

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ, МОЛОДЁЖИ И СПОРТА
УКРАИНЫ

Днепропетровский национальный университет железнодорожного
транспорта имени академика В. Лазаряна

На правах рукописи

КУЗНЕЦОВ ВАЛЕРИЙ ГЕННАДИЕВИЧ

УДК 661.331:621.311

**РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГИ ПОЕЗДОВ
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Специальность 05.22.09 – электротранспорт

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание научной степени доктора технических наук

Научный консультант:

СЫЧЕНКО Виктор Григорьевич

доктор технических наук, доцент

Днепропетровск - 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	8
РАЗДЕЛ 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГИ ПОЕЗДОВ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА ПОСТОЯННОГО ТОКА	22
1.1 Системный подход к моделированию систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока при формировании энергосберегающей политики	22
1.2 Особенности реализации энергосберегающих мероприятий на железнодорожном транспорте в современных условиях	35
1.3 Существующие подходы к управлению энергосбережением в Украине.	52
1.4 Методы энергосбережения в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока.	54
1.4.1 Методы энергосбережения на этапе проектирования систем тягового электроснабжения	54
1.4.2 Методы расчёта систем электроснабжения тяги поездов.	56
1.4.3 Методы энергосбережения за счёт применения рациональных режимов систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока.	58
1.4.4 Методы энергосбережения, основанные на нормировании расходов электроэнергии	72
1.5 Обоснование цели и постановка задачи исследования.	77
РАЗДЕЛ 2 МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГИ ПОЕЗДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА	80
2.1 Оценка потенциала энергосбережения	80

2.2 Методология оценки объёмов сокращения ТЭР в системе электроснабжения тяги поездов постоянного тока магистральных железных дорог 95

2.3 Графовая модель системы энергосберегающих мероприятий 100

2.4 Методика решения задачи выбора энергосберегающих мероприятий 103

Выводы к разделу 2 116

РАЗДЕЛ 3 МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ 118

3.1 Точность исходных данных при применении энергосберегающих технологий в системе электроснабжения тяги поездов 118

3.2 Модели тарифов за потреблённую электроэнергию 119

3.3 Модели надёжности переключающих устройств и трансформаторов 123

3.3.1 Анализ надёжности силового оборудования, задействованного в управлении режимами систем электроснабжения постоянного тока 123

3.3.2 Разработка структурно-логической схемы для оценки надёжности системы тягового электроснабжения в задачах регулирования режимов 134

3.4 Модель экономического ущерба от ненадёжности силового оборудования, участвующего в регулировании режимов системы тягового электроснабжения 140

3.5 Модель определения рациональных параметров контактной сети на этапе проектирования 147

Выводы к разделу 3 154

РАЗДЕЛ 4 РАЗВИТИЕ МЕТОДА РАСЧЁТА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГИ ПОЕЗДОВ НА ОСНОВЕ ПОТОКОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ 156

4.1 Систематизация требований к методу расчёта системы электроснабжения электрического транспорта 156

4.2 Модель потока поездов 160

4.3 Модернизированный метод расчёта систем электроснабжения тяги поездов, основанный на представлении потока поездов как потока восстановления 173

4.4 Модернизированный метод расчёта коэффициентов потерь мощности для измерения потерь электроэнергии 183

Выводы к разделу 4 194

РАЗДЕЛ 5 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГИ ПОЕЗДОВ 196

5.1 Метод определения рациональных режимов систем электроснабжения тяги поездов на основе адаптированного генетического алгоритма 196

5.1.1 Регулирующие возможности систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока 196

5.1.2 Генетический алгоритм для решения задачи определения рациональных режимов системы электроснабжения тяги поездов постоянного тока 214

5.2 Определение условий рациональной работы силовых трансформаторов тяговых подстанций 220

5.3 Научные основы энергооптимальной организации движения поездов 231

5.3.1 Особенности составления графиков поездов на электрифицированных линиях 231

5.3.2 Влияние дислокации поездов на потери мощности в контактной сети 241

Выводы к разделу 5 248

РАЗДЕЛ 6 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ 250

6.1 Повышение эффективности работы системы электроснабжения тяги поездов за счёт выбора энергосберегающих мероприятий на базе инвариантно-согласованного метода анализа иерархий (на примере Донецкой ж.д.) 250

