое. Тогда получается простейший вид подстанции трансформаторного типа. Следующий тип подстанций имеет назначением преобразовывать не только напряжение, но и самый вид переменного тока. Сюда относятся подстанции, преобразующие одну частоту переменного тока в другую, и подстанции для преобразования фаз. Очень часто подстанции преобразуют одновременно напряжение, частоту и число фаз. Особую группу составляют подстанции для преобразования переменного тока, чаще всего трехфазного, в постоянный.

2. Трансформаторные подстанции.

Трансформаторные подстанции в тяге применяются или однофазного, или трехфазного тока. Трансформатор представляет собой один из самых экономичных преобразовательных механизмов. Коэфициент полезного действия у современных трансформаторов доходит до 95,5—98,8%. Изменяя соотношение потерь короткого замыкания и потерь холостого хода, можно наивысший коэфициент полезного действия получать при различных нагрузках. С точки зрения экономики желательно иметь его максимум при тех нагрузках, при которых перерабатывается

НВ УДУНТ (ДІІТ)

наибольшее количество энергии. Для суждения о потерях у современных тяговых трансформаторов приведена табл. 92, относящаяся к трансформатору однофазного гока германских железных дорог мощностью 5000 kVA.

ТАБЛИЦА 92.

Соотношение потерь в трансформаторах.

Названия	Гарантировано	Получено
Потери в железе в kW	22 00	19,20
Потери в меди в kW	102,00	99,50
К. п. д. для $\cos\varphi = 1$ при $^5/_4$ нагрузки в %	97,15	97,40
Тоже $^4/_4$ нагрузки	97,59	97,78
$^3/_4$ „	97,96	98,10
$^1/_2$ „	98,10	98,32
$^1/_4$ „	97,78	98,04
Напряжение короткого замыкания в % от нормального	8,80	9,20

Перегрузочная способность современных тяговых трансформаторов достигает весьма больших значений. Трансформатор германских железных дорог при 5000 kVA длительной мощности дает при двухчасовом режиме 6500, при 30 минутах — 7600 и при 10 минутах—10000 kVA. Существеннейшее влияние на вес и стоимость трансформаторов оказывает частота тока сети. Нужно ждать, что стоимость трансформаторной подстанции на 50 Hz будет на 25—30% меньше стоимости такой же подстанции при $16^2/_3$ Hz. Естественно, что стоимость трансформаторов при повышении напряжения резко возрастает. Так, например, по литературным данным, трансформаторы мощностью около 1000 kVA при напряжении 220 kV — в три раза а при 110 kV в два раза должны быть дороже такого же трансформатора при напряжении 6600 V.

3. Мотор-генераторные подстанции переменного тока.

Значительно осложнено преобразование переменного тока, когда нужно обращать трехфазный ток в однофазный. Такие подстанции приходится иметь в случае питания однофазных дорог от трехфазных передач. Наиболее надежными преобразователями здесь являются мотор-генераторы, состоящие из синхронного однофазного генератора и трехфазного синхронного мотора. Основное преимущество синхронных двигателей, как известно, заключается в широкой возможности регулировать коэфициент мощности сети. Во многих случаях они могут заменить собою специальные синхронные компенсаторы.

По тем же причинам синхронные мотор-генераторы применяются и для преобразования тока одной частоты в ток другой частоты. Обычно преобразование частоты в мотор-генераторах совмещается с преобразованием фаз. Следует отметить, что мотор-генераторные подстанции обладают плохим к. п. д. Этим объясняются попытки многих фирм, например BBC, Вестингауза, AEG, предложить преобразователь числа периодов в виде одной машины. Идея таких схем в большинстве случаев состоит в том, что статор имеет по две обмотки с разными числами полюсов. Ротор в таких системах является возбудителем, создавая тем или другим способом два вращающиеся поля, из которых одно движется с частотою, соответствующей обмотке первичного тока, а другое — вторичной обмотке. Обмотки статора и ротора имеют такое устройство, что взаимодействие происходит только между обмотками соответствующих чисел периодов. Следует отметить, что одностаторные преобразователи пока не получили практического применения, повидимому, из-за сложности конструкции.

Нужно указать, что в последнее время разрабатывается практически идея о применении преобразования одного вида переменного тока в другой с помощью ртутных выпрямителей с управляемыми сетками. В Германии имеется уже пробная установка этого типа. Однако, вопрос этот пока, повидимому, находится еще в стадии разработки.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

4. Подстанции для преобразования переменного тока в постоянный.

Очень разнообразны типы преобразователей для превращения переменного тока в постоянный. В настоящее время применяются преобразователи четырех систем: одноякорные, каскадные, мотор-генераторы и ртутные выпрямители. Большим распространением пока еще пользуются одноякорные преобразователи. Основное преимущество их — в высоком к. п. д. Последний тем выше, чем больше фаз имеют преобразователи. Большою стойкостью одноякорные преобразователи обладают в отношении перегрузок. Благодаря тому, что по их якорным обмоткам проходят токи генератора и двигателя, противоположные по направлению и близкие по величине, у них не только повышается к. п. д., но одновременно уничтожается и реакция якоря. Остаток некомпенсированного поля определяется величиною порядка 12—15% от полного потока, который создал бы якорь при том же рабочем токе и при одностороннем только эффекте в его обмотке.

Однако, при очень больших перегрузках, особенно при коротких замыканиях одноякорные преобразователи могут оказаться в очень тяжелом положении. При чрезмерно быстром повышении нагрузки на стороне постоянного тока нарастание переменного тока вследствие самоиндукции происходит более медленным темпом. В результате взаимная компенсация полей якоря нарушается. Основное поле искажается. Щетки преобразователя попадают в очень неблагоприятное положение. Это влечет за собою сильное их искрение, а главное — резкое местное повышение напряжения между соседними коллекторными пластинами. Отсюда — возможность кругового огня.

Одним из средств борьбы с этим явлением служит применение добавочных полюсов, значительно улучшающих процесс коммутирования машины. Специально для предотвращения кругового огня довольно часто применяются коллекторные экраны. Экраны представляют собой слюдяные пластины, устанавливаемые по коллектору радиально, как можно ближе к его поверхности. Назначение таких экранов — воспрепятствовать образованию сплошного кругового огня, не допуская его переброски от одной щетки к последующим. Для защиты от переброски дуги на корпус машины иногда применяют по концам коллектора слюдяные кольца.

Одноякорными преобразователями можно пользоваться и для регулирования коэфициента мощности сети. Однако, особенно широкой регулировки достигать при их помощи не удается, так как большие реактивные токи в самой машине понижают ее коэфициент полезного действия и общую устойчивость ее работы. Регулировку напряжения возбуждением на стороне постоянного тока производить нельзя. Наиболее часто для этой цели применяется метод включения дроссельных катушек со стороны переменного тока. При работе преобразователя упреждающими токами эти катушки, как известно, дают составляющие э. д. с. почти одного направления с напряжением сети. В результате полное напряжение на зажимах преобразователя увеличивается, а следовательно, растет и напряжение на стороне постоянного тока. Для некоторой автоматизации регулировки довольно часто прибегают к компаундной обмотке, которая с увеличением нагрузки автоматически увеличивает степень перевозбуждения машины.

Обладая общим свойством обратимости и шунтовой характеристикой со стороны постоянного тока, одноякорные преобразователи могут работать и при рекуперации энергий. Основной их недостаток при этом — связанность регулирования процессов работы машины на сторонах постоянного и переменного токов. Перегрузочная способность одноякорных преобразователей весьма велика. При кратковременных перегрузках она ограничена, главным образом, коммутацией. Так, например, для Южно-французских железных дорог ВВС гарантировала при длительной мощности к 750 — двухчасовую в 1 125 и пятиминутную в 2 250 kW. Параллельная работа одноякорных преобразователей протекает вполне удовлетворительно. При этом предпочтительно, чтобы каждый преобразователь имел свой собственный трансформатор во избежание ненужных уравнительных токов между отдельными машинами. При работе с другими типами машин нужно иметь в виду, что внешняя характеристика одноякорных преобразователей дает падение напряжения всего только порядка 4—6%.

При конструировании одноякорных преобразователей трудности возрастают с увеличением частоты сети и напряжения на коллекторе. Долгое время полагали, что при больших мощностях и достаточно высоких напряжениях поднимать частоту

НБ УГУНТ (ДІІТ)

выше 25 Hz нерационально. Однако, в настоящее время техника разрешила вполне удовлетворительно задачу сооружения достаточно мощных преобразователей с высоким напряжением на коллекторе при промышленных частотах. Теперь можно встретить на тяговых подстанциях одноякорные преобразователи при 25 Hz и напряжении 750 V с мощностями, доходящими до 4000—5000 kW. При частотах 50—60 Hz и напряжении 500—600 V имеются машины с мощностями 2500—3000 kW. Можно считать, что при частоте 50 Hz вполне совершенно могут конструироваться одноякорные преобразователи на 1500—1650 V. Примером могут служить Южно-французские железные дороги, для которых BBC поставила ряд подобных преобразователей.

Нужно указать, что при напряжении 1500 V часто берут по два последовательно соединенных преобразователя. Примером может служить французская железная дорога Paris-Orléans. Пуск и разгон одноякорных преобразователей в большинстве случаев производится со стороны переменного тока. Для этого применяются преимущественно два метода. Первый основывается на применении специального небольшого разгоночного асинхронного двигателя. Второй, получающий теперь все большее распространение, — это метод асинхронного пуска преобразователя.

Значительным распространением в тяговых установках для преобразования переменного тока в постоянный, пользуются мотор-генераторы. Основное их преимущество в том, что стороны постоянного и переменного тока не находятся у них в такой большой зависимости друг от друга, как в одноякорных преобразователях. Можно поэтому свободнее регулировать как режим переменного, так и режим постоянного тока. При синхронных мотор-генераторах можно в очень широких пределах регулировать $\cos\varphi$, не опасаясь каких-либо тяжелых последствий для машины. Одновременно с $\cos\varphi$ можно как угодно вариировать и напряжение постоянного тока. Особенно удобны мотор-генераторы при рекуперации, обеспечивающие вполне устойчивый и широко регулируемый процесс переброски энергии через подстанцию в сеть высокого напряжения.

Мотор-генераторы на стороне переменного тока выполняются или с асинхронными двигателями, или с синхронными. Первые применяются только в относительно маломощных установках. Вообще же наибольшее распространение имеют двигатели синхронные, обладающие уже отмеченным очень ценным свойством исправления $\cos\varphi$ сети.

На стороне постоянного тока берутся шунтовые или компаундные генераторы. Преимущество компаундных машин заключается в меньшей зависимости напряжения на зажимах от нагрузки. При соответствующем подборе витков сериесной обмотки можно добиться даже некоторого перекомпаундирования, т. е. не только не понижения, а наоборот повышения напряжения с возрастанием нагрузки. Такая характеристика очень благоприятна в отношении борьбы с падением напряжения в рабочей сети. Однако, компаундные характеристики представляют большую опасность при коротких замыканиях. Ввиду этого в последнее время замечается некоторое течение в пользу шунтовых характеристик.

Мотор-генераторы тяговых подстанций работают по большей части в очень тяжелых условиях. Особенно тяжелы условия коммутирования тока при больших перегрузках и коротких замыканиях. Для улучшения коммутационного процесса и предотвращения кругового огня генераторы современных преобразователей при более или менее значительной мощности снабжаются добавочными полюсами и компенсационными обмотками. Снабжаются они также иногда перегородками по коллектору. При таких мероприятиях коммутация получается более надежной, чем у одноякорных преобразователей. Наличие специальной компенсационной обмотки в значительной степени гарантирует щетки даже при коротких замыканиях от попадания в зону неблагоприятного магнитного поля. У одноякорных же преобразователей щетки при коротком замыкании могут оказаться в зоне поля, недопустимо искаженного и особенно неблагоприятного для коммутации.

При рекуперации энергии мотор-генераторы работают устойчиво и допускают свободную регулировку системы как на стороне постоянного тока, так и на стороне переменного. Из всех существующих типов преобразователей мотор-генераторы для целей рекуперации являются наиболее подходящими. В некоторых случаях для достижения широкой регулировки и устойчивой работы мотор-генераторы снабжаются специальными обмотками.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Мощность мотор-генератора какими-либо особыми конструктивными соображениями не ограничена. Наиболее ходовая мощность для дорог магистрального типа— 1500 — 2000 kW. При высоких напряжениях преобразователь нормального типа состоит из одного синхронного двигателя и двух динамо, последовательно соединенных. При 3000 V такая система является до известной степени стандартной. Однако, нужно иметь в виду, что в случае нужды можно на одном коллекторе получать напряжения и превышающие 1500 V.

Перегрузочная способность у современных мотор генераторов очень высока. Правда, она, повидимому достигается за счет некоторого снижения длительной мощности. Например, для преобразователей дороги Ch. M. St. P. R. были гарантированы следующие перегрузки. Постоянную мощность машины должны были развивать при повышении температуры над окружающей средой в 35° C. Перегрузку в 75% они должны были выдерживать в течение двух часов при повышении в 60 C. и наконец перегрузку в 200% они должны были держать в течение пяти минут уже при предельно допустимой температуре нагрева.

Существенным недостатком мотор-генераторов является относительно низкий коэфициент полезного действия. Наличие двух или трех главных машин и специальных возбудителей сильно снижает отдачу, которая становится особенно неудовлетворительной при недогрузках машин, что в условиях тяги представляет собой обычное явление. При нормальной нагрузке коэфициент полезного действия мотор-генераторов с учетом трансформаторов должен быть порядка 88—90%. При половинной же нагрузке он будет не выше 82 — 83% и при одной четверти около 76—76%. В виду этого средне-эксплоатационная его величина должна неизбежно быть весьма невысокой. Так, например, для одной из итальянских железных дорог Torino-Cères она определилась около 79,5%. Кроме указанного, к числу отрицательных сторон мотор-генераторных подстанций относится большая тяжесть машин и большая стоимость всего оборудования. Точно также и кубатура зданий при мотор-генераторах получается весьма значительной, существенно превышая нормы для других типов преобразователей. По этим причинам мотор-генераторы применяются только в случаях особо трудной и ответственной работы, главным образом на линиях, где рекуперируется энергия.

Следующий тип преобразователей представляет каскадный умформер. Он состоит из асинхронной машины, ротор которой включен на зажимы сочлененного с нею одноякорного преобразователя. Как известно из теории каскадных преобразователей, асинхронная машина у них работает частично как асинхронный двигатель и частично, как трансформатор. Вторая же машина работает генератором постоянного тока и одноякорным преобразователем. Так как в данном преобразователе имеются элементы трансформатора и одноякорного преобразователя, то его коэфициент полезного действия должен быть несколько выше, чем у обычных мотор-генераторов. Преимуществом каскадного преобразователя является возможность иметь во вторичной цепи, в которой работает одноякорный преобразователь, частоту обычно в два раза меньшую, чем в первичной цепи. Так при частоте первичного тока 50 Hz одноякорный преобразователь будет работать при частоте около 25 Hz.

Регулирование коэфициента мощности при каскадных преобразователях производится путем изменения тока возбуждения у одноякорного преобразователя. Мощности установленных каскадных преобразователей достигают порядка 2500 kW. В случае нужды, напряжение постоянного тока у них можно доводить до 1000 V и выше, хотя в имеющихся установках оно не превышает значений порядка 800 V. Опыт показал, что существенного преимущества каскадные преобразователи не имеют. Особенно ясно это обнаружилось, когда была решена задача рациональной постройки одноякорных преобразователей для 50 Hz и для высокого напряжения. Из более или менее значительных тяговых установок с каскадными преобразователями следует отметить гамбургский метрополитен.

Большими достоинствами, как преобразователи переменного тока в постоянный, обладают ртутные выпрямители. Основные их преимущества заключаются в отсутствии вращающихся масс, относительной легкости и дешевизне, а также в чрезвычайно высоком к. п. д. Последний, как известно, определяется в ртутных выпрямителях почти исключительно потерею напряжения в отдельных частях цилиндра и практически не зависит от тока. Наибольшее падение напряжения, до 16 V, имеет место при прохождении электронов в парах ртути. На катоде теряется около 5,3 V

ДВ УГУНТ (ДІІТ)

на анодах около 4 V. В сумме общее падение напряжения определяется величиной порядка 25 V. Данная величина мало зависит от преобразуемого напряжения, и потому коэфициент полезного действия ртутных выпрямителей быстро растет с их увеличением, доходя, если учесть потери только в цилиндрах, при 3000 V до 99%.

В условиях тяги применяются почти исключительно ртутные выпрямители с металлическими сосудами, хотя для небольших установок можно считать вполне приемлемыми и выпрямители стеклянные. Несмотря на относительно недавнее появление ртутных выпрямителей, в области их изготовления достигнуты очень большие успехи. В настоящее время можно иметь вполне надежные выпрямители мощностью до 6000 — 10000 kW. Большие успехи достигнуты и в отношении напряжений. Построить теперь ртутный выпрямитель на 3000 V или даже на 5000 V не представляет никаких технических трудностей. Имеются отдельные типы выпрямителей с напряжением, доходящим даже до 15—20 kV.

Современные ртутные выпрямители обладают большой перегрузочной способностью. Они особенно хорошо выдерживают перегрузки кратковременного характера. Несколько ниже у них перегрузочная способность при перегрузках более длительных. Так, например, часовой режим по сравнению с длительным практической разницы не дает. Но в течение пяти минут они уже могут выдерживать перегрузки до 100%, а в течение одной минуты до 200%. Для наших ртутных выпрямителей ОСТ дает свои нормы. При проектировании следует пользоваться каждый раз последними их узаконениями.

Одним из осложнений в работе ртутных выпрямителей является процесс обратного зажигания. Процесс этот, как известно, характеризуется тем, что в случае отказа какого-либо анода работать, ток замыкается не по направлению аноды — катод, а по направлению аноды — анод, через вторичную обмотку трансформатора. Тогда потенциалы катода и нейтральной точки трансформатора, в нормальных условиях дающие полное напряжение, уравниваются, постоянный ток прекращается, и выпрямитель выключается масляником на стороне высокого напряжения. При работе аварийного выпрямителя параллельно с другими агрегатами картина осложняется. Исправные преобразователи тогда оказываются включенными почти на полное короткое, и в аварийный выпрямитель через катод, неисправный анод вторичную обмотку трансформатора проходит недопустимо большой ток по направлению обратный нормальному. Для предотвращения этой опасности обычно в цепь каждого выпрямителя включается быстродействующий выключатель обратного тока. Главной причиной возникновения обратного зажигания является повышение давления в резервуаре, проникновение посторонних газов и чрезмерная конденсация паров ртути на анодах

Внешняя характеристика ртутных выпрямителей дает понижение напряжения с нагрузкой. Вид ее зависит от способа включения трансформаторов. Она может иметь форму постепенно падающей, с общим падением 10 — 12% или иметь вначале резкий скачек вниз до 12—14%, а затем постепенное падение от 4% до 6% на всем рабочем интервале. Таков, например, тип характеристики выпрямителей с катушкой Kübler'a. Вообще, характеристики ртутных выпрямителей допускают надежную параллельную работу их как друг с другом, так и с мотор-генераторами и одноякорными преобразователями.