6.2 Технология определения норм расхода электроэнергии для стационарных потребителей железных дорог 255

6.3 Технология нормирования расходов электроэнергии на собственные нужды тяговых подстанций, постов секционирования и пунктов параллельного соединения 270

6.4 Рекомендации по уменьшению небалансов электроэнергии в системах тягового электроснабжения постоянного тока. 278

6.5 Программный комплекс по определению рациональных режимов системы электроснабжения тяги поездов на основе адаптированного генетического алгоритма 283

Выводы к разделу 6 295

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ 298

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 302

ПРИЛОЖЕНИЕ А Пример результатов исследования параметров потока поездов на участке Синельниково – Чаплино Приднепровской ж.д. за декабрь 2010 г. 340

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Анализ небалансов электроэнергии 342

ПРИЛОЖЕНИЕ В Расчёт экономической эффективности применения энергосберегающих мероприятий на Донецкой железной дороге 347

ПРИЛОЖЕНИЕ Г Расчёт норм расхода электроэнергии на собственные нужды тяговой подстанции постоянного тока Зелёный Клин. 357

ПРИЛОЖЕНИЕ Д Генетический алгоритм. 365

ПРИЛОЖЕНИЕ Е Примеры определения расхода электроэнергии для стационарных потребителей. 379

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Акты внедрения диссертации 381

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АБ – автоблокировка

АВОР – автоматический ввод резерва

АСДУ – автоматизированная система диспетчерского управления

АСКУЭ – автоматизированная система контроля и учёта электроэнергии

АСУ ППЭ-У – автоматизированная система управления приобретением и потреблением электроэнергии с модулем управления перевозками

АСУЭ – автоматизированная система управления устройствами электроснабжения

ВД – вольтдобавочное устройство

ГА – генетический алгоритм

ГПТ – главный понижающий трансформатор

ЗРУ – закрытое распределительное устройство

ИС МАИ – инвариантно-согласованный метод анализа иерархий

КПД – коэффициент полезного действия

КС – контактная сеть

ЛПР – лицо, принимающее решение

ЛЭП – линия электропередач

МАИ – метод анализа иерархий

МЗ – межподстанционная зона

НИР – научно-исследовательская работа

НЭК – национальная энергетическая компания

НКРЭ – национальная комиссия регулирования электроэнергетики

ОПН – ограничитель перенапряжения

ОРЭ – оптовый рынок электроэнергии

ПВА – преобразовательно-выпрямительный агрегат

ПГ – парниковый газ

ПТ – преобразовательный (тяговый) трансформатор

ППС – пункт параллельного соединения

ПСК – пост секционирования

ПЭ – продольное электроснабжение

РЗиА – релейная защита и автоматика

РП – районная подстанция

РПН – устройство регулирования напряжения под нагрузкой

РРЦ – ремонтно-ревизионный участок

РУ – распределительное устройство

СН – собственные нужды

СТЭ – система тягового электроснабжения

СФ – сглаживающий фильтр

СЦБ – сигнализация, централизация и блокировка

ТМ – телемеханика

ТН – трансформатор напряжения

ТП – тяговая подстанция

ТРЭ – технологический расход электроэнергии

ТС – телесигнализация

ТТ – трансформатор тока

ТУ – телеуправление

ТЭР – топливно-энергетические ресурсы

ФТР – функция токораспределения

ШАУН – шкаф автоматического управления напряжением

ЦРП – центральный распределительный пункт

ЭДС – электродвижущая сила

ЭПС – электроподвижной состав

ЭС – экспертная система

ЭЧ - дистанция электроснабжения

ЭЧС – район электрических сетей

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития экономики Украины во всех отраслях промышленности и на транспорте внедряются рыночные отношения. В этих условиях железнодорожному транспорту необходимо изыскивать резервы снижения себестоимости перевозочного процесса, чтобы эффективно конкурировать с другими видами транспорта.