Для исправной работы ртутных выпрямителей необходимо особенно внимательно следить за вакуумом, который обычно поддерживается в пределах 1 — 10 μ ртутного столба. Очень внимательно нужно следить и за охлаждением, так как только при поддержании температуры отдельных частей ртутного выпрямителя в определенных нормах возможна достаточно совершенная работа. Чаще всего стремятся охлаждать его с помощью проточной воды. Расход ее — приблизительно 1 l/min на 100 A. Вода должна быть без особых примесей и, в частности, не содержать большого количества извести. При отсутствии достаточного количества хорошей воды прибегают к циркуляционному процессу. Вода после прохождения через выпрямитель прогоняется через змеевики, охлаждаемые имеющейся в распоряжении низкосортной водой. В случае охлаждения проточной водой или поверхностного охлаждения водопроводные трубы тщательно изолируются от частей ртутного выпрямителя, находящихся под напряжением, при посредстве промежуточных резиновых рукавов. При высоких напряжениях порядка 3000 V и выше по большей части прибегают к охлаждению змеевиков помощью воздушных вентиляторов.

ПГУТИ УДУНТ (ДІІТ)

Недостатком ртутных выпрямителей является неподчинение их закону обратимости. Энергия у них может нормально преобразовываться только из переменного тока в постоянный. Это свойство ртутных выпрямителей не дает возможности применять их при рекуперации энергии, разве что имеется полная уверенность, что не будет избытка энергии, другими словами, что вся рекуперируемая энергия будет поглощаться в пределах данного участка подстанции. Если же такой уверенности не будет, то применение ртутных выпрямителей возможно только при принятий особых защитных мер. Наиболее простым мероприятием здесь могут явиться особые балластные реостаты, которые, находясь на подстанциях, должны включаться в тот момент, когда возникает опасность избыточной рекуперации. Включение и выключение этих реостатов можно производить через реле напряжения или тока. В случае избыточной рекуперации напряжение на шинах будет расти, а рабочий ток в цепи падать. На принципе повышения напряжения или понижения тока и можно построить реле. Недостаток такой системы в том, что вся избыточная рекуперационная энергия должна поглощаться балластными реостатами. Следует обратить внимание на большие перспективы, которые открываются в связи с входящими в настоящее время в практику ртутными выпрямителями с управляемыми сетками, о которых уже было упомянуто при разборе работы вентильных двигателей. Среди других возможностей управляемые сетки дают возможность практически решить вопрос об обратимости ртутных выпрямителей.

Следует напомнить, что значительным недостатком ртутных выпрямителей является пульсирующий характер выпрямленного тока.

Как уже было отмечено, одним из существеннейших преимуществ ртутных выпрямителей является высокий их к. п. д. Особенно ценно при этом то, что он держится на очень высоком уровне в широких пределах нагрузки. Суммарные потери в ртутных выпрямителях, помимо указанных выше потерь в цилиндрах, составляются еще из потерь в трансформаторе и потерь во вспомогательной аппаратуре. Общий коэфициент полезного действия подстанции с ртутными выпрямителями, в пределах от $^1/_4$ до $^1/_1$ нагрузки, при напряжении 600 V колеблется от 92% до 94%. Коэфициента мощности нужно ждать, в среднем, порядка 0,95. При напряжениях порядка 3000 V к.п.д. поднимается до 96,5.

Очень интересны опыты дороги Torino Cères по сравнению мотор-генераторов и ртутных выпрямителей, находившихся приблизительно в одинаковых условиях работы. Оказалось, что средне-суточный к. п. д. выпрямительной установки определился в 94%, тогда как для мотор-генераторов он получился равным всего лишь 79,5%. Отмеченные преимущества ртутных выпрямителей делают понятным их исключительно широкое применение в последнее время. Конкурировать с ними другим типам преобразователей очень трудно.

Следует отметить, что методы преобразования переменного тока в постоянный и обратно нельзя считать окончательно исчерпанными. Больше надежды подают разрабатываемые в настоящее время типы ионных трубчатых преобразователей и различных газотронов. При высоких напряжениях эти типы, при надлежащем их усовершенствовании, могут оказаться весьма серьезными конкурентами существующих преобразователей.

Большие колебания нагрузок тяговых подстанций вынуждали иногда строителей прибегать к специальным буферным приспособлениям, чтобы снизить мощности рабочих агрегатов. Эти приспособления чаще всего выполнялись в виде аккумуляторных батарей. Имеются очень хорошие схемы, как например Pirani, которые автоматически с помощью вспомогательных машин заставляют аккумуляторы при ликах отдавать энергию в сеть, разгружая главные машины. При малых же нагрузках они подзаряжают батарею, причем главные машины в среднем работают все время при хорошем использовании.

Были попытки, правда единичные, применять вместо аккумуляторных батарей в качестве буферов маховые массы. Примером может служить установка дороги Modano-Bussoleno, предназначаемая для преобразования частоты. Она скомбинирована из асинхронного мотор-генератора, в каскад с асинхронным двигателем которого включен трехфазный коллекторный двигатель. С данными машинами посредством полуэластичной муфты, сцеплен сорокатонный маховик. Комбинация каскада и маховика дает возможность сильно сглаживать толчки нагрузки и одновременно иметь высокий $\cos\varphi$. В настоящее время специальные буферные приспособления почти совершенно не применяются. Они очень дороги, между тем как современные

НВ УДУНТ (ДІІТ)

электрические машины могут выдерживать без особо тяжелых последствии очень высокие перегрузки. Ввиду этого представляется полная возможность обходиться без буферных установок.

5. Схемы соединений тяговых подстанций.

Схемы современных тяговых подстанций отличаются значительной сложностью. Помимо главных цепей, они содержат целый ряд цепей вспомогательных. Особое внимание на тяговых подстанциях приходится обращать на всякого рода защитные приспособления. Прежде всего необходимою принадлежностью каждой современной подстанции является защита от перенапряжения. Она чаще всего осуществляется в зависимости от вида тока с помощью алюминиевых или тайритовых разрядников.

Очень тщательно должна быть поставлена защита от сверхтоков. Она должна иметь место как на стороне высокого напряжения, так и на стороне низкого. Со стороны высокого напряжения подстанция защищается масляными выключателями с максимальным выключением. Отходящие от подстанции фидера при переменном токе имеют защиту такого же типа. При постоянном же токе теперь применяют особые быстродействующие выключатели. Очень часто на тяговых подстанциях имеются испытательные приспособления. После выключения фидера, когда еще неизвестно, выключился ли он вследствие случайной перегрузки или действительно из-за короткого замыкания, его сначала включают через испытательное сопротивление. Последнее предохраняет машины от чрезмерных токов, если оказывается. что причиной выключения действительно было короткое замыкание. Очень часто на подстанциях применяются реле нулевого напряжения или реле обратного тока. Их приходится ставить как на стороне высокого напряжения, так и на стороне низкого.

Значительным распространением на современных тяговых подстанциях пользуется защита от внутренних неисправностей в машинах и трансформаторах. В большинстве случаев такая защита базируется на применении термических приборов. Нагревание обмоток или каких-либо других, опасных в отношении нагрева, частей регистрируется термопарами или специальными контактными термометрами. В случае превышения температурой допустимой нормы специальные реле под действием термических приборов выключают цепь находящихся в опасности машин и трансформаторов. Из других защит особенно большим распространением пользуется теперь система Бухгольца.

В некоторых случаях для защиты от внутренних повреждений применяются небалансные реле. Последние особенно удобны при многофазных системах. У таких реле нормально число обмоток соответствует числу фаз. При исправности системы, характеризуемой равенством токов в отдельных фазах, реле не оказывает действия на главную цепь. В случае же неисправности в одной из фаз реле вследствие неправильного перераспределения токов между отдельными фазами, начинает работать и выключает масляник или другой какой-либо выключатель. Такие реле можно применять для защиты ртутных выпрямителей.

Широко применяется в тяговых подстанциях с ртутными выпрямителями автоматическая сигнализация неисправностей в подаче воды для охлаждения и недостаточности вакуума.

В общей сумме расходов по подстанциям главную часть составляют расходы на обслуживающий персонал. Этим обстоятельством объясняется, почему в настоящее время начинают находить широкое применение автоматические подстанции. Принцип автоматизации заключается в том, что включение и выключение подстанций производится только тогда, когда в этом имеется действительная надобность. Как известно, нагрузка подстанций по большей части очень сильно колеблется. Очень многие подстанции длительно работают при весьма малой нагрузке. Благодаря этому средний коэфициент полезного действия получается низкий. Характерным признаком возникновения надобности во включении той или другой подстанции является падение напряжения в сети. В соответствии с этим принципы автоматизации таковы: пока напряжение у каждой данной подстанции не падает ниже определенной нормы, подстанция выключена; но, как только напряжение падает ниже допустимого предела, подстанция включается. В качестве первичного фактора включения обычно служит реле напряжения, приключаемое к рабочей сети. При падении напряжения ниже допустимого реле начинает воздействовать на специальный

НБ УДУНТ (ДІІТ)

механизм, который постепенно проделывает все операции по включению подстанции. Сначала врубается масляник, затем пускаются в ход агрегаты. Если нужно, они синхронизируются с сетью. После включения преобразовательных агрегатов включаются фидера.

Выключение подстанции производится в обратном порядке. Как только поезда, производящие падение напряжения, удалились от данной подстанции настолько, что напряжение ее возросло выше заранее установленной нормы, реле напряжения снова начинает действовать, заставляя механизм управления работать в обратном порядке. Сначала выключаются питательные фидера, затем агрегаты, и наконец отключаются масляники высокого напряжения. В некоторых случаях схема автоматизации усложняется постепенностью включения по мере надобности не только отдельных подстанций, но и отдельных агрегатов.

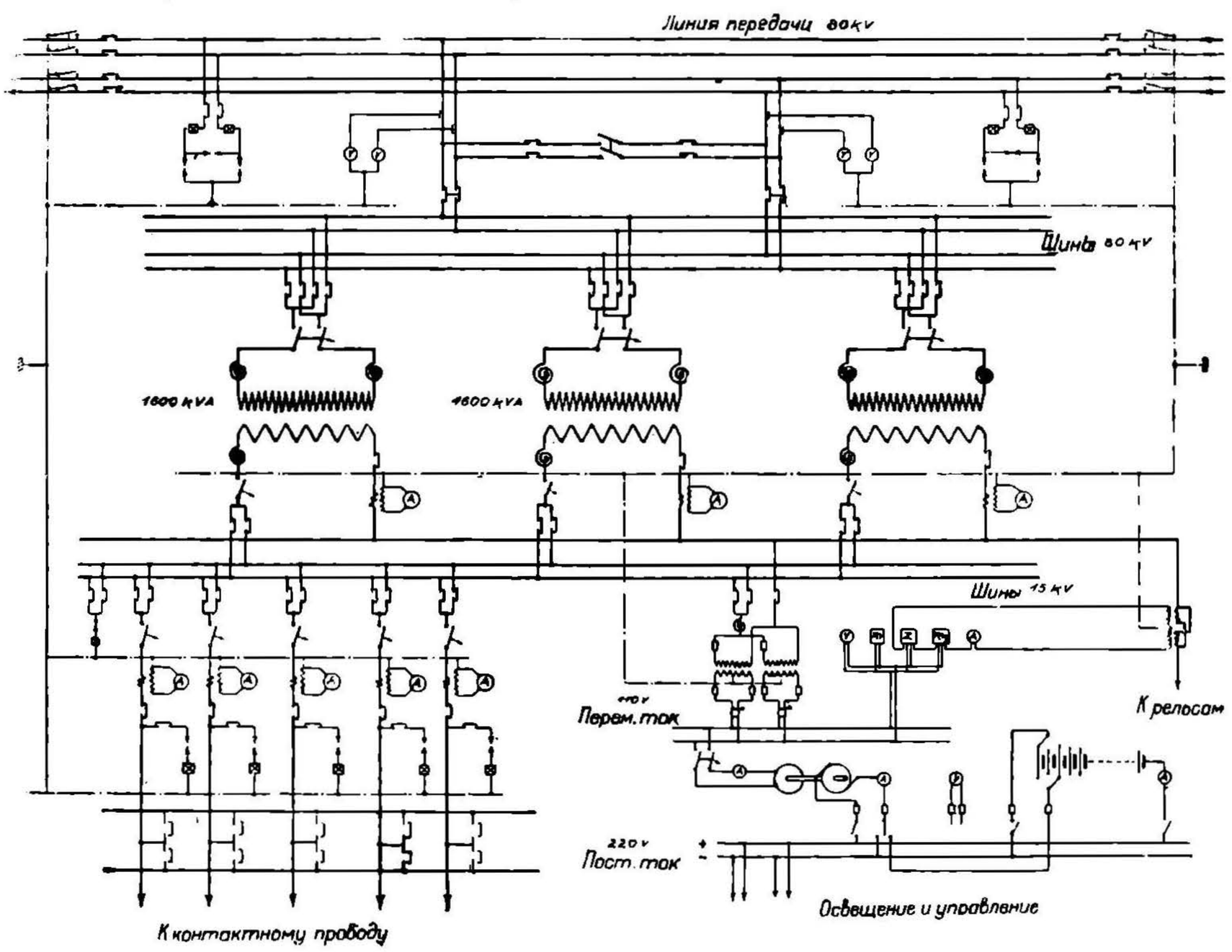


Рис. 699. Схема соединений тяговой трансформаторной подстанции германских ж. д.

Помимо автоматических подстанций, теперь начинает широко применяться также принцип дистанционного управления. В этом случае устраивается центральный диспетчерский пункт. У главного диспетчера имеется график движения поездов. Согласно последнему с помощью проводов управления он включает подстанции, в которых имеется надобность. После этого дальнейший процесс включения подстанционного оборудования автоматизируется примерно по той же схеме, что и в предыдущем случае. Иногда операции диспетчера заменяются электрическими часами.

В качестве образца схемы трансформаторной тяговой подстанции может служить приведенная на рис. 699. Данная подстанция принадлежит сети электрических железных дорог Германии в Силезии. Как видно из схемы, подстанция запроектирована с соблюдением всех необходимых требований. Обслуживание собственных нужд производится на постоянном токе, для чего имеется специальный мотор-генератор и аккумуляторная батарея.

На рис. 700 приведена схема с одноякорными преобразователями при трехпроводной системе питания. Пуск в ход преобразователей производится с помощью вспомогательного асинхронного двигателя *Aw*. Подстанция оборудована буферной батареей, работающей совместно с агрегатом Pirani, взятом в данном случае в виде двойного агрегата, каждая часть которого состоит из двух главных динамо и возбудителя. Приводятся в движение все машины асинхронным двигателем. Назначение агрегата Pirani — облегчать работу батареи. При больших нагрузках динамо

НВ УДУНТ (ДІІТ)

Pirani присоединяют свои э. д. с. к э. д. с. батареи. При малых же нагрузках они подзаряжают батарею, являясь вольтодобавочными машинами. Управление э. д. с. генераторов Pirani производится с помощью возбудителя, имеющего диференциально включенные обмотки, из коих одна, шунтовая, работает от батареи, а другая питается главным током. При малых нагрузках превалирует обмотка шунтовая. Э. д. с. генераторов действует совместно с главною сетью. Батарея подзаряжается. При больших нагрузках преобладает обмотка главного тока. Э. д. с. меняет свой знак и, действуя совместно с батареей, усиливает эффект последней. Каждая половина

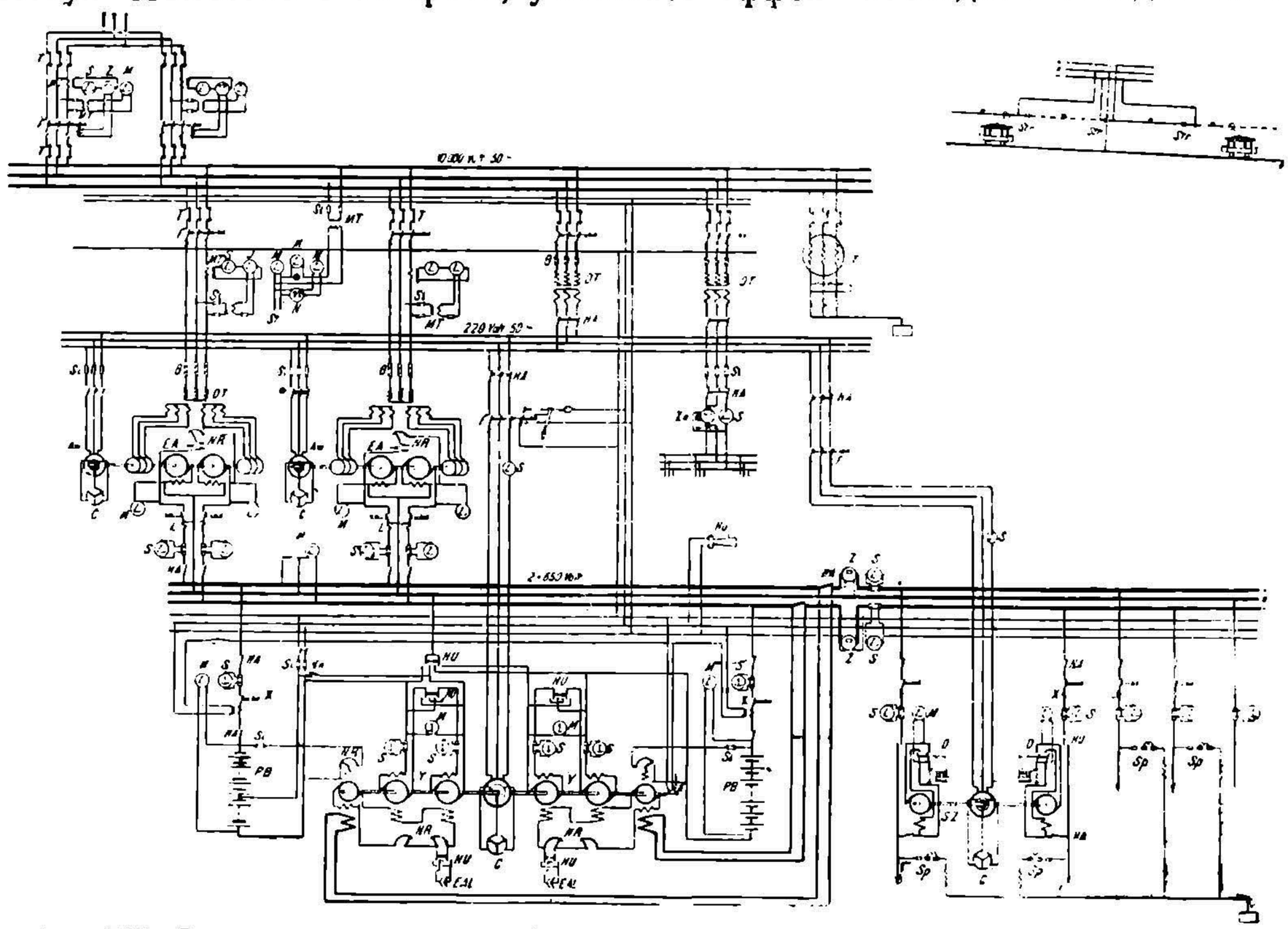


Рис. 700. Схема соединений тяговой подстанции с одноякорными преобразователями.