Необходимо отметить, что железные дороги работают рентабельно и в основном обеспечивают потребности общественного производства и населения в перевозках. Однако состояние производственно-технической базы и технологический уровень перевозок по многим параметрам не соответствуют европейским стандартам качества предоставления транспортных услуг и уже в ближайшее время могут стать тормозом для дальнейшего социально-экономического развития страны.

На развитие железнодорожного транспорта в Украине повлиял целый ряд негативных факторов [1], в частности:

- прогрессирующее старение основных фондов (около 80 %);
- отсутствие государственной поддержки инновационного развития отрасли и несовершенная законодательная база для привлечения инвестиций;
- низкий уровень тарифов на перевозку пассажиров и отсутствие действенных механизмов компенсации убытков при предоставлении общественных услуг, которое приводит к перекрестному субсидированию убыточных пассажирских перевозок за счет грузовых;
- опережающий рост цен на продукцию, которая потребляется железнодорожным транспортом, сравнительно с темпами изменения тарифов на перевозку.

Большое влияние на рентабельность перевозочного процесса оказывает динамика роста тарифов на энергоносители, и, в частности, на электроэнергию.

Нужно отметить, что работа по энергосбережению и по снижению расходов на электроэнергию, которая проводилась на Укрзализныце за всё время существования независимой Украины, позволила при значительном росте тарифов на электроэнергию на протяжении последних лет удерживать расходы на электроэнергию в общих расходах на перевозки практически на одном уровне.

Актуальность темы исследования. Энергосбережение на железнодорожном транспорте в условиях рыночной экономики является одним из приоритетов научно-технической политики Укрзализныци. Энергосбережение и рационализацию технологических процессов во всех службах и хозяйствах железнодорожного транспорта можно рассматривать как его главный внутренний резерв в ближайшей перспективе. Большой вклад в эффективное использование электроэнергии на железных дорогах внесла Программа энергосбережения на железнодорожном транспорте на 1996-2010 г. [2]. Около половины всех железных дорог Украины электрифицировано на постоянном токе, и потенциал энергосбережения участков постоянного тока далеко не исчерпан.

Повышение конкурентоспособности и экономичности работы железнодорожного транспорта Украины невозможно без решения ряда первоочередных проблем, среди которых [3]: обеспечение рациональной технологии перевозочного процесса по энергетическим, экономическим и экологическим критериям; развитие инфраструктуры железнодорожного транспорта для обеспечения скоростного движения; совершенствование подвижного состава; планирование потребления энергетических ресурсов; внедрение эффективных методов управления железнодорожным транспортом на всех уровнях производственного цикла. В этом перечне особенно выделяется проблема энергосбережения в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока. Это важная составляющая в общей проблеме рационализации перевозочного процесса. Применение ранних методов определения условий рациональных режимов систем тягового

электроснабжения, основанных на одноставочных тарифах за потреблённую электроэнергию и не учитывающих уровень надёжности регулировочных устройств в современных условиях либерализации рынка электроэнергии, уже не обеспечивает оптимальных решений. На сегодняшний день практически отсутствует теоретическая база для выбора мероприятий по энергосбережению на железнодорожном транспорте. Выбор энергоэффективных технологий производится без системного подхода. Поэтому назрела необходимость развития теоретических основ энергосбережения в системах тягового электроснабжения постоянного тока для обеспечения высокого уровня энергетической и экономической эффективности.

Проблема энергосбережения в системах электроснабжения тяги поездов магистральных железных дорог всегда находилась в поле зрения многих учёных. Значительный вклад в её решение внесли: П. Д. Андриенко, Б. А. Аржанников, М. П. Бадер, О. Л. Быкадоров, Б. М. Бородулин, А. Т. Бурков, Г. К. Гетьман, Ю. П. Гончаров, О. Л. Гуртовцев, В. Л. Григорьев, В. Т. Доманский, Ю. И. Жарков, Ю. С. Железко, И. П. Исаев, А. В. Котельников, Р. Р. Мамошин, К. Г. Марквардт, Г. Г. Марквардт, Р. И. Мирошниченко, А. Н. Митрофанов, В. Я. Овласюк, Н. В. Панасенко, В. Н. Пупынин, Е. П. Фигурнов, Н. В. Хворост, В. Т. Черемисин. Для решения задачи совершенствования управления энергоснабжением важными являются работы Д. А. Арзамасцева, Б. М. Бородулина, В. А. Веникова, С. И. Выпанасенко, Л. А. Германа, С. П. Денисюка, Б. Е. Дынькина, А. В. Праховника, В. С. Кохановича, а также других ученых.