Обозначения.

Aw — Пусковые двигатели преобразователей.
B — Дроссельные катушки.
C — Пусковые реостаты.
D — Включатели динамо-бустерных агрегатов с управлением от реле напряжения.
DT — Главные трансформаторы.
EA — Одноякорные преобразователи.
EAl — Железно-алюминиевые элементы,
F — Масляные выключатели.
HA — Рычажные выключатели.
HU — Рычажные переключатели.
Hu — Сигнальные свистки.
J — Фазометры.
K — Центробежные выключатели для предотвращения разноса.
L — Автоматические выключатели максимального и обратного тока.
M — Вольтметры.
MT — Измерительные трансформаторы.
N — Частотомеры.
NR — Шунтовые реостаты.
PB — Буферная батарея.
S — Амперметры.
S_l — Предохранители.
S_p — Разрядники.
Str — Линейные участковые делители.
SZ — Бустерные агрегаты питательных фидеров.
T — Разъединители.
U — Разрядник перенапряжения.
X — Максимальные выключатели.
Z — Ваттметры.
Zn — Счетчики энергии.
Y — Агрегат Pirani.

агрегата Pirani может работать в данной схеме при последовательном и параллельном соединении. При буферной работе агрегат работает при параллельном соединении. Последовательное соединение обычно применяется, когда пользуются тем же агрегатом, как вольтодобавочным, для нормальной подзарядки батареи в периоды прекращения работы подстанции. По большей части к этому приходится прибегать, так как одной буферной подзарядки бывает недостаточно.

Из прочего оборудования рассматриваемой подстанции полезно обратить внимание на бустерный агрегат *SZ*. Оба бустера приводятся в движение асинхронным двигателем. Включаются они в фидера автоматически при подаче напряжения на зажимы приводящего их в движение двигателя.

Примером схемы тяговой подстанции с мотор-генераторами может явиться подстанция дороги Ch. M. St. P. R. (рис. 701). В качестве преобразователя здесь взят агрегат, состоящий из синхронного двигателя и двух динамо постоянного тока, включенных последовательно. Рабочее напряжение сети принято в 3000 V, в соот-

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ветствии с чем напряжение каждой динамо равно 1 500 V. Динамо — компаундного типа и снабжены, кроме основных обмоток возбуждения, обмотками дополнительных полюсов и компенсационной. Шунтовое возбуждение динамо получают от возбудителя *№ 1*, представляющего собой компаундную машину с дополнительными полюсами.

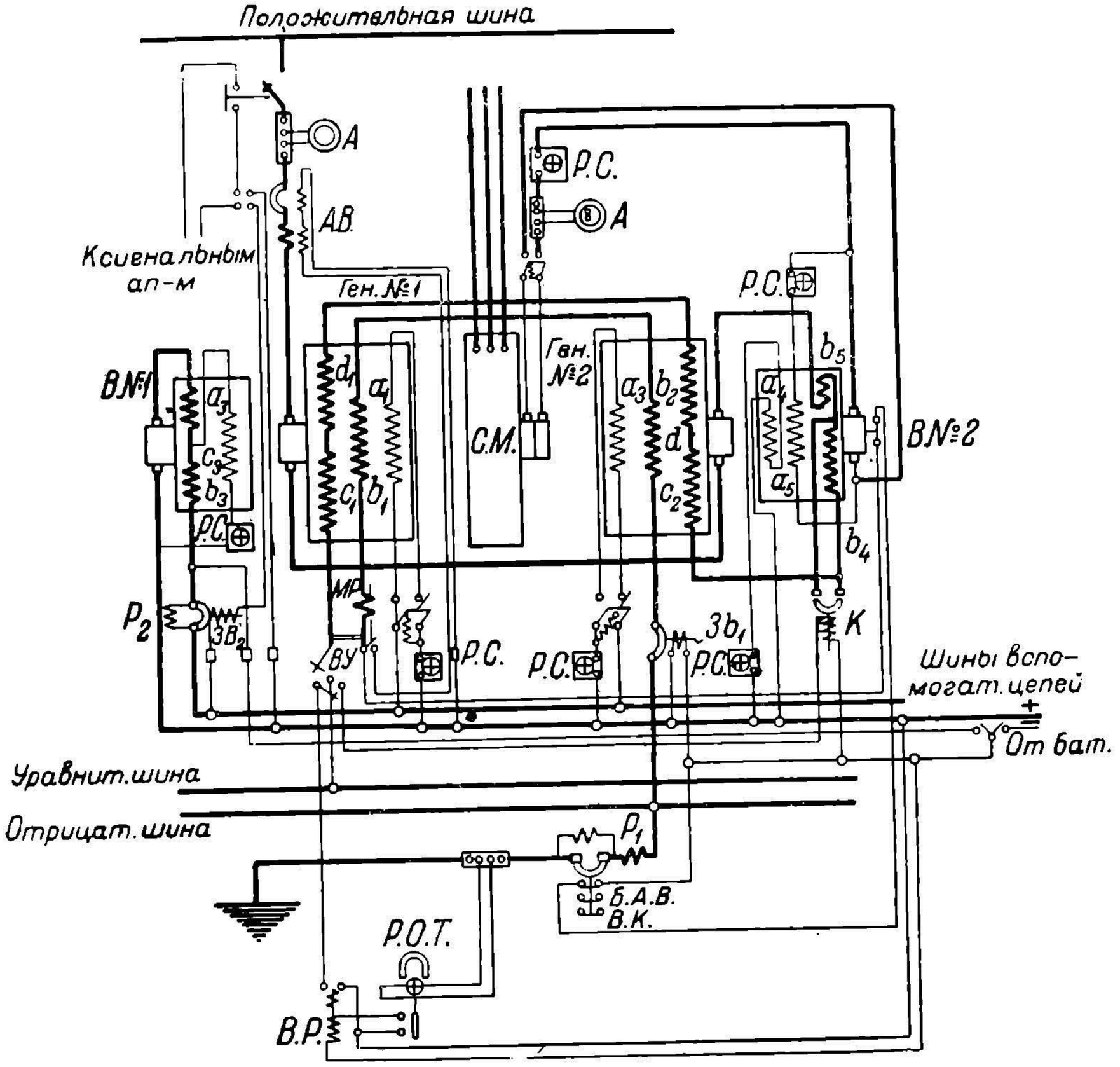


Рис. 701. Схема соединений мотор-генераторного агрегата подстанции дороги Ch. M. St. P. R.

Обозначения.

Ген. № 1—Главный генератор.
Ген. № 2—То же.
В № 1—Возбудитель главных генераторов.
В № 2—Возбудитель синхронного двигателя.
А—Амперметры.
АВ—Автоматический быстродействующий выключатель.
С. М.—Синхронный двигатель.
Б. А. В.—Быстродействующий выключатель.
В. К.—Блокировочные контакты.
В. Р.—Реле переключения при рекуперации.
Р. С.—Регулировочные сопротивления.
Р. О. Т.—Реле обратного тока.
М. Р.—Максимальное реле.
$ЭВ_2$—Контактор главной цепи.
$3b_1$—Контактор цепи возбудителя.
К—Реле для закорачивания обмотки b_4.
ВУ—Выключатель уравнительного провода.
P_1—Предохранительные сопротивления главной цепи.
P_2—То же цепи возбуждения.

Синхронный двигатель имеет свой собственный возбудитель *№ 2* с четырьмя обмотками. Основная шунтовая его обмотка a_4 питается от возбудителя *№ 1*. Дифференциально с ней включена вторая шунтовая обмотка a_5, приключенная к зажимам якоря самого возбудителя. Кроме шунтовых обмоток, возбудитель *№ 2* имеет еще две, последовательно включенные с главной цепью главных генераторов. Последние две обмотки включены дифференциально, причем b_4 действует в одну сторону с обмоткой a_4 и при рекуперации замыкается накоротко контактором *К*, действующим от реле обратного тока *Р. О. Т.* Комбинация данных четырех обмоток обеспечивает близкий к единице $\cos\varphi$ подстанции практически во всем диапазоне нагрузок.

Защита производится на положительном полюсе с помощью максимального автомата *АВ*, снабженного нулевым выключателем. На отрицательном поставлен

НВ УЛУНТ (ДІТ)

контактор $3b_1$, предназначенный для выключения главных генераторов при порче возбудителя *№ 1*. На заземленном полюсе имеется быстродействующий автомат *Б.А.В.*, при выключении вводящий сопротивление P_1, ограничивающее ток в цепи. Если чрезмерный ток быстро не упадет, а автоматы *Б.А.В.* не включатся, контактное приспособление *В.К.* выключит все автоматы *АВ*. В случае запоздания работы автомата *Б.А.В.* выключение автоматов *АВ* будет произведено максимальным реле *М.Р.* При чрезмерном возрастании оборотов агрегата цепь выключается с помощью тех же автоматов *АВ*. под действием центробежного регулятора, сидящего на валу

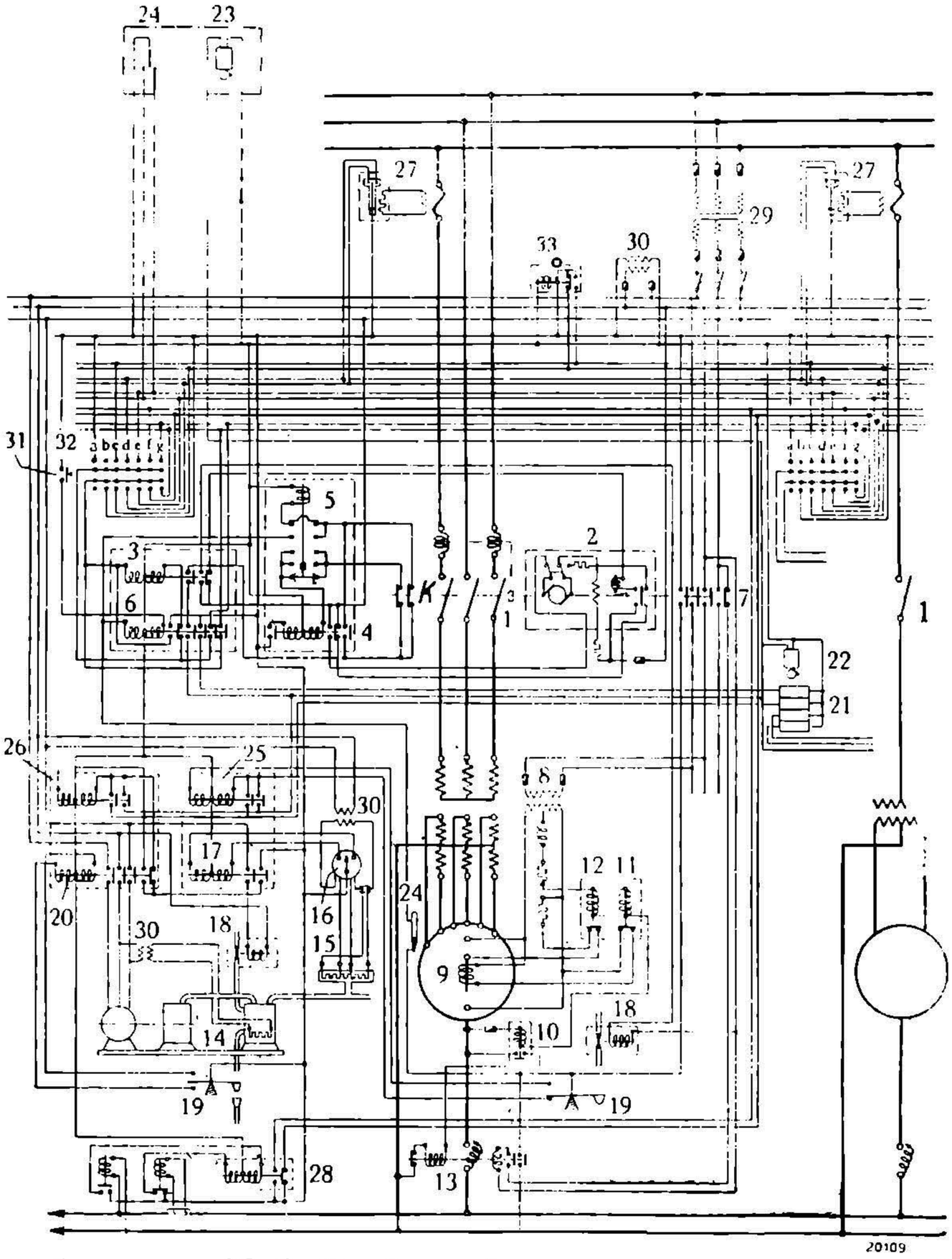


Рис. 702. Автоматическая подстанция со ртутными выпрямителями ВВС

Обозначения.

1—Масляный выключатель.
2—Привод масляника.
3—6—Механизм автоматизации.
7—Вспомогательный включатель, связанный с приводом масляника.
8—Трансформатор возбуждения.
9—Катушка зажигания.
10—Реле для включения преобразователя на шины.
11—12—Реле зажигания.
13—Включатель постоянного тока.
14—Насосный агрегат.
15—Электрический вакуумметр.
16—Прецизионный аппарат вакуумметра.
17—Аппарат автоматизации вакуума.
18—Водяной запорный клапан.
19—Показатель прекращения воды.
20—Аппарат включения насоса.
21—Оптический сигнальный аппарат.
22—Аккустическая сигнализация на подстанции.
23—Аккустическая сигнализация контрольном пункте.
24—Аппарат управления из контрольного пункта.
25 и 26—Аппараты включения.
27—Термическое реле.
28—Аппараты на стороне низкого напряжения.
29—Трансформатор для нужд подстанции.
30—Вспомогательный трансформатор
31—Кнопка для сжатого воздуха.
32—Контакты штепсельного прибора
33—Часовой механизм.

возбудителя *№ 2*. Чтобы избежать при выключении *АВ* опасных перенапряжений на коллекторе генераторов, выключение это сопровождается введением в цепь возбудителя *№ 1* с помощью контактора $ЭВ_2$ добавочного сопротивления P_2.

На рис. 702 приведена схема подстанции с ртутными выпрямителями и автоматическим управлением. Этой схеме присущи все основные элементы нормальной подстанции, и, кроме того, в нее введены элементы, специально предназначаемые для автоматизации. Главным элементом автоматизации обычно является механизм, производящий включение, причем это включение должно производиться при исправном состоянии подстанции. В соответствии с этим механизм включения строится на принципе повторных действий. Если при первом включении в цепи окажется короткое, главный масляник мгновенно вырубится. После этого он снова включится, чтобы выяснить, не случайного ли характера короткое. Так это повторяется несколько раз, например четыре, после чего цепь уже больше не включается, так как имеется основание полагать, что неисправность имеет не временный случайный характер, а характер серьезный органический.

В приведенной схеме включение производится следующим образом. Для его осуществления нужно тем или другим способом подвести напряжение от цепи упра-

НБ УГУНТ (ДІТ)

вления к реле *3*, вслед за чем ток пройдет как по обмотке *3*, так и по обмотке *5*. Последняя с помощью контактного стержня включит цепь реле *4*, которое в свою очередь замкнет якорь приводного двигателя *2*, предназначенного для включения масляника *1*. После включения масляника с помощью его вспомогательных контактов *K* аппараты *4* и *5* приходят в свое исходное положение.

Если под влиянием недопустимой величины тока, например тока короткого замыкания, максимальное реле выключит масляник, контакты *K* снова включат цепь *5*. Якорь реле *5* начнет затем непрерывно подниматься. После 15 секунд его действия включается снова катушка *4*, и вслед за этим врубается масляник *1*. Если последний снова выключится, то процесс повторится через 45 секунд, затем через 2 и 5 минут. После пятого раза дальнейших включений не производится. Якорек *5* достигает своего крайнего верхнего положения, в котором он приводит в действие реле *6* и одновременно прерывает ток в своей цепи, возвращаясь в свое исходное положение. Блокировочное реле *6* прерывает ток в реле *3* и одновременно дает световой и звуковой сигналы об аварии через приборы *21* и *22*.

При замыкании масляника *1* через трансформатор *8* катушка *9* производит зажигание ртутного выпрямителя. В первый момент ток от трансформатора *8* проходит через вспомогательный анод, катод, реле *10*, *11*, *12*, сопротивление возбуждения, дроссельную катушку к средней точке трансформатора. Реле *11* замыкает цепь катушки *9*, которая отрывает анод от катода и тем самым создает дугу. После этого реле *12* разрывает цепь зажигания, а реле *10* включает выключатель *13*, подавая этим напряжение на шины постоянного тока. Масляник *1* и выключатель *13* заблокированы таким образом, что они могут находиться только в одном и том же положении или включенными, или выключенными. Охлаждающая вода подается через вентиль *18*, как только оказывается включенным масляник *1*. Вакуумный насос *14* пускается через реле *17*. Последнее связано с аппаратом *16*, работающим от электрического вакуумметра *15*. Как только вакуум падает ниже нормы, реле *17* приводит в действие насос. Кроме того, реле *17* через второй вентиль *18* управляет и подачей охлаждающей воды для высоковакуумного ртутного насоса. В случае неисправности в подаче охлаждающей воды действуют аппараты *19*, *20*, *25*, *26*. Реле их так настроены, что при отсутствии нужной воды долъше 60 секунд подаются тревожные сигналы.

При этой схеме подстанция может включаться согласно различного рода заданиям, причем во всех случаях вопрос сводится к включению реле *3*. Установление метода работы подстанции производится с помощью штепсельного переключателя *32*. Если желательно включить подстанцию на длительный режим, то включаются в аппарате *32* контакты *a*. Для поддержания подстанции в положении выключения служат контакты *b*. Контакты *c* дают возможность включать подстанцию с помощью часов в определенное время. На положении *d* включение определяется термическим реле. Отдельные агрегаты включаются в зависимости от нагрева уже находящихся в работе. При пользовании контактами *e* подстанция может работать по принципу дистанционного управления. Положение *f* на практике применяется особенно часто. Оно дает возможность включать подстанцию от реле напряжения. При падении напряжения ниже определенной нормы подстанция включается. Выключается же она в этом же положении через реле тока. При падении нагрузочного тока ниже определенной нормы подстанция выключается, так как это свидетельствует о прекращении надобности в ее работе. Наконец, последнее положение *g* обеспечивает самостоятельное вступление в работу данного агрегата в случае аварии работающих.

Следует также иметь в виду, что одновременное включение контактов аппарата *32* дает возможность обеспечить при включении подстанции или отдельных ее агрегатов исполнение функций, присущих каждому контакту в отдельности. Так, например, при включении контактов *e* и *f*, обеспечивается возможность автоматической работы как по принципу дистанционного управления, так и по принципу реле напряжения.

В отношении зданий нужно различать закрытые и открытые подстанции. Первый тип наиболее распространен. Однако, в последнее время большое применение находят и подстанции открытого типа. Они особенно рациональны для трансформаторной части. Начиная, примерно с 30 kV, открытые трансформаторные подстанции становятся выгодней закрытых. Очень распространены подстанции смешанного типа. При них высоковольтная часть выполняется по типу открытых сооружений. Все же части, начиная с машинных или ртутных агрегатов, помещаются в крытом здании.

НТБ УДУНТ (ДІІТ)

Значительное распространение начинают получать теперь передвижные подстанции. Они монтируются на вагонных платформах и передвигаются по рельсовым путям в те пункты сети, где имеется в них надобность. Передвижные подстанции особенно рационально разрешают вопрос при сезонных перегрузках сети. Можно также весьма удобно пользоваться ими в качестве резервных. Особенно проста конструкция передвижных подстанций трансформаторного типа. Очень компактными получаются также и подстанции со ртутными выпрямителями, применяемые достаточно широко на итальянских железных дорогах (рис. 703).

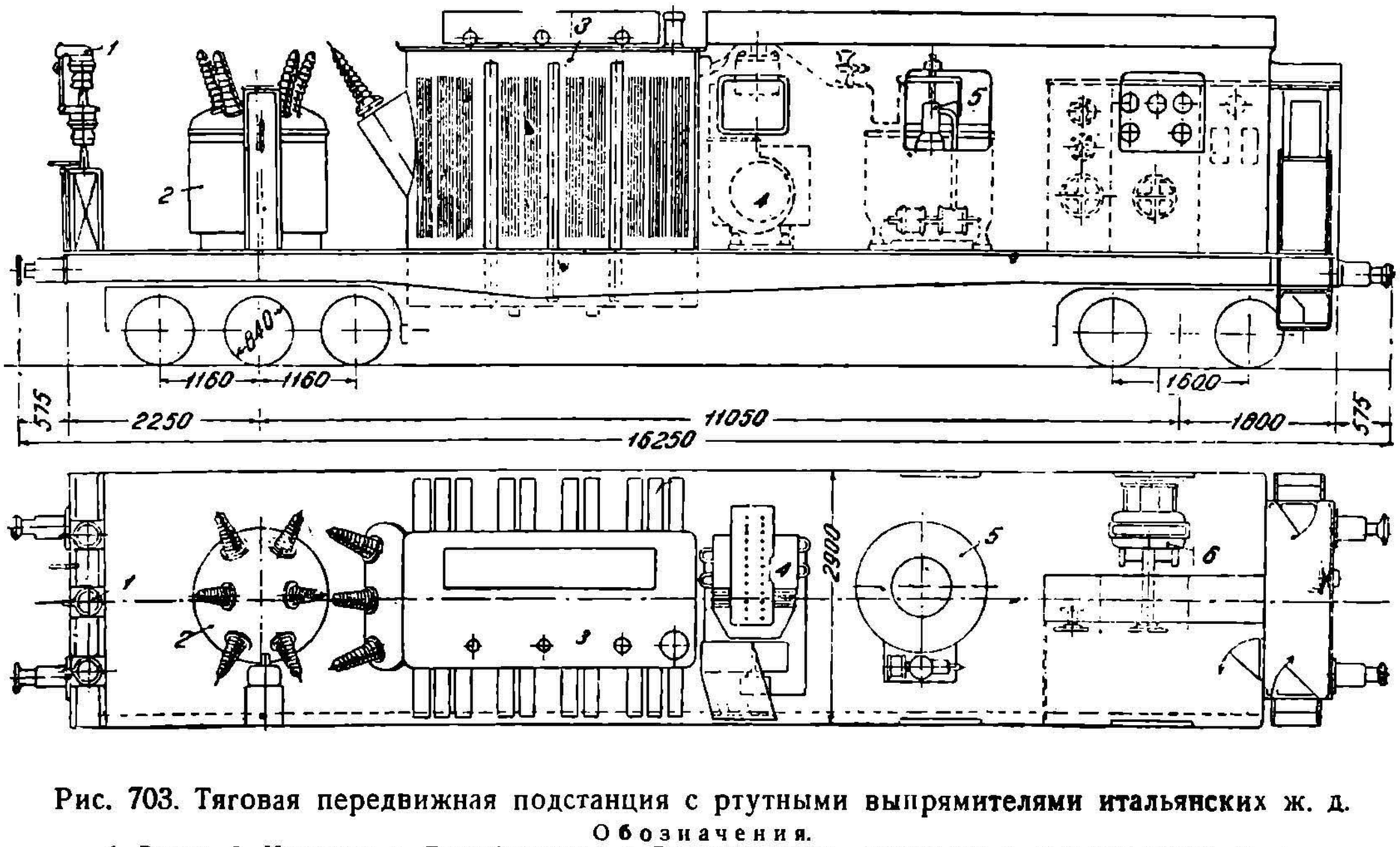


Рис. 703. Тяговая передвижная подстанция с ртутными выпрямителями итальянских ж. д.
Обозначения.
1—Вывод. *2*—Маслянник. *3*—Трансформатор, *4*—Вспомогательные механизмы. *5*—Ртутный выпрямитель, *6*—Распределительное устройство.

6. Общие методы расчета мощностей подстанций.

Работа тяговых подстанций в большинстве случаев протекает в очень тяжелых условиях. Одним из самых основных осложнений является обычное для большинства подстанций резкое колебание нагрузки. Представление о реальной нагрузке тяговой подстанции может дать рис. 704, относящийся к итальянской железной дороге Torino — Cères.

Режим работы подстанций определяется характером движения поездов. Чем больше поездов питается от данной подстанции, тем равномерней ее нагрузка. При очень малом их количестве пики могут достигать больших значений, превосходя в несколько раз средние нагрузки. Кроме этого, при учете работы подстанций приходится считаться также и с тем, что нагрузка их может сильно колебаться по периодам рабочего дня и по периодам сезонов года. Естественно, для расчета мощностей подстанций нужно выбирать периоды их наибольшей нагрузки. Практически нужно считать, что период двух-трехчасовой работы подстанции уже определяет ее мощность. Ввиду этого для расчета мощности можно рекомендовать выделение периода наибольшей нагрузки подстанции при условии, что длительность его не меньше двух–трех часов.

При выборе рабочей мощности подстанций нужно иметь в виду, что выбираемые для них машины и аппараты должны быть пригодны как с точки зрения их нагревания, так и с точки зрения тех бросковых нагрузок, которые они должны выдерживать. Выбор машин и аппаратов подстанции с точки зрения нагревания приходится производить на базе переменного режима работы, напоминающего режим работы тяговых электродвигателей. Ввиду этого и здесь вопросы нагревания можно решать двумя методами. Можно исходить или из непосредственного определения нагрева, или же из средне-квадратичного тока. Первый метод является принципиально более точным и может применяться в тех же формах, как и для тяговых электродвигателей. Основные формулы нагрева, а также и формулы для

НБ УГУНТ (ДІТ)

определения нагрева в конце регулярно повторяющихся режимов, остаются теми же самыми, что и для тяговых двигателей. Значительным облегчением здесь может служить то, что для подстанционных агрегатов, работающих при постоянном числе оборотов, а также и для трансформаторов можно считать в первом приближении тепловые коэфициенты B и T независящими от нагрузки. При таком условии, для установления их величины достаточно иметь данные о мощностях или о токах только для двух каких-либо режимов. Таким образом, помимо длительной мощности, которою нормально характеризуются машины подстанций, нужно знать еще мощность часовую или получасовую, или, вообще, какого-либо другого режима, отличного от длительного. Определять коэфициенты B и T можно согласно приведенным выше формулам. Допустимые для машин подстанций температуры следует принимать, если на это не имеется особых указаний, согласно общим нормам для стационарных машин. При окончательном выборе мощности машин необходимо предвидеть некоторый запас для тех случаев, если на ближайшее время предвидится увеличение нагрузки.

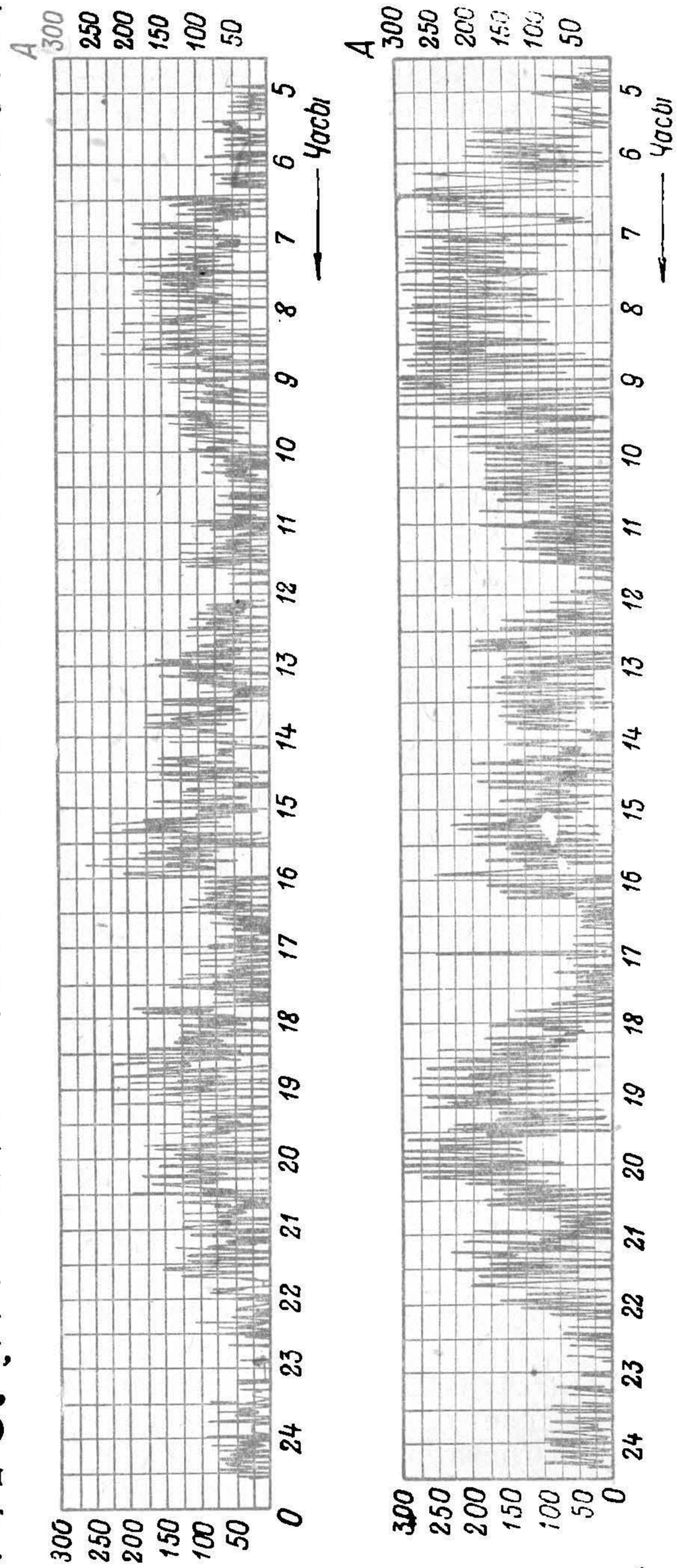


Рис. 704. Диаграмма нагрузки тяговой подстанции дороги Torino-Cères.

Применение метода непосредственного определения нагрева машин очень часто затруднено отсутствием данных для установления тепловых коэфициентов B и T. В этом отношении метод средне-квадратичного тока имеет преимущество. Для применения его достаточно знать только длительный режим. Ход расчета по этому методу таков же, как и в применении к тяговым двигателям. Сначала определяется кривая нагрузок подстанции $I = f(t)$, которая затем перестраивается в кривую $I^2 = f(t)$. После этого, путем измерения площади последней кривой, устанавливается I_{eff} (370). Машины пригодны, если удовлетворено соотношение:

$$I_\infty \geqslant I_{eff}, \qquad (667)$$

где I_∞ — ток длительной мощности всех тех агрегатов, которые работают в рассматриваемый период нагрузки.

Для применения разобранных методов определения нагрева машин необходимо предварительно определить нагрузку подстанций в функции от времени. Наиболее точно можно это сделать по методу графика движения. При рассмотрении вопроса о падении напряжения в рабочей сети было уже указано, как определяются токи, приходящиеся на питательные пункты и подстанции. Строя эти токи для каждого момента сечения графика в зависимости от времени, можно получить искомую кривую тока подстанции. Примером может служить кривая рис. 705.

При установлении мощности подстанций по большей части необязательно строить кривые их нагрузок для полных суток. Это может в некоторых случаях даже повести к неправильным заключениям, если применяется метод средне-квадратичного

НБ УГУНТ (ДІІТ)

тока. Очень часто средне суточная нагрузка может получаться небольшой, между, тем как за период двух- трехчасовой работы нагрузки могут достигать больших значений. Ввиду этого при определении расчетного средне-нагревательного тока и было сделано указание, что при установлении его более осторожно исходить из двух-трехчасового периода наиболее тяжелой нагрузки за сутки.

Что касается метода непосредственного определения температур, то здесь принципиально наиболее правильно брать период от момента начала работы подстанции до конца последнего суточного максимума. При непрерывной работе подстан-

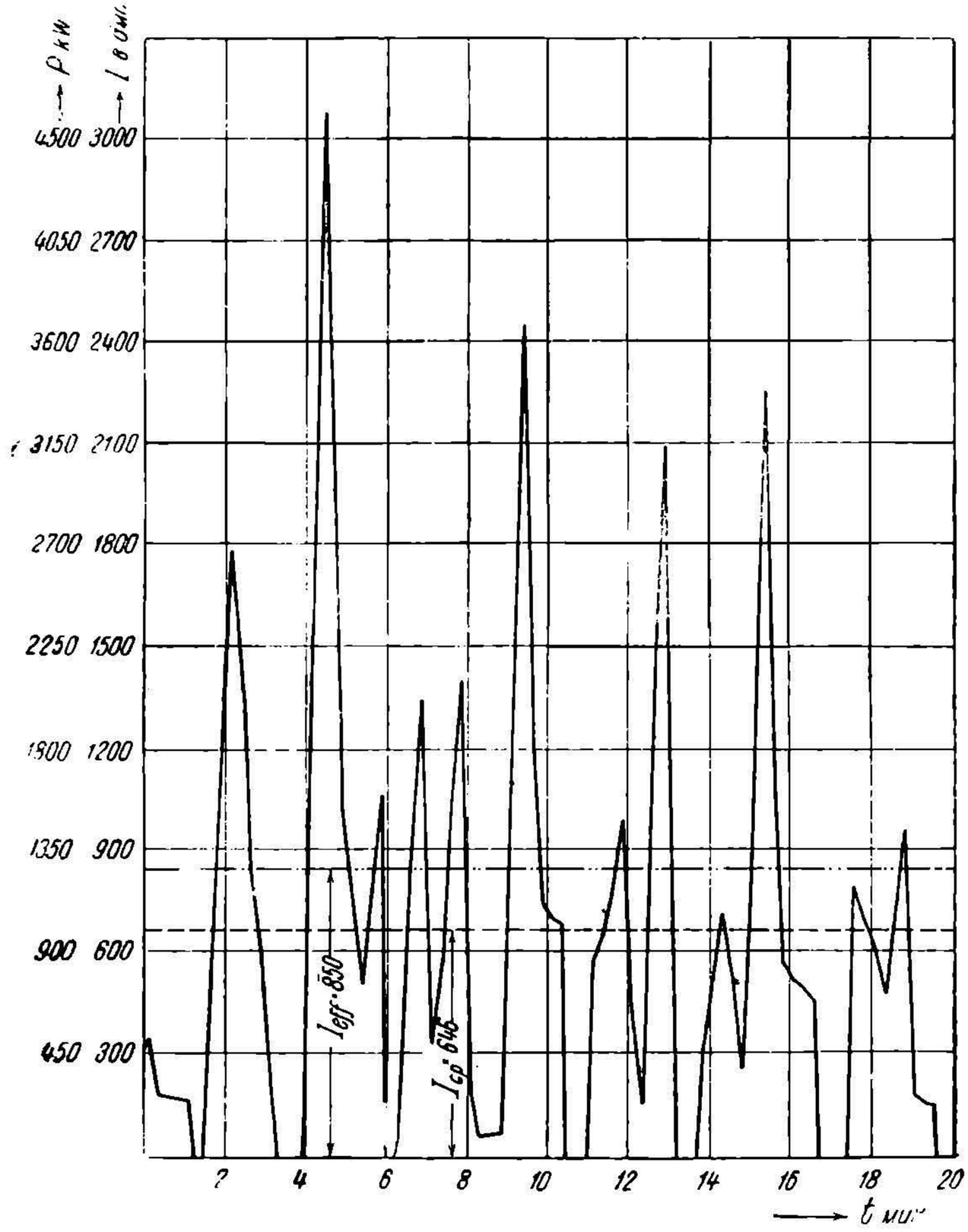


Рис. 705. Расчетная диаграмма нагрузок тяговой подстанции.

ции приходится рассматривать или полный период суток, или определять начальное превышение температуры к моменту начала опасного максимума по средне-суточному нагревательному току. Последний метод, по существу, аналогичен применному при предварительном установлении мощности тяговых двигателей.

Прежде чем окончательно остановиться на длительной мощности подстанции, необходимо проверить ее с точки зрения пиковых нагрузок. В отношении допустимых нагрузок и длительности их для подстанционных агрегатов пока не имеется исчерпывающих норм. Нужно пользоваться нормами ОСТ, но они далеко не полные. Если агрегаты подстанции, выбранные на основании их нагрева, окажутся непригодными с точки зрения пиковых нагрузок, их приходится выбрать, исходя из последних. Тогда длительная мощность будет определяться величиной пиковой нагрузки и ее длительностью.

Необходимо сделать оговорки в отношении определения мощности подстанции при ртутных выпрямителях. Этот тип преобразователей в части ртутного цилиндра подчинен иному закону нагрева нежели трансформаторы и вращающиеся машины. Главная часть тепла, выделяемая в его цилиндрах, пропорциональна не квадрату

НБ УГУНТ (ДІТ)

тока, а току в первой степени. Однако, ввиду того, что до настоящего времени законы нагрева ртутных цилиндров окончательно не изучены, и так как, кроме того, трансформаторная часть ртутных агрегатов зависит в отношении нагрева главным образом, от джоулевых потерь, то более осторожно и для ртутных выпрямителей в целом исходить из метода средне-квадратичного тока.

Очень сложно определение мощности при предварительных расчетах, когда еще не имеется графика движения поездов. Общая формула для предварительного определения мощности подстанции может быть представлена в виде:

$$P_{\infty} = k_{зап}\, k_{eff} (\Delta i_{\text{I}}\, l_{\text{I}} + \Delta i_{\text{II}}\, l_{\text{II}})\, U_n \cos\varphi\, 10^{-3} \text{ kW}. \qquad (668)$$

В данной формуле Δi_{I} и Δi_{II} означают линейные нагрузки сети по обеим сторонам подстанции, l_{I} и l_{II} — плечи действия этих нагрузок, k_{eff} — коэфициент перехода от среднего значения нагрузочных токов к средне-квадратичному, $k_{зап}$ — коэфициент на неточность расчета и $\cos\varphi$ — средний коэфициент мощности сети.