Большая часть данных исследований [4-9] была проведена в эпоху планового развития экономики. Поэтому выбор энергосберегающих мероприятий, определение рациональных режимов систем электроснабжения магистральных железных дорог постоянного тока осуществлялись без учёта реалий сегодняшнего дня, когда в условиях рыночной экономики существуют различные варианты расчётов за потреблённую электроэнергию

(по одноставочным тарифам, дифференцированным тарифами или оптовым ценам за электроэнергию). Сегодня доля энергетической составляющей в тарифе за перевозки достигла 20 % [10], и с учётом мировых тенденций будет повышаться и далее. При принятии решений на первое место выходят не технические показатели, а экономические (например, стоимость потреблённой электроэнергии). При этом проблема энергосбережения носит комплексный, многоуровневый и многофакторный характер.

Таким образом, развитие теоретических основ энергосбережения, которые позволяют находить эффективные решения многокритериальных задач, возникающих при эксплуатации систем тягового электроснабжения постоянного тока, в настоящее время имеет большое значение для железнодорожного транспорта Украины и является актуальной научной проблемой.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертационная работа выполнена в соответствии со следующими государственными программами и научно-исследовательскими работами по заданию Укрзаліззниці:

- Энергетическая стратегия Украины на период до 2030 г., утверждённая Постановлением Кабинета Министров Украины от 15.03.2006 г. № 145;
- Государственная целевая экономическая программа энергоэффективности и развития сферы производства энергоносителей из возобновляемых источников энергии и альтернативных видов топлива на 2010-2015 годы, утверждённая Постановлением Кабинета Министров Украины от 1 марта 2010 № 243 с изменениями, утверждёнными Постановлением Кабинета Министров от 27.04.2011 №447 и от 25.01.2012 № 105.
- Постановление Кабинета Министров Украины от 23.04.1999 г. № 661 «О мероприятиях государственной поддержки железнодорожного транспорта»;

– Программа энергосбережения на железнодорожном транспорте Украины на период 1996-2010 годы, принятая решением научно-технического совета Укрзалізничці от 26.06.1996 г.;

Научно-исследовательские работы, в которых автор был научным руководителем. «Оптимизация расходов Донецкой железной дороги при закупке электроэнергии на тягу поездов с разработкой рекомендаций» (№ ГР 0111 U003607), «Исследование сверхнормативных небалансов учёта электроэнергии на тяговых подстанциях Донецкой железной дороги для тяговой подстанции Штеровка и разработка рекомендаций по их приведению к нормативным требованиям» (№ ГР 0111U003607), «Инструкция по нормированию расходов электроэнергии на собственные нужды подстанций 6-220 кВ и распределительных пунктов 6-10 кВ железных дорог Украины» (№ ГР 0108U008042).

Личный вклад автора в этих работах состоит в выборе направлений теоретических и экспериментальных исследований, постановке и решении поставленных задач и доведении их до практической реализации.

Научно-исследовательские работы, в которых автор был соисполнителем отчётов. «Интеллектуальные задачи и алгоритмы для управления устройствами электроснабжения электрифицированных железных дорог», (№ ГР 0199U001432), «Повышение энергетической эффективности и экономичности работы электротяговых систем» (№ ГР 0103U005112), «Разработка технологии энергооптимального управления устройствами электроснабжения электрифицированных участков железных дорог» (№ ГР 0101U002583), «Разработка концепции энергетической стратегии Укрзалізничці на период до 2010 г. и на перспективу до 2020 г.» (№ ГР 0106U005700), «Повышение надёжности устройств контактной сети железных дорог» (№ ГР 0107U002523), «Разработка научных основ рациональных режимов системы тягового электроснабжения» (№ ГР 0110U000897), «Исследование показателей

качества электроэнергии на вводах и фидерах тяговых подстанций постоянного тока и разработка рекомендаций» (№ ГР 0107U010377).