Наибольшие трудности при пользовании формулой (668) возникают в отношении установления коэфициента k_{eff}. Последний зависит от ряда факторов. На него в первую очередь оказывает влияние изменение тока, потребляемого каждым поездом в отдельности. Изменение это определяется, с одной стороны, способом ведения поезда, а с другой, — профилем пути. Кроме того, на эффективность нагрузки оказывает влияние расположение поездов и перемещение этих поездов в пространстве. Если взять для примера один поезд между двумя подстанциями и предположить, что он работает при постоянной величине тока, то даже при таком условии коэфициент k_{eff} должен получиться около 1,15. В общем же случае, когда ток, потребляемый поездами меняется, k_{eff} может достигать больших значений, доходя в исключительных случаях до 1,5—1,8 и даже выше. С увеличением числа поездов он должен снижаться, приближаясь при очень большом их количестве к единице Средние цифры для k_{eff} чаще всего колеблются в пределах 1,15—1,3.

Нужно указать, что формула (668) пригодна не только при двух участках питания от подстанции. Если участков больше двух, нужно только ввести в формулу соответствующее число новых произведений Δil. Полезно отметить, что при двухстороннем питании длина плеч действия подстанций должна мыслиться равной половине расстояний между смежными питательными пунктами.

Интересная попытка установления коэфициента эффективности произведена проф. Костромитиным и инженером Зильберталем, применившими для этого метод теории вероятности (Л. 333 и 334). В основу этого метода положено допущение, что движение поездов произвольно и не подчинено какому-либо определенному графику. Поезда могут в отношении потребляемого ими тока иметь какое угодно взаимное положение, начиная от совпадения максимумов токов всех поездов до совпадения их нулевых значений.

В дальнейшем нужно иметь в виду следующие обозначения:

I_{eff} — средне-квадратичный ток подстанции,

$I_э$ — средне-квадратичный ток поезда,

I — его средний ток,

N_n — число поездов, приходящихся на данную подстанцию.

При данных обозначениях, на основании формул теории вероятности, для одностороннего питания легко выводится такое соотношение:

$$I_{eff} = N_n I \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{N_n}}$$

Здесь σ попрежнему означает относительное средне-квадратичное отклонение

$$\sigma = \frac{1}{I} \sqrt{I^2_э - I^2}.$$

Отсюда коэфициент эффективности:

$$k_{eff} = \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{N_n}} \qquad (669)$$

Для двухстороннего питания проф. Розенфельд предлагает формулу:

$$k_{eff} = \sqrt{1 + \frac{1 + 4\sigma^2}{6N_n}} \qquad (670)$$

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Вообще при расчете k_{eff} по методу теории вероятности более или менее надежные результаты можно получить при достаточно большом количестве поездов и, главным образом, для трамвайного движения. Для магистральных железных дорог, когда поезда в основном работают по определенному графику, и когда нормально между подстанциями получается относительно небольшое число поездов, метод теории вероятности может дать значительную неточность.

Несколько лучший результат в общем случае можно получить, если определять k_{eff} по предлагаемой формуле:

$$k_{eff} = \sqrt{\left[1+\frac{(I_1' - I_2' + I_1'' - I_2'')^2}{12\ (\Delta i_{\text{I}}\ l_{\text{I}} + \Delta i_{\text{II}}\ l_{\text{II}})^2}\right]\left[1+\frac{\left(\frac{T_к}{T_a}\right)_{cp}-1}{N_n}\right]} \qquad (670)$$

Формула эта выведена на базе определения средне-квадратичных токов подстанции по токам питательных пунктов согласно формулам типа (560). Это определение дало в формуле члены, стоящие в первых квадратных скобках. Эти члены учитывают влияние на эффективность изменения положения поездов благодаря их движению. Члены же, стоящие во вторых квадратных скобках, имеют назначением на базе анализа вероятных случаев учесть влияние на эффективность отношения время нахождения поездов на перегоне $T_к$ ко времени нахождения их под током T_a. Нужно иметь в виду, что при $\frac{T_к}{T_a}$, различном для отдельных поездов питающихся от рассматриваемой подстанции, это отношение нужно определять как средне-арифметическое по определенным поездам.

Формула (670) дает решение вопроса в общем виде. В ней через I_1' и I_2' обозначены токи прямых и обратных поездов для первого участка примыкания к подстанции. Токи же I_1'' и I_2'' дают то же самое для второго участка. Если к подстанции примыкает больше двух участков питания, формула (670) остается в силе. В нее следует только ввести токи добавочных участков. При одностороннем движении поездов на том или другом из примыкающих участков в формуле надлежит приравнять нулю токи ликвидируемых поездов. Формула (670) пригодна и для случая рекуперации. По общему правилу токи рекуперации должны вводиться в нее с обратными знаками по сравнению с имеющимся в формуле.

Нужно указать, что формула (670) выведена для случая двухстороннего питания. В случае, если среди участков примыкания к подстанции имеются участки с односторонним питанием, то все токи и Δi этих участков, фигурирующие в первой квадратной скобке, должны быть изъяты. При всех участках с односторонним питанием должны остаться только под радикалом члены, стоящие во вторых квадратных скобках.

Очень трудно при предварительном расчете определить пиковую мощность подстанции. Наиболее часто ее определяют по общему анализу движения. Инженер Зильберталь, пользуясь теорией вероятности и кривой Гаусса, определяет коэфициент вероятной перегрузки k_{max} по сравнению со средней нагрузкой на основании формулы:

$$k_{max} = 1 + \frac{(2{,}31 - \lg p)\,\sigma}{\sqrt{N_n - 1}}\ . \qquad (671)$$

Здесь p — процент времени, в течение которого допускается выпадение из работы подстанции, благодаря максимальному выключателю. Если принять, например, этот промежуток в 1%, то $p = 1$. Если принять его в 0,1%, то p должно быть равно 0,1. Естественно, что данная формула справедлива только для $N_n > 2$ (Л. 334).

Энергия для современных электрических железных дорог в большинстве случаев вырабатывается на мощных районных станциях и идет по линиям передачи общегосударственного значения. Однако, имеется большое количество железных дорог, которые имеют свои собственные электрические станции и свои собственные линии передачи. К таким установкам приходится, главным образом, прибегать при переменных токах с частотою, отличной от промышленных. Примером могут служить немецкие, швейцарские, итальянские железные дороги и ряд дорог других стран.

Линии передачи для электрических железных дорог по большей части устраиваются на собственных опорах, и только в особых случаях они прокладываются на тех же опорах, что и контактный провод. За последнее время в Германии много

НВ УДУНТ (ДІІТ)

уделяли внимания теории передачи однофазного низкочастотного тока по проводам трехфазных промышленных передач.

Питание тяговых подстанций от линии передач производится различным способом. Наименее надежный способ — это питание консольного типа от одиночной линии передачи. В случае аварии на линии передачи подстанции, лежащие за пунктом аварии, остаются без питания. В случае двухстороннего или кольцевого питания, особенно при наличии нескольких самостоятельных центральных станций, работающих на общую линию передачи, надежность питания значительно повышается. Путем выключения аварийного участка тяговые подстанции обеспечиваются подачей энергии, с переходом на консольное питание.

В случае двойных линий передач надежность питания сильно возрастает. При нормальном состоянии линий передач обычно обе цепи работают параллельно. В случае аварии с помощью переключательных постов выключается аварийный участок, и на протяжении его, пока не устранена авария, работает только одна цепь.

Мощности электрических станций, а также и линий передачи, обслуживающих тяговые подстанции определяются по суммарной нагрузке отдельных подстанций. Составляя график движения поездов при районных станциях и передачах, желательно избегать совпадения периодов наибольшего потребления дорогой энергии с максимумами промышленно-осветительных нагрузок. В случае же работы дороги от собственных электрических станций предпочтительно иметь как можно более равномерный график, что дает возможность снизить устанавливаемую на станциях мощность машин, а также и сечения проводов линий передачи.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ПРИЛОЖЕНИЕ.

СОКРАЩЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ИМЕН.

Журналы и справочники.

— Электричество. — Ленинград — Москва.
Т. Э. В. — Технико-Экономический Вестник. — Ленинград — Москва.
Б. Д. — Бюллетень завода Динамо. — Москва.
Э. Т. — Электрическая тяга — Москва.
Э. Ж. Д. — Электрификация железнодорожного транспорта. — Москва.
El. B. — Elektrische Bahnen. — Berlin.
E. R. J. — Electric Railway Journal. — N.-Y.
L. T. E. — La Traction électrique. — Paris.
E. T. Z. — Elektrotechnische Zeitschrift. — Berlin.
E. u. M. — Elektrotechnik und Maschinenbau. — Wien.
G. E R. — General Electric Review. — N.-Y.
El. — Electrician. — London.
J. I. E. E. — The Journal of The Institution of Electrical Engineers. — London.
J. A. I. E. E. — The Journal of The American Institut of Electrical Engineers. — N.-Y.
E. K. B. u. B. — Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen. — München.
Z. V. D. I. — Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure. — Berlin.
S. B. Z. — Schweizerische Bauzeitung. — Zürich.
R. G. Ch. F. — Revue Générale des Chemins de fer et des Tramways. — Paris.
R. E. E. — Railway Electrical Engineer. — N.-Y.
R. G. E. — Revue Générale de l'Electricité. — Paris.
G. C. — La Génie Civile. — Paris.
T. M. — La Technique Moderne. — Paris.
R. T. F. I. — Rivista Tecnica delle Ferrovie Italiane. Roma.
V. T. — Verkehrstechnik. — Berlin.
С. Э. Т. — Справочная книга для электротехников. — Ленинград.
Т. П. Б. — Труды постоянного Бюро Всесоюзных Трамвайных Съездов. — Ленинград.
К. Т. П. Б. — Бюллетень киевского отделения ВТАБ. — Киев.
R. El. — La Revue électrique. — Paris.
L'El. — Électricien. — Paris.
W. V. S. — Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens - Konzern. — Berlin.
B. B. C. M. — Brown-Boveri Mitteilungen. — Baden.
A. E. G. M. — AEG Mitteilungen. — Berlin.
S. Z. — Siemens - Zeitschrift. — Berlin.
B. d. S. I. d. E. — Bulletin de la Société International des Électriciens. — Paris.
P. A. I. E. E. — Proceedings of The American Institute Electrical of Engineers. — N.-Y.
B. S. F. E. — Bull. de la Soc. Franc. des Eléctr. — Paris

Железные дороги.

V. R. R. — Virginia R. R.
N. C. R. R. — New - Jork Central Railroad
N. H. H. R. — New-Jork & New-Haven & Hartford R. R.
P. R. R. — Pennsylvania R. R.
N. W. R. R. — Norfolk-Western R. R.
B. A. P. R. — Bütte & Anaconda & Pacific R.
D. T. I. R. — Detroit & Toledo & Ironton R.
Ch. M. St. P. R. — Chikago & Milwaukee & St. Paul R.
B. O. R. — Baltimore & Ohio R.
S. B. B. — Schweizerische Bundesbahn.
D. R. G. — Deutsche Reichsbahn-Gesellschaft.
F. F. S. S. — Ferrovie dello Stato.
Ö. B. B. — Österreichische Bundesbahnen.
R. B. — Rhätische Bahn.
B. L. S. B. — Berner Alpenbahngesellschaft Bern-Lötschberg-Simplon.
Ch. d. f. d. M. — Chemins de fer du Midi.
Paris-Orléans. Compagnie du Chemin de fer de Paris à Orléans.
P. L. M. — Chemins de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Заводы и фирмы.

AEG — Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft. — Berlin.
BBC — A. G. Brown, Boveri & Cie. — Baden und Mannheim.
SSW — Siemens-Schuckertwerke A. G. — Berlin.
GEC — General Electric Co. — Schenectady.
MV — Metropolitan Vickers Electric.
TH — Thomson Houston Electric
SH — Siemens & Halske. — Berlin.
CEF — Construction Électrique de France. — Paris.
DKr — Dick Kerr & Co.
BEW — Bergmann-Elektricitäts-Werke. A. G. — Berlin.
MFO — Oerlikon — Maschinenfabrik Oerlikon. — Zürich.
West. — Вестингауз. — Westinghouse Electric & Mfg. Co. — Pittsburg.
ASEA — Allmänna Svenka E. A. — Stockholm.

ЛИТЕРАТУРА.

Литература по общим вопросам электрической тяги.

1. Вульф. Электрическая тяга. Ленинград, 1926.
2. Лебедев. Конспект лекций по электрической тяге. Ленинград, 1932.
3. Довер. Электрическая тяга. Москва, 1928.
4. Зеефельнер. Электрическая тяга. Москва, 1926.
5. Медель. Магистральные дороги постоянного тока. Москва, 1931.
6. Бернацкий. Электрические железные дороги. Москва, 1926.
7. Потебня. Электричне тягло на колії. Харків, 1930.
8. Даландер. Электрическая тяга в Швеции. Ленинград, 1912.
9. Dawson. Electric Railways and Tramways. N.-Y., 1908.
10. Carter. Railway Electric Traction. London, 1922.
11. Wilson and Lidall. Electric Traction. London, 1907.
12. Scheldon and Hausmann. Electric Traction and Transmission Engineering. N.-Y., 1911.
13. Dickinson. Electric Trains. London, 1927.
14. Harding. Electric Railway Engineering. N-Y., 1916.
15. Martin. Traction électrique. Paris, 1924.
16. Bachellery. Chemins de fer électrique. Paris, 1925.
17. Wechmann. Der elektrische Zugbetrieb der Deutschen Reichsbahn. Berlin, 1924.
18. Verole. La grande Trazione Electrica. Milano, 1926.
19. Buchhold und Trawnik. Die Elektrischen Ausrüstungen der Gleichstrombahnen. Berlin, 1931.
20. Hobart. Electric Trains. N.-Y., 1910.
21. Трюмен. Электрификация жел. дорог. Москва, 1927.
22. Хилл. Электрификация жел. дорог. Москва — Ленинград, 1933.
23. Жапио и Ферранд. Электрическая тяга в С. Ш. А. Москва, 1933.
24. Trautvetter. Elektrische Strassenbahnen und Strassenbahnähnliche Vorort-und Ueberlandbahnen. Berlin, 1913.
25. Сэт. Том III, Отделы 20 и 21. Ленинград, 1928.
26. Richey. Electric Railway Handbook. N.-Y., 1924.

Отдел 1. Введение к изучению электрической тяги.

27. Карпов. Электрическая тяга. Ленинград. Москва, 1928.
28. Герливанов и Иванов. Электрификация ж. д. Западной Европы. Москва, 1932.
29. Лебедев. Проблема электрификации ж. д. в Западной Европе и Америке. Т. Э. В., 1921, стр. 82.
30. Лебедев. Постоянный ток высокого напряжения в области электрической тяги. Э., 1915, стр. 152.
31. Вульф. Значение электрификации русских ж. д. для народного благосостояния. Т. Э. В., 1921, стр. 138.
32. Вульф и Шевалин. Предварительные соображения по выбору системы тяги и напряжения для русских ж. д. Экономика путей сообщения, 1921.
33. НКПС. Н. И. Ин-т по электрификации ж. д. Труды Комиссии по выбору системы тока для электрификации ж. д. СССР.
34. Comité d'études pour électrification en France. Comparaison entre les divers systèmes de traction électrique susceptibles d'être utilisés sur les grands reseaux francais. G. C., 1921, стр 351.
35. Die Direction der Schwedischen Stadtsbahnen. Die Elektrisierung der schwedischen Staatsbahnen. E. T. Z., 1920, стр. 893.
36. Raven. Über die Wirtschaftlichkeit elektrischer Hauptbahnen in England. E. T. Z., 1921, стр. 473.
37. Gelber. Elektrisierung von Nebenbahnen mit hochgespanntem Gleichtrom. E. T. Z., 1929, стр. 73.
38. Доклад Комитета транспорта Великобритании. Электрификация ж. д. магистралей Великобритании. Москва.
39. Armstrong. The Engineering Problem of Electrification. G. E. R., 1914, стр. 62.
40. Cox. The electrical Operation of The Butte, Anaconda & Pacific Railway. J. A. I. E. E., 1914, стр. 1729.
41. Tetrei Électrification des Chemins de fer de l'Etat Belge. R. E. L., 1920, стр. 409.
42. N—.—.— Électrification dé la ligne Swics. T. M., 1920, стр. 288.
43. N— .—.—. Électrification général des Chemins de fer de la Jougo-Slavie. — G. C., 1920, стр. 553.
44. Жмудский. Эффективность электрификации ж. д. в СССР. Э. Ж. Д., 1933, № 7, стр. 9.
45. Müller. Die dynamischen Grundlagen für den Betrieb und die Selbstkostenberechnung der electrischen Zugförderung. El. B., 1926, стр. 162.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

46. Генеральный план электрификации СССР. Том III. Москва.
47. Сборник. Десять лет ГОЭЛРО. Москва.
48. Госплан СССР. Материалы по генплану электрификации. Том III, 1932.
49. Постановления июньского пленума ЦК ВКП (б) от 1931, XVII конференции ВКП (б) и XVII съезда ВКП (б). Москва.

Отдел II. Тяговые электродвигатели.

50. Арнольд. Динамомашины постоянного тока. Ленинград.
51. Толвинский. Машины постоянного тока. Ленинград.
52. Толвинский. Синхронные машины. Ленинград.
53. Шенфер. Асинхронные машины. Москва.
54. Шенфер. Коллекторные двигатели переменного тока. Москва, 1931.
55. Arnold. Die arinchronen Wechselstrommaschinen. Том V 1. Berlin, 1909.
56. Arnold. Die Wechselstromkommutatormaschinen. Том V. 2. Berlin, 1912.
57. Müller und Mattersdorf. Die Bahnmotoren. Berlin, 1903.
58. Аватковы. Электрическая тяга на однофазном токе нормальной частоты. Москва, 1934.
59. Алексеев. Тяговые электродвигатели. Ленинград, 1933.
60. Перевозский. Тяговые электродвигатели. Москва, 1933.
61. Тереза. Тяговой двигатель ДПЭ—340. Москва, 1933.
62. Hobart. Electric Motors. Том I—II. London, 1923.
63. Olliver. The A.-C. Commutator Motor. London, 1927.
64. Dover. Electric Motors and Control Systems. London, 1918.
65. Gerstmeyer. Die Wechselstrom-Bahnmotoren. Berlin, 1919.
66. Шварц и Алексеев. Современные тяговые электродвигатели. Э., 1928, стр. 86.
67. Ferris. Factors affectins the Design of D.-C. Motors for Locomotives. J. A. I. E. E., 1925, стр. 481.
68. Pannel. Continuous-current Railway Motors. J. I. E. E., том 54, 1926, стр. 449.
69. Hellmund. Considerations in the Design of Ry Motors. E. J., том XII, 1925, стр. 294.
70. Closkey Since Fegturg in Motor. E. J., том X, 1913, стр. 1013.
71. Cooper. The Applic ition of the Ventilated Ry Motor. E. J., 1918, стр 395.
72. Luke. Heating of Railway Motors in Service and in Fest— Floor Runs J. A. I. E. E., 1922, стр. 165; E. R. J., 1922, стр. 280.
73. Carter. Rating and Service capacity of traction motors. J. I. E. E., 1927, стр. 371.
74. Tofflinger. Der Einfluss der Lüftung auf die Überlastbarkeit der Bahnmotoren. El. B., 1929, Ergänzungsheft, стр. 57.
75. Voigländer. Der Einfluss der Stundendrehzahl auf Räumungszeit bei Stadtschnellbahnen. El. B., 1928, стр 277.
76. Adler. Die Feldschwächung bei Bahnmotoren. Berlin, 1919.
77. Behtge. Betrachtung über die Überlegenheit der sich selbst lüftenden Motoren über die gekapselten. E. K. B. u. B., 1918, стр. 281; 1919, стр. 241.
78. Pichelmehr. Über die Wahl der Zweckmässigsten Periodenzahl für schwere Wechselstrom-Zugfö - derung. E. K. B. u. B., 1911, стр. 127.
79. Gerstmeher. Beiträge zur Kenntnis der Wechselstrom-Kommutatormotoren. E. K. B. u. B., 1911, стр. 287.
80. Werz Zwillingsmotor oder Einzelmotor für Vollbahnlokomotiven inbesondere Einphasenlokomotiven mit Einzelachsantrieb. E. T. Z., 1923, стр. 660.
81. Döry. Über die Grenzleistung des Einphasenmotors mit Zahnradbetrieb. E. u M., 1922, стр. 145.
82. Sachs. Der gegenwärtige Stand im Bau von Bahnmotoren. E. u. M., 1923, стр. 21.
83. Сидоров. Испытание тяговых электродвигателей постоянного тока методом возврата работы. Э., 1931, стр. 77.
84. Müller. Messverfahren zur Untersuchung der Nutenschwingungen. El. B., 1926, стр. 346.
85. Москвитин. Круговой огонь на коллекторе и причины его возникновения. Э., 1932, стр. 829.
86. Шапиро. Вопросы вентиляции тяговых двигателей. Э., 1928, № 7—8.
87. Copper, Storer, Case and Hanna. Motors and Equipem nt for Electric Traction in the United States. G. E. R., 1932, стр. 418.
88. Иоффе. Современные тяговые двигатели с точки зрения их параметров. Э. Т., 1933, № 4, стр. 1.
89. Романов. Предопределение перегрева принудительно вентилируемых моторов постоянного тока при длительном режиме. — Э. Т, 1933, № 4, стр. 10.

Отдел III. Системы управления электрическим поездом.

90. James. Controllers for Electric Motors. London, 1927.
91. Dover. Electric Train Control. London, 1923.
92. Beers. The Cam Operated Railway Controller. G. E. R., 1919, № 1.
93. Edler. Entwurf der Schaltwalzen. El. B., 1927, стр. 312.
94. Riley. Magnetic Blow-Out as Applied to Railway Control. E J., 1922, стр. 421.
95. Riley. Fundamentals of Magnetic Blow-Out Structures. E. J., 1928. стр. 485.
96. Wichert. Das elektromagnetische Brown-Boveri-Wechselstrom-Bahnschütz. El. B., 1929, Ergänzungsheft, стр. 44.
97. Balke. Selbsttätige elektropneumatische Steuerung für Gleichstrom-Hauptbahn-Fahrzeuge. E. T. Z., 1927, стр. 753.
98. Ozanne. Les automotrices à 1500 V de la C° du Ch. f. de Paris à Orléans. El. Mec., 1926, № 13.
99. Mardis. The Electrical Equipment and Control of The Ch. M. St. P. R. E. J., 1920, стр. 235.
100. Schenck. Unit Switch Control on The Frankford Elevated at Philadelphia. E. J., 1922, стр. 138.
101. Oertel. Schlittenschaltersteuerung für Lokomotiven. El. B., 1925, стр. 362.
102 Webb. A new type of mine lokomotive controller. G. E. R., 1918, № 9.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

103. Döry. Die Steuerung der Wechselstromlokomotiven. E. u. M., 1923, № 4.
104. Forsberg. Die Steuerung der Paulista-Locomotiven. E. u. M., 1922, № 25.
105. Clarke. The auxiliary and lighting control equipment of the Ch. M. St. P. Lokomotives. E. J., 1920, стр. 244.
106. Поросятников. Управление трамвайными вагонами при оборудовании линейными контакторами. Э. Т., 1933, № 2. стр. 19.
107. Птицын. Схема 114-тонного электровоза. Э. Т., 1933, № 1, стр. 6.
108. Стукалов. Электрооборудование подвижного состава для пригородного сообщения. Б. Д., 1932, № 4. стр. 7.
109. Horst. Kleine Selbstschalten und Motorschutzschalter. El. B., 1928, стр. 220.
110. Rampacher und Weber. Die Entwicklung der Hauptschalter für Wechselstrom-Vollbahn-Fahrzeuge. El. B., 1928, стр. 241.
111. Charpentier. Un nouvel équipement de traction. R. G. E., 1928, стр. 27.
112. Monath. Die Lokomotivschaltung mit Ausgleichtransformator. El. B., 1926, стр. 262.
113. Hille. Das Fortschaltrelais der Berliner Stadtbahn. El. B., 1929, стр. 210.
114. Balke. Neue Druckluftfahrtwendler für Wechselstromlokomotiven. El. B., 1929, стр. 60.
115. Gebauer. Gleichstrom-Schnellschalter. El. B., 1925, стр. 276.
116. Friebel. Oelschalter für elektrische Fahrzeuge. El. B., 1925, стр. 167.
117. Iranyi. Zeitintervalle beim Anlassen von Bahnmotoren. E.-T. Z., 1913, № 47.
118. Givelet. Nouveau système de demarrage pour la traction pour courant continu: les demarreurs inductifs. R. G. E., 1929, стр. 135.
119. Somaini. Système de traction à courant continu à récupération total automatique. R. G. E., 1929, стр. 135.
120. Legouëz. Nouveau système d'autoregulation demarrage sans resistance et récupération. B. d. S. I. d. E. 1913, стр. 979.
121. Della-Riccia. Système de traction A. D. K. A. courant continu demarrage sans résistance et à récupération d'energie. B. S. F. E., 1927, стр. 1089.
122. Spies. Neuerungen an Zugsteuerungen für elektrische Triebwagenzüge. E. T. Z., 1932, стр. 523.

Отдел IV. Системы торможения поезда.

123. Егорченко. Непрерывный тормоз для товарных поездов. Москва, 1925.
124. Егорченко. Тормоз Кунце-Кнорра для товарных поездов. Москва, 1925.
125. Гольдмерштейн. К вопросу об установлении стандартного тормозного оборудования для вагонов городских ж. д. Т. П. Б., выпуск 6.
126. Казанцев. Однопроводный тормоз Казанцева. Москва, 1931.
127. Егорченко. Тормоз Матросова. Москва, 1931.
128. Зильберталь. Рекуперация энергии на электрических ж. д. и трамваях. Ленинград, 1932.
129. Лебедев. Электрические и воздушные тормоза на городских и эл. ж. д. Э., 1912, стр. 310.
130. Зильберталь. Электродинамическое торможение трамвайного вагона. Т. П. Б., выпуск 6.
131. Thoma. Die Kurzschlussbremsen im Strassenbahnbetrieb. Glas. Ann., 1929, № 7.
132. Balke. Elektropneumatische Steuerung der Bahn Koyasau — Tetsudo. El. B., 1931, № III.
133. Bader. Teorie der Kurzschlussbremse. El, B., 1931, № VIII.
134. Kindler. Erfahrungen mit verschiedenen Bremsarten bei der berliner Strassen. E. K. B. u. B., 1921, № 10.
135. Luithlen. Schienenbremsen bei österreichischen Bahnen. E. K. B. u. B., 1913, № 3.
136. Naumann. Über Versuche mit elektromagnetischen Schienenbremsen. E. T. Z., 1911, № 2.
137. Volkers. Für die rein elektrische Bremsung der Strassenbahnwagen. E. K. B. u. B., 1918, № 30 и 1919, № 10.
138. Sauveur. Gegen die rein elektrische Bremsung der Strassenbahnwagen. E. K. B. u. B., 1919, № 20.
139. Dudley. Air Brakes in Electric Tractfon Service. E. J., 1920, № 20.
140. Grünhoiz und Behtge. Wirkungsweise der elektrischen Kurzschlus-Bremsung. El. B., 1925, стр., 134.
141. Seefehlner. Zur Frage der rein elektrischen Bremsung der Strassenbahnwagen. E. K. B. u. B., 1919, № 24.
142. Tetzlatf. Die Druckluferzeugung auf elektrischen Lokomotiven und Triebwagen. El. B., 1927, № 7.
143. Лебедев. Рекуперация энергии на эл. ж. д. Т. Э. В., 1922, стр. 323.
144. Лебедев. Обратная отдача энергии в сеть при однофазной тяге. Э., 1914, стр. 22.
145. Behn-Eschenburg. Anlage zur Nutzbremsung von Fahrzeugen mit Kommutatormotoren für Ein phasen-Wechselstrom. E. T. Z., 1918, № 49.
146. Monath. Einige Verfahren und Schaltungen zur Nutzbremsung von Wechselstromlokomotiven. E. K. B. u. B. 1919, № 27.
147. Лебедев. Однофазная коллекторная машина с независимым возбуждением при работе ее по системе Behn-Eschenburg'a. Э., 1924, стр. 124.
148. Лебедев. Однофазная шунтовая машина с фазным возбуждением. Э., 1925, стр. 443.
149. Atwell. Regeneration characteristic. Curves of Direct Current Locomotives. E. J., 1922, № 3.
150. Ferris. The Axle-Generator Regenerating System. E. J., 1920, стр. 639.
151. Helmund. Regenerative braking of electric vehicles. Proc., 1917, № 1.
152. Mandl. Die Bremsung des Serienmotors. E. u. M., 1920, № 36.
153. Müller. Die Entwicklung der Schaltungen zu Nutzbremsung von Wechselstromlokomotiven. E. K. B. u. B., 1919, № 27.
154. Hibbard. Systems of singe phase regeneration for use with series type commutator motors. J. A. I. E. E., 1923, № 3.
155. Лебедев. Регулирование отдачи энергии в однофазных электровозах. Э., 1925, стр. 83.
156. Лебедев. Теоретический разбор системы регенеративного торможения по схеме завода A. E. G. Э., 1925., № 11.
157. Büttler. Nutzbremsung an Gleichstromhauptbahnlokomotiven. E. T. Z., 1927, стр. 453.
158. Шенфер. Рекуперация энергии при тяге на постоянном токе. Э., 1931, № 10.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

159. Welsch. Neue Bremseinrichtung für elektrische Strassenbahn-Triebwagen und Lokomotiven auf Gefällstrecken. El. B., 1925, стр. 13.
160. Fletcher. Tramway Regeneration. Tramway and Rwy World, 1931, № 1.
161. Bader. Regenerativ Braking Equipment for Pario Tramways. E. R. J., 1930, № 12.
162. Reival. Essais de traction a récupération. R. G. E., 1931, № 3.
163. Reival. Equipments a récupération d'energie pour tramways. R. G. E., 1931, № 7.
164. Трахтман. Регенеративное торможение моторных вагонов на эл. ж. д. Э., 1932, стр. 887.

Отдел V. Особые системы электрической тяги.

165. Alexanderson. Die geteiltphasige Lokomotiven. E. T. Z., 1913, стр. 1392.
166. Nouguier. La distribution électrique monotriphasé. R. E. G., 1917, стр. 403.
167. Alexanderson. Mehrphasenmotoren im Anschluss an Einphasennetze. E. T. Z., 1911, стр. 705.
168. Brüderlin. Die Inductionsmaschinen als Phasenumformer. E. u. M., 1921, стр. 361.
169. Fortescke. Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks. J. A. I. E. E., 1918, стр. 629.
170. Hellmund. No load contions of single-phase induction motors and phase converters. J. A. I. E. E., 1918, стр. 317.
171. Sachs. Eine neue Schaltung zur Umformung von Zweiphasenstrom in Dreiphasenwechselstrom. E. u. M. 1920, № 10.
172. Sachs und Couvenhoven. Die Phasenumformerlokomotive und ihre Verwendungsmöglichkeit in Europa. E. u. M., 1919, № 39.
173. Gerstmann. Über die Dimensionierung von Phasenspaltern. E. u. M., 1925, стр. 653.
174. Sachs. Ueber einige Schaltungsmöglichkeiten rotierenden und statischen Phasenspalter. E. u. M., 1923, № 20.
175. Verebély. Die elektrotechnischen Grundlagen eines neuen Phasenumformersystems zur Elektrisierung von Hauptbahnen. E. T. Z., 1925, стр. 37.
176. Verebély. Die Phasenumformerlokomotive für 50-periodigen Wechselstrom. E. u. M., 1925, стр. 114.
177. Punga und Schön. Der neue Kollektorlose Einphasenmotor der Firma Krupp. E. T. Z., 1926, стр. 842.
178. Reichel und Kopczinski. Elektrischer Güterzugumformerlokomotive Bauart Ford. El. B., 1927, № 9.
179. Messmann. Umformerlokomotiven. El. B., 1929, стр. 135.
180. Grabner. Die Umformerlokomotive der Österreichischen S. S. W. E. u. M., 1931, стр. 377 и 403.
181. Grabner. Motorgenerator-Lokomotiven. E. T. Z., 1933, стр. 273.
182. Müller. Quecksilberdampfgleichrichter im Vollbahnbetrieb. E. K. B. u. B., 1914, № 2.
183. N. The mercury rectier locomotive. E. R. J., 1914, № 25.
184. Reutener. Nebenschlusstriebwagen und ihre Verwendung auf Gebirgsstrecken. E. K. B. u. B., 1913, № 14.
185. Christen. Der Aktionsradius des Akkumulatorenfahrzeuge. S. B. Z., 1923, № 4.
186. Carlier. L'avenir de la traction par accumulateurs. L'El., 1921, № 52.
187. Trey. Calculating Battery Sizes for Locomotives. El. W., 1921, № 25.
188. Klausner. Elektrische Speichertriebwagenzüge. E. u. M., 1921. № 6 и 1922, № 32.
189. Meixner Ergebniss im Verschubdienst mit Akkumulatorlokomotive auf den österreichischen Bundesbahnen. E. T. Z., 1923, стр. 777.
190. Ferrand. Traction électrique par accumulateurs sur les voies ferrés d'interêt général. R. G. Ch. F., 1924, стр. 343.
191. Wechmann Physikalische Grundlagen der Stromrichter. El. B., 1932, стр. 46.
192. Tröger Technische Grundlagen und Anwendungen der Stromrichter. El. B., 1932, стр. 51.
193. Löbl. Bahnumrichter System Löbl. El. B., 1931, стр. 65.
194 Kern. Der kommutatorlose Einphasen Lokomotivmotor für 40 bis 60 Hz. El. B,, 1932, стр. 313.
195. Димитрадзе. Основы рабочего процесса вентильного двигателя для электрической тяги. Э., 1933, № 3 и 4, стр. 18.

Отдел VI. Основы движения поезда и тяговые расчеты.

196. Лебедев. Расчеты элементов электрических ж. д. Ленинград, 1930.
197. Шевалин. Тяговые расчеты электрических ж. д. и трамваев. Ленинград, 1931.
198. Тимофеев. Электрификация ж. д. Ленинград, 1930.
199. Бабичков. Теория тяги поездов. Ленинград, 1934.
200. Егорченко. Тяговые расчеты. Москва.
201. Супруненко. Тяговые расчеты. Киев.
202. Широкогоров. Теоретические основы электрической тяги. Москва, 1932.
203. Лебедев. Основные коэфициенты движения на эл. ж. д. Э., 1923, стр. 473.
204. Зильберталь и Корнакова. Испытание сопротивлений движению вагонов ленинградского трамвая. Т. П. Б., выпуск 5.
205. Davis The Traction Resistance of Electric Locomotives and Cars. G. E. R., 1926, стр. 685.
206. Дегтярев. Расчет движения поезда. Труды Московского Ин-та Инженеров Транспорта, 1927, выпуск IV.
207. Müller. Die Ermittelung der Fahrzeit der Motorbeanspruchung und Stromverbrauches eines elektrischen Triebwagenzuges nach den Motorkennlinien. E. T. Z., 1929, стр. 45.
208. Ossanna. Über das Adhäsionsgewicht von Wechselstromlokomotiven. E. K. B. u. B., 1906, стр. 229.
209. Bergmann. Note on the Tractive Effort of the single Phase Commutator Motor Equipement. El. W., 1906, стр. 713.
210. Lenk. Über die Adhäsion federnder Lokomotiv-Einzelachsantriebe. El. B., 1930, стр. 201.
211. Brecht. DieAusnützung der Reibungsgewichtes des Eisenbahnfahrzeuge. E. K. B. u. B., 1914, № 3.
212. Krauss. Die Charakteristik des Bahnmotors. W. V. S., 1925, Том IV, стр. 9.
213. Adler. Die Leistung von Strassenbahnmotoren. E. T. Z., 1920, № 24.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

214. Шевалин. Расчет нагревания тягового электродвигателя. Э., 1923, стр. 85.
215. Лебедев. Определение пригодности тягового электродвигателя с точки зрения переменного режима работы его на линии. Э., 1924, стр. 465.
216. Wichert. Über Fahrwiderstände elektrischer Lokomotiven mit Parallelkurbelgetrieben. E. K. B. u. B., 1919, стр. 249.
217. Минов. Расчет нагревания тягового электродвигателя. Э. Ж. Д., 1932, № 5—6, стр. 38.
218. Сидоров. Расхождение характеристик совместно работающих тяговых двигателей постоянного тока и его влияние на их нагрев. Э. Ж. Д., 1932, № 1, стр. 11.
219. Минов. Простой способ определения нагревания тягового электродвигателя. Э., 1931, стр. 844.

Отдел VII. Подвижной состав электрических железных дорог.