Целью данной диссертационной работы является развитие теоретических основ энергосбережения в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока для повышения их энергетической и экономической эффективности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить комплексный анализ состояния систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока по вопросам энергосбережения.
2. Разработать метод расчёта потенциала энергосбережения в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока с учётом системного эффекта.
3. Разработать математические модели надёжности силового оборудования, экономического ущерба от возможных отказов для задач регулирования режимов систем электроснабжения железных дорог постоянного тока.
4. Разработать математические модели надёжности силового оборудования, экономического ущерба от возможных отказов для задач регулирования режимов систем электроснабжения железных дорог постоянного тока.
5. Усовершенствовать метод расчёта систем электроснабжения тяги поездов в части дополнения его выражениями для расчёта потерь мощности в элементах тяговых подстанций.
6. Выбрать и научно обосновать метод решения задачи определения рациональных режимов систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока.
7. Усовершенствовать методы определения норм расхода электроэнергии на нужды стационарных потребителей в части разработки регрессионных зависимостей для их расчёта.

8. Разработать системные научно обоснованные подходы к определению норм расхода электроэнергии на собственные нужды тяговых подстанций, постов секционирования и пунктов параллельного соединения.

Объект исследования – процессы передачи, преобразования и потребления электроэнергии в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока.

Предмет исследования – система электроснабжения тяги поездов постоянного тока.

Методы исследования. Основные теоретические положения диссертации получены с помощью методов системного анализа (при определении потенциала энергосбережения), анализа иерархий (при выборе энергосберегающих мероприятий), генетических алгоритмов (при определении условий обеспечения рациональных режимов систем тягового электроснабжения), структурно-логического анализа надежности (при определении показателей надежности систем тягового электроснабжения), регрессионного анализа (при создании методологии определения норм расхода электроэнергии для стационарных потребителей). Также использованы методы исследования экспериментальных данных и математической статистики (при исследовании результатов измерений расхода электроэнергии на разных присоединениях тяговых подстанций, напряжений на шинах, небалансов электроэнергии).

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, которые защищаются. Основные научные положения, выводы и рекомендации, содержащиеся в диссертации, достаточно обоснованные и достоверны, поскольку:

- экспериментальные исследования корректно поставлены и квалифицированно выполнены, а расхождение теоретических расчетов и опытных данных не превышает 4-5%;

– теоретические расчеты выполнены на ПЭВМ с погрешностью $\sim 10^{-6}$, а экспериментальные результаты получены на основе большого объема реального фактического материала с последующей обработкой методами математической статистики;

– значительная часть экспериментальных данных получена различными независимыми методами.

Научная новизна полученных результатов. Основные научные результаты, полученные автором лично и выносимые на защиту, следующие:

1. Впервые предложен научно обоснованный метод определения потенциала энергосбережения в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока с учетом системного эффекта, что дает возможность более полно определять резервы экономии электроэнергии.

2. На основе усовершенствованного метода анализа иерархий впервые предложены научные принципы выбора энергосберегающих мероприятий в системах тягового электроснабжения, что позволяет системно подходить к их выбору.

3. На основе структурного анализа впервые предложена модель надежности системы электроснабжения тяги поездов постоянного тока для задач управления режимами, позволяющая определять величину суммарного параметра потока отказов при осуществлении операций регулирования режимов.

4. Впервые предложены научные подходы к определению экономического ущерба от возможных отказов при регулировании режимов системы тягового электроснабжения, что позволяет комплексно подходить к вопросам регулирования режимов.

5. Впервые с помощью адаптированного генетического алгоритма получено решение комплексной задачи определения рациональных режимов систем тягового электроснабжения постоянного тока, что обеспечивает учет переменных тарифов за потребленную электроэнергию и экономического

ущерба от возможных отказов силового оборудования при регулировании режимов.

6. Получил дальнейшее развитие метод расчета систем тягового электроснабжения на основе потоков восстановления, который в отличие от существующего метода позволяет определять потери мощности в элементах тяговых подстанций. Это дает возможность определять условия обеспечения рациональных режимов.