220. Sachs. Elektrische Vollbahnlokomotiven. Berlin, 1928.
221. Grünholz. Elektrische Vollbahnlokomotiven. Berlin, 1930.
222. Zipp. Elektrische Vollbahnlokomotiven für einphasigen Wechselstrom. Leipzig, 1924.
223. Zehme. Fahrzeuge für elektrische Eisenbahnen. Wiesbaden.
224. Вандергюхт и Короткевич. Основы вагоностроения. Москва, 1935.
225. Коллектив з-да Динамо. Материалы по электровозостроению. Москва — Ленинград, 1933.
226. Герливанов. Подвижной состав электрических жел. д. Москва, 1932.
227 Kummer. Ausrüstung der elektrischen Fahrzeuge. Berlin, 1925.
228 Годыцкий-Цвирко. Взаимодействие пути и подвижного состава ж. д. Ленинград, 1931.
229. Марье. Взаимодействия пути и подвижного состава. Москва, 1933.
230. Тимошенко. Теория колебаний в инженерном деле. Ленинград, 1932.
231. Кестнер. Курс паровозов. Москва, 1922.
232. Süberkrüb. Fahrzeuge-Getriebe. Berlin, 1931.
233. Wisty. Die Lokomotivantriebe bei Einphasenwechselstrom. Berlin, 1925.
234. Wichert. Schüttelschwingungen. Berlin, 1924.
235 Döry Die Schüttelerscheinungen elektrischer Lokomotiven mit Kurbelantrieb. E. u. M., 1924, стр. 45.
236. Winkler. Die Schüttelschwingungen elektrischer Lokomotiven mit Stangenantrieb. E. u M., 1924, стр 241.
237. Linder. Neue Bauarten elektrischer Lokomotiven mit guter Ausnutzung des Reibungsgewichtes. El. B., 1930.
238. Siege. Berechnung der Federn für Motoraufhängung. El. B., 1926, стр. 36.
239. Brecht Die günstigste Motoraufhängung bei elektrischen Fahrzeugen. E. K. B. u. B., 1909, стр. 181.
240. Latersner. Stossvermindernde Aufhängung des nur teilweise, abgefederten Bahnmotors. S. B. Z., 1924, стр. 125 и 1925, стр. 121.
241. Kleinow. Die elektrische 1—C_0—C_0—1 Güterzuglokomotive der Deutschen Reichsbahn. El. B., 1929, Ergänzungsheft, стр. 4.
242. Törpisch. Achslastausgleicher für Drehgestell-Lokomotiven, Bauart Maffei-Schwarzkopf. El. B., 1930, стр. 297.
243. Kleinow. Das Parallelkurbelgetriebe als Antriebsmittel für elektrische Lokomotiven. E. K. B. u. B., 1910, стр. 495.
244. Kleinow. Der Kuppelrahmen und verwandte Getriebe als Antriebsmittel für elektrische Lokomotiven. E. K. B. u. B., 1913, стр. 337.
245. Heyden. Beiträge zur Frage des Antriebes elektrischer Vollbahnlokomotiven. E. K. B. u. B., 1909, стр. 308.
246. Kleinow. Gewichtsverlegung bei elektrischen Fahrzeugen und Lokomotiven. E. K. B. u. B., 1911, стр. 269.
247. Wechmann. Mitteilungen aus dem elektrischen Fernzugbetrieb der Deutschen Reichsbahn. E. T. Z., 1922, стр. 940.
248. Sachs. Die Elektriesierung der Gottardstrecke Luzern — Chiasso der Schweizerischen Bundesbahnen. E. T. Z., 1922, стр. 1.
249. Hellmund. Neuere Personenzugs-und Güterzugslokomotiven der New-York-New-Haven and Hartford-Bahn und Boston und Maine Bahn. E. K. B. u. B., 1913, стр. 533.
250. Гуленко. Современный американский вагон. К. Т. П. Б., 1932, № 14—15.
251. Мохов. Грузовой электровоз О-3-3-О. Э. Ж. Д. 1933, №№ 1, 2, 3 и 4.
252. Забродин, Рыков и Шляхто. Первый Советский электровоз серии ВЛ-19. Э. Ж. Д., 1934, № 1-2.
253. Шацилло Сурамский электровоз и использование его веса при различном положении его моторов. Э., 1932, стр. 623.
254. Grahame. Speedy Ligt-Weight,-Cars. E. R. J., 1930, стр. 267.
255. Kleinow. Lokomotive. A. E. G. M., 1931, стр. 250.
256 Шацилло. Общее устройство экипажной части электровоза. Б. Д., 1932, стр. 2.
257. Аватков. 114-тонный электровоз. Б. Д., 1932, стр. 2.
258. Apelt. Achsdruckausgleichvorrichtung für Drehgestellokomotiven. El. B., 1932, стр. 142.
259. Pflanz. Über den mechanischen Aufbau von elektrischen Lokomotiven der Achsfolge B-B. El. B., 1932, стр. 40.
260. Pflanz. Über zusätzliche Raddrücke elektrischer Triebfahrzeuge mit Tatzenlagermotoren. El. B., 1932, стр. 350.
261. Горкин и Шацилло. Коэфициент использования сцепного веса у электровоза C_0 — C_0. Э. Т., 1934, № 2, стр. 13.

Отдел VIII. Рабочая сеть электрических железных дорог.

262. Poschenrieder. Bau und Instandhaltung Oberleitungen elektrischer Bahnen. München — Berlin, 1904.
263. Ertel. Fahrleitungsanlagen für elektrische Bahnen. Berlin, 1928.
264. Jakobs. Fahrleitungsanlagen für elektrische Bahnen. München, 1925.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

265. Kummer. Die Energieverteilung für elektrische Bahnen. Berlin, 1920.
266. Иванов. Расчет цепной подвески контактных линий эл. ж. д. Москва, 1931.
267. Научн. Исслед. Ин-т по эл. ж. д. Н. К. П. С. Исследование контактной сети электрических ж. д. Москва—Ленинград, 1932.
268. Тимофеев. Расчет цепной подвески на температуру и вертикальную нагрузку. Ленинград, 1932.
269. Парфенов. О влиянии изменений температуры и нагрузок на напряжение проводов в цепных подвесках. Э., 1928, стр. 184.
270. Минов. Влияние отклонения струн на работу цепной подвески с регулировкой напряжения в контактном проводе. Э., 1928, стр. 51.
271. Шевалин. Расчет цепной подвески контактного провода на отклонение ветром. Э., 1931, стр. 840.
272. Минов. Расчет отклонения контактного провода ветром при цепной подвеске. Э., 1931, стр. 1201.
273. Naderer. Die Fahrleitungen für den elektrischen Fernbetrieb der Deutschen Reichsbahn. Glas. Annal., 1927. стр. 198.
274. Nibler. Verhalten von Fahrleitungen für elektrische Vollbahnen in Gleiskrümmungen unter dem Einfluss der Temperaturänderungen. El. B., 1932, стр. 15.
275. Wade and Linebaugh. The Collection of Current from Overhead Contact Wires. G. E. R., 1927. стр. 432.
276. Buchhold. Zeichnerisches Verfahren zur Ermittelung der geometrischen Eingenschaften windschiefer Kettenfahrleitungen. El. B., 1930, стр. 97.
277. Viele. Current Collection from an Overhead Contactsystem applied to Railroad Operation. J. A. I. E. E., 1927, стр. 1081.
278. Hölzel. Neues Bahnleitungsmaterial. V. T., 1927, стр. 351.
279 Jülliant. Les essais de traction électrique par locomotives équipées avec moteurs a courant monophasé. R. G. Ch. F., 1911, стр. 233.
280. Timofeef. Eine neue graphische Methode der Berechnung der Windschiefen Kettenfahrleitungen Kurven. El. B., 1929, стр. 182.
281. N ... . The Experimental catenary line of the Connecticut Company. E. R. J., 1910, стр. 345.
282. Smith. Electric Railway Catenary Construction. E. R. J., 1910, стр. 991.
283. Cramer. Die Fahrdrahtleitung der Gottardbahn. E. T. Z., 1922.
284. Коновалов. Проблема блуждающих токов при электрификации жел. дор. Э., 1932, стр. 880.
285. Блинкин. К вопросу о расчете трамвайной сети постоянного тока. Э., 1926, стр. 369.
286. Лебедев. Электрический расчет рабочей сети эл. жел. дор. Э., 1926, стр. 457
287. Шевалин. Экономические основы для выбора товарных электровозов для русских магистральных жел. дор. Т. Э. В., 1922, стр. 55.
288. Bisacre. The calculation of track pressure drop and track losses on direct current railways. El., 1920, стр. 188.
289. Forwald. Elektrischer Zugbetrieb bei 15 kV Gleichstrom..El. B., 1934, стр. 209.
290. Минов. Электрический расчет железнодорожной сети при постоянном токе. Э., 1931, стр. 87.
291. Розенфельд. Применение принципов теории вероятности к электрическому расчету тяговых сетей. Э., 1934, № 3, стр. 35.
292. Lichtenstein. Experimentelle Bestimmungen der für die Berechnung von Wechselstrombahn Leiteranlagen massgebenden physikalischen Grössen. E. T. Z., 1907, стр. 620.
293. Hüldschiner. Berechnung des Spannungsabfalles in den Fahrleitungen und Schinenrückleitungen von Wechsel und Drehstrombahnen. E. T. Z., 1910. стр. 1208.
294. Hüldschiner. Zur Berechnung von Spannungsabfällen in den Fahr und Speiseleitungen elektrischer Wechselstrombahnen. E. T. Z., 1920, стр. 1049.
295. Forwald. Ermittelung des Speisepunktabstandes einer elektrischen Bahnanlage. El. B., 1930, стр. 178.
296. Benda und Voigtländer. Der Spannungsabfall in Fahrleitungen und Schienen elektrischer Bahnen. W. V. S., 1931, том X, стр. 78.
297. Pleijel. Untersuchungen über schwachstromstörung bei Einphasenwechselstrombahnen. München, 1920.
298. Benda. Beitrag zur Bestimmung des inneren Scheinwiderstandes einer Eisenbahnschiene. W. V. S., 1931, том X. стр. 91.
299. Forwald. Streckenimpedanz und Schienenstrom bei Einphasenbahn. El. B., 1931.
300. Geppert und Liese. Schutz Gas und Wasserrohren gegen Zerstörung durch Erdströme. E. K. B. u. B., 1911, стр. 92.
301. Devaux. Electrolise aux courrants de retour dans la traction. R. El., 1911, стр. 135.
302. Костромитин. О наивыгоднейшем законе изменения сечения в контактной сети. Э. Ж. Д., 1933, № 11, стр. 23.
303. Рывкин. О методах проектирования контактной сети. Э. Ж. Д., 1934, № 2, стр. 11.
304. Кузнецов. Принципы расчета контактной сети и тяговых подстанций эл. жел. дор. с помощью прибора, основанного на методе воспроизведения подобного движения. Э.Ж. Д., 1933, № 9, стр. 18.

ОТДЕЛ IX.

Системы питания электрических железных дорог.

305 Бирманс. Сверхтоки в установках высокого напряжения. Ленинград, 1932.
306. Лютер. Электрические силовые установки. Распределительные устройства. Ленинград, 1926.
307. Альбац. Тяговые подстанции и контактная сеть на эл. жел. дор. С. Ш. А. Москва, 1932.
308. Эпштейн. Районные трансформаторные подстанции. Москва, 1932.
309. Слоним. Распределительное устройство электрических станций и подстанций. Москва — Ленинград, 1933.
310. Forwald. Der Unterwerksabstand bei Einphasenbahnen mit Speisung durch Dreileitersystem und auf der Strecke aufgestellten Autotransformatormotoren. El. B., 1929 стр. 252.
311. Begis. Les court-circuits en les réseaux de traction, la protection par disjoncteurs ultra-rapide. R. G. E., 1928, стр. 499.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

312. Parodi. Electrification partielle du réseau de la Compagnie d'Orléans. R. G. Ch. F., 1925, № 11 и 1926, № 2.
313. Davis. Automatic Railway Substation. G. E. R., 1915, № 10; 1916, № 11; 1920 № 4 и 1921, № 7.
314. Fontrède. Dispositif de commande et de controle automatiques a distance. El. & Mec., 1924, стр. 24.
315. Göede. Development of Automatic Switching Equipments in the United States and Europe. J. A. I. F. E., 1927, № 10.
316. G. E. C. Automatic Railway Substation. G. E. R., 1925, № 6.
317. Pietzsch. Selbsttätige Umformeranlagen. El. B., 1925, № 7.
318. Tauzin. Equipment automatique Thomson-Houston avec commande et controle à distance. El. & Mec., 1926, № Ноябрь.
319. Reagan. Automatic Switching of Mercury Arc Power Rectifiers. J. A. I. E. E., 1927, стр. 446.
320. Walty. Bedingungslose Grossgleichrichteranlagen. B. B. C. M., 1926, № 10.
321. Jordan. Selbstätige Gleichrichterwerk Schützenhof der Hagener Vorortbahnen. A. E. G. M., 1928, стр 468.
322. Giudici. Das bedingungslose Unterwerk Freiburg der Schweizerischen Bundesbahnen. B. B. C. M., 1928, стр. 162.
323. Dähne. Wechselstrombahnanlage mit Puffer-batterie. E. T. Z., 1928, стр. 821.
324. Besold. Fortschritte im Schnellschalterbau. E. T. Z., 1927, стр. 1727.
325. Brynhildsen. Die Gleichrichteranlage der Überlandbahn Turin—Lanso—Cères. B. B. C. M., 1926, № 6.
326. Idelberger. Drehstrom-Gleichstrom-Umformerwerke für Bahnzwecke. Berlin, S. S. W., 1920.
327. Heusser. Das Freiluft-Unterwerk Olten der Schweizer Bundesbahn. E. u. M., 1924, стр. 637.
328. Wechmann. Die Beeinflussung des Fernmeldesbetriebs durch elektrische Bahnen. Berlin, 1927.
329. Schuler. Die elektrischen Bahnen angewandten Mittel zur Verhütung der Schwachstromstörungen durch Hochspannungsfahrleitungen. E. T. Z., 1925, стр. 1361.
330. Stein. Störungen in Fernsprechleitungen durch Wechselstrombahn. E. T. Z., 1912, стр. 844.
331. Marguerre. Über Telephonstörung durch Wechselstrombahnen. E. T. Z., 1912, стр. 1209.
332. Сергеев. Методы защиты контактной сети электрических железных дорог постоянного тока от токов короткого замыкания. Э., 1932, стр. 515.
333. Костромитин. Применение теории вероятности к выбору мощности тяговых подстанций. Э. 1927, стр. 63.
334. Зильберталь. Колебания нагрузки на тяговых подстанциях и их влияние на расчет распределительной сети. Э., 1932, стр. 404.

Дополнительная литература.

335. Медель. Магистральные электровозы постоянного тока. Москва, 1935.
336. Находкин. Тяговые электродвигатели постоянного тока. Москва, 1935.
337. Горкин. Использование сцепного веса электровозов 0—3—3—0 и 1—3—3—1. Москва, 1935.
338. Лесневский. Контактные линии электрических ж. д. Ленинград, 1935.
339. НКПС. НИИ эл. ж. д. Расчеты по контактной сети эл. ж. д. Москва, 1934.
340. Рывкин. Расчет тяговых подстанций и контактной сети. Москва, 1934.
341. Карякин. Тяговая подстанция и ее работа. Москва, 1934.
342. Фетисов. Сурамские мотор-генераторы. Москва, 1934.
343. Фетисов и Соловьев. Сглаживание пульсации напряжения ртутных выпрямителей. Москва, 1933.
344. Зильберталь. Аналитическое решение графика движения поезда при электротяге. Э., 1935, стр. 11.
345 Розенфельд. О токораспределении в рельсовых сетях электрических ж. д. Э. 1935 стр. 23.
346. Минов. Выбор двигателя для магистрального и промышленного электровозов постоянного тока Э., 1935, стр. 1.
347. Тихменев. Новые схемы вентильного двигателя, Э., 1935. стр. 39.
348. Лившиц. Работы тягового двигателя на умформерном электровозе с ионными преобразователями. Э. Т., 1935, стр. 12.
349. Коновалов. Быстроходные электровагоны. Э., 1935, стр, 34.
350. Трахтман. Выбор возбудительного агрегата для электровоза с рекуперацией при учете нестационарных явлений. Э. Т., 1935, стр, 2.
351, Гармаш. Утечка тока из рельсов электрических ж. д. Э. Ж. Д., 1935, стр, 20.
352. Карповский. Применение вентильных двигателей для привода электровозов. Э. Ж. Д., 1935, стр. 3—6.
353. Ливенцев и Раков. Сопротивление движению электровозов. Э. Ж Д. 1935. стр. 9.
354. Сталь. Сопротивление рельсового пути. Э. Ж. Д., 1935, стр. 14.
355. Пучков. Электрификация ж. д. и сверхскоростный транспорт. Э. Ж. Д., 1935, стр. 21.
356. Забродин, Раков, Шляхто и Бычковский. Первый советский электровоз серии ВЛ—19—01. Испытания электровоза. Э. Ж. Д., 1935, стр. 11.
357. Vogelpohl. Windkanalversuche über ben Luftwiderstand von Eisenbahn-Fahrzeugen. Z. V. D. I., 1934. стр. 159.
358. Vogelpohl. Die physikalische Natur der Bewegungswiderstände von Eisenbahnfahrzeugen. Z. V. E., 1935, стр. 851.
359. Vogelpohl. Zur Gesetzmassigkeit der Luftwiderstandes von Eisenbahnzugen. Forschung auf dem Gebiete das Ingenieurwesens, 1935, стр. 217.
360. Rechel. Verbesserungen an der Klotsbremse für schnellfahrende Eisenbahnzeuge. Z. V. D. I., 1934, стр. 1244.
361. Niethammer. Fahrdrat und Stromabnehmer. E. V., 1934, стр. 549.
362. Marshall. Train Resisance Trails in India. Engineer, 1935, стр. 640.
363. Pickens. Operating Features of Pantograph Collectors, El. Eng., 1934, стр. 190.
364. Schaake. Design Features of Pantograph Collectors Electr. Eng., 1934, стр. 182.
365. Schön. Die Motoren der Kruppschen Höllentalbahn-Lokomotive. El. B., 1935, стр. 61.
366 Sinclair. Regeneration in D. C. Traction. Inst. of Transport, 1934, стр. 258.
367. Hermle. Neue Isolierstoffe im Bahnbetrieb. El. B., 1935, стр. 145.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

368. Longfield. The practical solutions of straycurrent electrolysis. J. I. E. E., 1935, стр. 101.
369. Truellood, Wascheck. Investigation of Rail Impedances. El. Engin., 1933, стр. 898.
370. Cromwell. The Speed-Time electrograph. El. Engin., 1935, стр 923.
371 Simens-Schuckert. Die Steuerumrichter-Versuchsanlage der SSAG im Reichsbahn-Saalach-Kraftwerk, 1935, стр 235.
372. Rödiger. Elektrische Akkumulatorfahrzeuge. Bull. Ass. Suisse Electr. 1933, стр. 621.
373. Chalumeau. Les vehicules à accumulateurs électriques de la Ville de Lyon. Bull. Ass. Suisse Electr., 1933, стр. 605.
374. Brunner. Die verwendung des Gleichctrom-Wechselstrom-Mutators für die Nutzbremsung in Bahnanlagen. B. B. C. M., 1934, стр. 224.
375. Schmidt Schrader Friction of Railway Brake Choes. Bull. Univ. of. Illinois Ing. Exp. St., 1033, стр. 96.

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.

Индексы общие для всех обозначений.

max — наибольший.
min — наименьший.
ср — средний.
h — часовой.
∞ — длительный.
eff — эффективный.
э — эквивалентный.
д — режим машины как двигателя.
г — как генератора.

A

A — механическая работа.
A — электрическая энергия.
$A_п$ — работа, совершаемая за период движения поезда под реостатами.
A — сорт изоляции машин.
A — теплоемкость машин.
$A_ж$ — теплоемкость, приведенная к температуре железных масс машины.
AS — линейная нагрузка якоря или ротора.
AW — ампер - витки.
AW_1 — „ „ компенсационной обмотки.
AW_2 — „ „ якоря или ротора.
AW_3 — „ „ обмотки возбуждения
AW_D — „ „ добавочных полюсов.
a — половина числа ветвей якорной или роторной обмотки.
a — ширина колеи.
a — ускорение или замедление.
$a_п$ — ускорение при движении под регуляторами.
$a_т$ — замедление при торможении.

B

B — коэфициент теплоотдачи машины.
$B_ж$ — коэфициент теплоотдачи железных масс машины.
$B_м$ — коэфициент теплоотдачи меди обмоток.
B — значение индукции.
B_z — индукция в зубцах.
B_l — „ в междужелезном пространстве.
B_j — „ в ярме или кожухе.
$B_я$ — в железе якоря.
B_m — в индукторах.
B_N — „ эквивалентная от потока впадин.
b — ширина пластины или деление по коллектору.
b_d — ширина пластины или деление по коллектору, приведенные к периферия якоря или ротора.
b — величина зигзага контактного провода.
b_i — теоретическая длина полюсной дуги.
b — эквивалентная сила успокоения колебаний.

C

C — постоянная машины.
C — постоянный коэфициент.
C — градусы Цельсия.
C — коэфициент теплоемкости металлических масс машин
C_1 — коэфициент теплоемкости воздушных масс.
c — эквивалентная жесткость материала.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

D

D_1 — диаметр ведущих колес.
D_2 — диаметр ротора или якоря двигателя.
D_3 — диаметр начальной окружности большого зубчатого колеса.
d_1 — диаметр оси.
d_2 — диаметр шейки цапфы.
d_3 — диаметр начальной окружности шестерни.

E

E — электродвижущая сила.
$E_в$ — „ образуемая вращением.
$E_п$ — „ „ пульсацией потока за счет самоиндукции.
$E_т$ — „ „ трансформаторным эффектом.
E_q — „ „ поперечным потоком за счет пульсации
e — основание натуральных логарифмов.
e — мгновенное значение электродвижущей силы.
e — боковое ветровое отклонение контактного провода от центральной траектории токоприемника.

F

F — сила тяги.
$F_и$ — сила инерции, отнесенная к ободу колеса.
$F'_и$ — сила инерции, обусловленная поступательно движущимися массами.
$F''_и$ — „ „ вращающимися массами.
f — стрела провеса провода.
f_o — начальная стрела провеса троса цепной подвески.
f_2 — стрела провеса троса при горизонтальном положении контактного провода.
f — коэфициент обмотки.
f_1 — „ компенсационной.
f_2 — „ роторной.
f_3 — „ возбуждения.

G

G — вес.
$G_в$ — вес вагона
G_o — вес, приходящийся на одну ось.
$G_т$ — вес поезда.
$G_э$ — вес электровоза.
G_c — сцепной вес.
$G_р$ — вес погонного метра рельса.
$G_т$ — вес, приходящийся на тормозные оси.
g — ускорение силы тяжести.

H

H — напряжение в проводе.
$H_к$ — „ в контактном проводе.
$H_т$ — „ в опорном тросе.
h — полюсное расстояние в диаграммах.
h — давление или разряжение, создаваемое вентилятором.
h — высота подъема наружного рельса.
h — высота подъема оси передаточного вала над осью ведущей оси.

I

I — сила тока.
I_1 — ток в первичной цепи.
I_2 — ток во вторичной цепи.
I_a — ток намагничивания.
$I_в$ — ток цепи возбуждения.
I_q — ток, образуемый в короткозамкнутом роторе электродвижущей силой вращения.
$I_к$ — ток короткого замыкания в цепи статора.
$I_{2к}$ — ток, образуемый трансформаторным эффектом в короткозамкнутом роторе.
$I_р$ — ток рекуперации.
I — момент инерции.
I_1 — „ „ частей подвижного состава, имеющих угловую скорость оси.
I_2 — „ „ „ „ „ „ угловую скорость роторов или якорей двигателей.
i — мгновенное значение силы тока.
$e/_{00}$ — величина уклона в тысячных.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

K

K — тангенциальная сила на периферии кривошипа.
K — количество коллекторных пластин.
k — коэфициент пропорциональности.
k — коэфициент инерции вращающихся масс.
k_1 — воздушный коэфициент лобовых поверхностей.
k_2 — „ „ бокового трения.
k_n — коэфициент учета расхода энергии в пусковых реостатах в зависимости от числа комбинаций включения.
k_{nm} — коэфициент учета поправок к расходу энергии на пусковой и тормозной периоды.
k_t — поправочный коэфициент для определения среднего падения напряжения и потери мощности. в проводах.
$k_{зап}$ — коэфициент запаса в мощности на неточность расчетов.
k_{eff} — „ перехода от средних к средне-нагревательным токам.
$k_в$ — „ вентиляции для перехода от I_h к I_∞.
k_{hn} — „ перехода от пусковой мощности к часовой.

L

L — длина линии.
L — коэфициент самоиндукции на 1 km линии.
L_p — „ „ „ 1 „ рельса.
L' — коэфициент самоиндукции всего участка линии.
L'_p — „ „ „ „ рельса.
l — текущая величина расстояний.
l — длина перегона.
l — расстояние между точками питания или отсасывания.
l — расстояние между подстанциями.
l — длина вагона.
l — длина осевой базы подвижного состава.
$l_к$ — длина кривой пути.
l_n — длина пути, проходимого поездом под пусковыми регуляторами.
l_m — „ „ „ „ „ тормозами.
l_i — теоретическая длина железа якоря или ротора.
ln — знак натурального логарифма.
lg — знак десятичного логарифма.

M

M — масса вещества, выделяемого при электролизе.
M — масса поезда.
$M_п$ — приведенная масса, учитывающая эффект поступательно движущихся масс и вращающихся.
M — момент вращения.
$M''_и$ — вращающий момент, обусловленный силой инерции вращающихся масс.
M_{12} — коэфициент взаимоиндукции между проводами 1 и 2 на 1 km длины.
$M_{кр}$ — „ „ контактным проводом и рельсами.
$M'_{кр}$ — „ „ „ „ „ всего участка пути.
$m_з$ — масса зубчатых колес.
$m_к$ — „ колес подвижного состава.
$m_о$ — „ осей подвижного состава.
$m_я$ — „ якорей или роторов.
m_{eff} — масштаб квадратов тока.
m_i — „ тока.
m_k — „ ускоряющих усилий.
m_l — „ расстояний.
m_t — „ времени.
m_v — „ скорости.
m — число рейсов поезда за рабочий день.

N

N — усилия в механизме подвижного состава.
N — число стержней в роторной обмотке.
N — число поездов на линии между смежными питательными пунктами или подстанциями.
N_a — число поездов на одном пути двухпутной дороги.
N_n — число поездов, приходящихся на одну подстанцию.
N_p — „ ниток рельсового пути.
n — „ оборотов двигателя в минуту.
n — „ вагонов в поезде.
n — „ двигателей в поезде.
n — „ поездов на линии одного направления.
n — „ перегонов в рейсе.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

P

P — усилие.
P — мощность.
P_1 — мощность, подведенная к машине
P_c — момент в синхронных ваттах.
$P_м$ — механическая мощность двигателя.
$P_п$ — полные потери в двигателе.
$P_{дж}$ — потери на джоулев эффект.
$P_ф$ — потери на токи Фуко.
$P_г$ — потери на гистерезис.
P — нагрузка проводов в kg на 1 m длины.
$P_к$ — „ контактного провода.
$P_т$ — „ троса.
$P_в$ — ветровая нагрузка.
$P_{вк}$ — „ „ на контактный провод.
$P_{вт}$ — „ „ на трос.
$P_{1к}$ — вертикальная нагрузка от контактного провода.
$P_{1т}$ — „ „ „ троса.
$P_{к+т}$ — суммарная нагрузка от контактного провода и троса.
PS — мощность в лошадиных силах
p — число всех перегонов на рассматриваемом участке линии.
p — „ пар полюсов.
p — коэфициент жесткости рессор.
p — давления воздушных масс.
p — удельная нагрузка проводов в kg на провод длиною в 1 m и сечением в 1 mm².
p_1 — „ „ вертикальная.
p_γ — „ „ от собственного веса.
$p_г$ — от гололеда.
$p_в$ — от ветра.
$p_к$ — контактного провода.
$p_т$ — троса.
$p_{к+т}$ — от контактного провода и троса.
$p_{1к}$ — вертикальная от контактного провода.

Q

Q — усилия в механизме подвижного состава.
Q — количество тепла, вырабатываемого машиной за счет потерь.
Q_e — „ „ излучаемого в единицу времени 1 m² внешней поверхностью кожуха при превышении его температуры над средой в 1° C.
Q_i — количество тепла, снимаемое в единицу времени вентиляционным воздухом с 1 m² омываемой им поверхности при разнице температур их в 1° C.
Q — площадь поперечного сечения проводников в mm².
$Q_к$ — „ „ „ контактного провода.
$Q_т$ — „ „ троса.
$Q_р$ — „ рельса.

R

R — силы реакций в механизме подвижного состава.
R — радиус кривых путей.
R — „ обода ведущего колеса.
R — „ равновеликого круга.
R — полное омическое или активное сопротивление машин.
$R_п$ — сопротивление, включаемое в цепь якоря или ротора.
$R_п$ — „ переходное от рельсов к почве.
$R_р$ — „ рельсов.
R_1 — сопротивление пути.
R_2 — „ механизма подвижного состава.
R_v — „ воздушной среды.
R_i — уклона местности.
$R_к$ — кривых пути.
$R_м$ — вызываемое механическими и воздушными потерями двигателей.
$R_т$ — „ „ тормозным эффектом.
r — радиус окружности пути пальцев кривошипа.
r — омическое или активное сопротивление отдельных обмоток машин.
r — омическое сопротивление 1 km пути.
r_{eff} — активное „ 1 „ „
$r_р$ — „ 1 „ рельсов.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

r_n — переходное сопротивление от рельсов к почве на 1 km.
r — удельное сопротивление движению поезда.
r_1 — „ „ пути.
r_2 — „ „ механизма подвижного состава.
r_v — „ „ воздушной среды.
r_i — „ „ уклона.
$r_к$ — „ кривых пути.

S

S — площадь или поверхность.
S — „ поперечного сечения подвижного состава.
S_1 — боковая поверхность подвижного состава.
S_e — внешняя поверхность охлаждения двигателя.
S_i — внутренняя поверхность двигателя, омываемая воздухом.
S_c — сила сцепления в kg.
S — силы, действующие в рычажной передаче.
$S_{вед}$ — усилие, создаваемое двигателем на ведомой им оси.
$S_{рес}$ — усилие, создаваемое двигателем в надрессорном строении.
S — тяжение в проводах в kg
$S_к$ — „ в контактном проводе.
S_m — „ в тросе.
$S_к$ — количество последовательно соединенных катушек, замыкаемых накоротко щеткой.
S_t — коэфициент самоиндукции от утечки.
S — комплекс в формулах блуждающих токов.
S — плотность тока.
s — скольжение.
s — аргумент в формулах блуждающих токов.

T

T — усилия в механизме подвижного состава.
T — тяжение в проводах.
T — время.
T_x — время поезда в ходу на перегоне (ходовое время).
$T_к$ — „ нахождения поезда на перегоне с учетом остановки (коммерческое время или время сообщения).
T_o — время нахождения поезда на остановке.
$T_п$ — „ движения поезда под пусковыми регуляторами.
$T_т$ — „ „ „ „ тормозами.
T_a — „ „ „ „ током.
T — постоянная времени.
$T_ж$ — „ „ железных масс двигателя.
$T_м$ — „ „ меди обмоток двигателя.
t — температура.
t — текущее значение времени.
t_1 — величина шага зубцов ротора.

U

U — напряжение на зажимах цепи.
$U_п$ — „ на шинах подстанции.
$U_в$ — „ у зажимов цепи возбуждения.

V

V_o — объем воздуха, прогоняемого через машину.
v — текущее значение скорости движения поезда.
v_x — средне-ходовая скорость.
$v_к$ — коммерческая скорость или скорость сообщения.
$v_в$ — скорость, при которой выключаются пусковые регуляторы.
$v_т$ — „ начала торможения.
— „ на подъеме.
v — окружная скорость вращения.
$v_п$ — скорость на периферии якоря или ротора
$v_к$ — „ „ коллектора.
v — мгновенное значение напряжения.

W — число витков.

X

x — реактивное сопротивление 1 km пути.
x — „ обмоток двигателя.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Z

Z — количество зубцов на роторе.
Z — полное сопротивление 1 km пути (комплекс).
Z — полное сопротивление обмоток машин.
Z_{2s} — полное сопротивление роторной обмотки асинхронных машин при схеме замещения.
z — полное сопротивление в цепях переменного тока.
z — полное сопротивление 1 km пути.

Y

Y — проводимость (комплекс).
Y_s — проводимость цепи намагничения.
y — проводимость цепей.

α — центральные углы.
α — коэфициент распределения магнитного поля.
α — „ температурного расширения.
$\alpha_к$ — „ материала контактного провода.
α_m — „ „ троса.
α_i — отношение полюсной дуги к полюсному делению.

β

β — центральные углы.
β — коэфициент линейного растяжения.
$\beta_к$ — „ контактного провода.
β_m — „ „ „ троса.
β_1 — отношение превышений температур на поверхности кожуха двигателя к внутренней железных масс.
ϑ — ширина щетки.
ϑ — „ приведенная к периферии ротора.

γ

γ — центральные углы.
γ — удельный вес.

δ — центральный угол.
δ — величина междужелезного пространства.

Δ

Δ — конечное малое приращение
Δi — линейная нагрузка тока.
ΔA — удельный расход энергии.
ΔU — падение напряжения или приращение напряжения.
ΔU_r — активное падение напряжения.
ΔU_x — реактивное падение напряжения.
Δe_N — искровая (реактивная) электродвижущая сила коммутации.
Δe_D — электродвижущая сила, создаваемая добавочными полюсами.
Δe_m — трансформаторная электродвижущая сила.

η — коэфициент полезного действия.
η_n — „ за период работы под реостатами.
$\eta_з$ — „ зубчатой передачи.

Θ

Θ — превышение температуры двигателя над окружающей атмосферой в конце рейса.
Θ_m — „ „ „ в конце рабочего дня.

λ

λ — отношение площади поперечного сечения электровоза к таковой же вагона.
λ_N — эквивалентная магнитная проводимость для впадинного магнитного поля.

μ

μ — магнитная проницаемость.
μ — коэфициент трения.

ν

ν — частота пульсации тока.
ν_n — частота вращения, равная $pn/60$.
ν_r — частота вынужденных колебаний.
ν_c — частота свободных колебаний.

ρ

ρ — коэфициент сцепления.
ρ — радиусы инерции.
$\rho_з$ — „ „ зубчатых колес.
$\rho_к$ — „ „ колес подвижного состава.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ρ_o — радиусы инерции осей.
$\rho_я$ — „ „ якоря с коллектором.
ρ — удельное сопротивление проводника.
ρ_{eff} — эффективное удельное сопротивление.

Σ — знак алгебраической суммы.
ΣR — сумма сопротивлений движению поезда.
Σr — сумма сопротивлений обмоток двигателя.

σ
σ — коэфициент жесткости материала шатунов.
σ — относительное средне-квадратичное отклонение.

τ — превышение температуры над окружающей средой.
τ_o — начальное превышение.
$\tau_{ж}$ — превышение температуры железных масс двигателя.
$\tau_м$ — меди обмоток над железом.
τ_a — вентиляционного воздуха при выходе из машины над окружающей средой.

Φ
Φ — магнитный поток.

φ Φ
φ — центральный угол.
φ — угол сдвига фаз тока и напряжения.
φ — угол сдвига материала при скручивании.
φ — угол сдвига между пальцами ведущих и ведомых кривошипов.

ψ
ψ — центральный угол.

ξ
ξ — коэфициент жесткости материала кривошипов.

ω
ω — угловая скорость.

Обозначение принятых единиц измерения.

sec — секунда.
min — минута.
h — час.
mm — миллиметр.
cm — сантиметр.
m — метр.
km — километр.
mm^2 — квадратный миллиметр.
cm^2 — квадратный сантиметр.
m^2 — квадратный метр.
m/sec — скорость 1 метр в секунду.
km/h — скорость 1 километр в час.
m/sec^2 — ускорение или замедление 1 метр в секунду.
km/h/sec — ускорение или замедление 1 километр в час в секунду.
g — грамм.
kg — килограмм.
t — тонна.
A — ампер.
V — вольт.
Ω — ом.
W — ватт.
kW — киловатт.
kVA — киловольтампер.
PS — лошадиная сила.
kgm — килограммометр.
J — джоуль.
kWh — киловаттчас.
mkg — метркилограмм (для измерения моментов).
Wh/tkm — ваттчас на 1 тонну-километр.
°C — градус Цельсия.
H — генри.
F — фарада.
Hz — герц.

3903
Інститут інж. вер...
...відділ
ПОТЕКИ
ім...
новітньої

Отв. редактор *И. М. Хентов.* Техн. редактор *М. Ф. Клименко.*

Изд. № 289. Тираж 5 000. Сдано в пр-во с готовых матриц 1/XII 1936 г. Подп. в печать 4/XII 1936 г. Формат бумаги 82 × 111. Уч.-авт. л. 78,58. Бум. лист. 19⅝. Печ. зн. в бум. листе 146 000. Заказ № 2070. Ленгорлит № 11797. Выход в свет декабрь 1936 г.

3-я тип. ОНТИ им. Бухарина. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

ОПЕЧАТКИ

в книге Лебедева „Основы электрической тяги“

Стр.	*Строка*	*Напечатано*	*Должно быть*
55	30 св.	U_1	U'_1
66	7	E_2	$E_{2в}$
139	Рис. 165	$\leftarrow i_в$	$\rightarrow i_в$
239	Формулы 214 и 215	$(_e + S_t)r_2$	$(L_e + S_t)r_2$
264	15 сн.	Φ_{II}	Φ_{III}
304	7	*VII*	*VII'*
430	7	$2 \times 140 = 1680$	$12 \times 140 = 1680$
432	1 „	2,96	0,296
446	21	$S_{рес}$ и$S_{рес}$	$-S_{рес}$ и $S_{рес}$
495	8 „	90%	10%
519	формула 512	$(P_{вп} + P_{вк})l^2$	$(P_{вт} + P_{вк})\,l^2$

Заказ 2070.

НБ УДУНТ (ДІІТ)

Сканувала Сідорчик О.В., Покровська Т.В.

НБ
УДУНТ
(ДІТ)