7. Получил дальнейшее развитие метод определения норм расхода электроэнергии на нужды стационарных потребителей в части построения регрессионных зависимостей для определения удельных норм, что дает возможность научно обоснованно планировать объемы потребления электроэнергии железнодорожными предприятиями.

Полученные в диссертационной работе результаты по повышению энергетической и экономической эффективности систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока имеют существенное значение для электрифицированных железных дорог Украины.

Практическая значимость полученных результатов состоит в следующем:

1. Определена величина потенциала энергосбережения в системах тягового электроснабжения постоянного тока с учетом системного эффекта, которая может быть использована для стимулирования энергосбережения в дистанциях электроснабжения и для привлечения инвестиций на энергосберегающие мероприятия.

2. На основе предложенного инвариантно-согласованного метода анализа иерархий сформированы научные принципы выбора энергосберегающих мероприятий. Получен экономический эффект около 3 млн. грн. на электрифицированном участке Донецкой железной дороги.

3. Созданный программный комплекс позволяет определять рациональные режимы системы тягового электроснабжения постоянного

тока с учетом переменных в течение суток тарифов на электроэнергию и уровня надежности силового оборудования.

4. Применение условий рационального перевода на параллельную работу силовых трансформаторов, преобразователей; рациональных уровней напряжений на шинах тяговых подстанций, полученных на основе адаптированного генетического алгоритма, позволяет уменьшить величину технологического расхода электроэнергии на покрытие потерь в элементах системы электроснабжения на 3-5%.

5. Разработан метод определения норм расхода электроэнергии на нужды стационарных потребителей, учитывающий специфику потребления электроэнергии в различных хозяйствах железнодорожного транспорта. Это дает возможность более точно планировать расходы электроэнергии на расчетный период. Этот метод положен в основу методических рекомендаций ЦЕ-0015, утвержденных Приказом Укрзализныци № 545-Ц от 28.12.2006 г.

6. На основе разработанных научных принципов определения норм расхода электроэнергии на собственные нужды тяговых подстанций постоянного тока, постов секционирования и пунктов параллельного соединения разработана инструкция по нормированию расхода электроэнергии на собственные нужды тяговых подстанций 6-220 кВ и распределительных пунктов 6-10 кВ железных дорог Украины ЦЕ-0018, утвержденная Приказом Укрзализныци № 526-Ц от 08.11.2007 г.

7. Полученные результаты исследования влияния параметров потоков поездов на энергетическую эффективность систем тягового электроснабжения позволяют составлять энергоэффективные графики движения поездов для обеспечения минимума потерь электроэнергии. За счет данного мероприятия можно сократить потери в тяговой сети на 3 - 4% в зависимости от схемы питания контактной сети.

8. Разработаны рекомендации по уменьшению небалансов электроэнергии в системах учета электроэнергии, которые позволят, с одной

стороны, правильно учитывать небалансы в расчетах потерь электроэнергии, а с другой - обеспечить выполнение требований при расчетах с лицензиатами.

Результаты диссертационной работы внедрены на Донецкой, Львовской железных дорогах, в Главном управлении электрификации и электроснабжения Укрзализныци и в Институте железнодорожного транспорта (при выполнении научно-исследовательских работ), г. Варшава, Польша. Основные теоретические положения диссертации используются в учебном процессе Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна для студентов пятого курса специальности 7(8).05070103 «Электротехнические системы электропотребления» при изучении курса «Энергосбережение».

Личный вклад соискателя. Автор вместе с научным консультантом сформулировал цель, задачи исследований. Основные научные положения, результаты теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы получены автором самостоятельно. Кроме того, в публикациях, в которых отображены основные результаты диссертации и которые написаны в соавторстве, соискателю принадлежат: [12] – постановка задачи, проведение расчётов, статистический анализ удельных потерь электроэнергии на рассматриваемом участке в пакете Crystall Ball; [13, 14] – постановка задачи, проведение расчётов; [15] – анализ факторов, проведение расчётов; [16] – постановка задачи, идея работы; [17] – определение показателей надёжности; [18] – постановка задачи, составление структурно-логической схемы для расчёта показателей надёжности; [19] – разработка методов определения норм затрат электроэнергии на собственные нужды тяговых подстанций постоянного тока, учитывающих специфику тягового электроснабжения; [20] – разработка методов определения норм расхода электроэнергии на собственные нужды для постов секционирования и пунктов параллельного соединения постоянного тока; [21] – обработка экспериментальных данных; [22-26] – постановка задачи, проведение расчётов; [27] – статистический анализ показателей транспортного потока на

выбранном участке; [28, 29] - исследование показателей неравномерности транспортного потока, определение потенциала энергосбережения в системе тягового электроснабжения за счёт управления потоком поездов; [30] – разделы 1-7; [31] - постановка эксперимента, анализ данных и разработка рекомендаций по пропуску сдвоенных поездов; [3]-концепция энергосбережения в системах тягового электроснабжения железных дорог; [32]- разработка рекомендаций по энергосбережению на участках с горным профилем; [33] - постановка задачи, проведение расчётов; [34] - поставлена и решена задача регулирования напряжений на шинах тяговых подстанций Донецкой ж.д. с учётом надёжности коммутационного оборудования и переменной стоимости электроэнергии; [35, 36] - создание модели для определения влияния регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций на потенциал рельсов; [37] - анализ проблемы определения потерь электроэнергии в тяговой сети; [38-40] - постановка задачи, руководство проведением эксперимента, разработка рекомендаций по уменьшению небалансов электроэнергии; [41-43] – постановка задачи, анализ условных потерь электроэнергии в контактной сети; [44] –постановка задачи, методология определения показателей потока поездов, которые ограничивают пропускную способность участка по условиям электроснабжения, [45] – постановка задачи, алгоритм получения согласованных мнений экспертов, [46] – постановка задачи, разработка рекомендаций по уменьшению потерь мощности за счёт изменения дислокации поездов, [47] – анализ влияния неравномерности транспортного потока на потери электроэнергии в тяговой сети, регрессионное уравнение, [48] – методологические подходы к определению потенциала энергосбережения в системах электроснабжения тяги поездов, классификация потенциала; [49] - научные принципы оценки эффективности энергосберегающих мероприятий; [50] - анализ проблем использования прогрессивных вариантов закупки электроэнергии на Львовской железной дороге; [51] – методология расчётов рациональных режимов систем тягового

электроснабжения на основе генетических алгоритмов; [52] – постановка задачи, идея работы; [53] - модель выбора энергосберегающих мероприятий, [54]-постановка задачи, проведение расчётов. Работы [11, 55-73] написаны автором без соавторов.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы докладывались и обговаривались на 1-й Международной научно-практической конференции «Научный потенциал мира 2004», г. Днепропетровск, 2004; 66-й международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта», г. Днепропетровск, 2006; 2-й научно-практической международной конференции «Внедрение наукоёмких технологий на магистральном и промышленном железнодорожном транспорте», г. Алушта, 2006; на Международной научной конференции «Проблемы экономики транспорта», г. Днепропетровск, 2007; на Международной научно-практической конференции «Транспортные связи. Проблемы и перспективы», г. Днепропетровск, 2008; международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: образование, наука, производство», г. Ростов- на-Дону, 2009; Международной научной конференции «Трансбалтика», Вильнюс, 2009; 1-5-й Международной научно-практической конференции «Электрификация железнодорожного транспорта Трансэлектро», пгт Мисхор, 2007-2011; 1-3-й Международной научно-практической конференции «Энергосбережение на железнодорожном транспорте», пгт Воловец 2010-2012; 4, 5-й Международной научно-практической конференции «Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте», пгт. Чинадиево, 2011, 2012; научно-практической конференции «Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании», г. Днепропетровск, 2011; 2-й Международной научно-технической конференции «Интеллектуальные энергетические системы - IEC (ESS'11)», г. Свалява, 2011.

В полном объёме диссертационная работа докладывалась на:

- научном семинаре кафедры «Электроснабжение железных дорог» ДИИТа, март 2012 г.
- научном семинаре в Институте железнодорожного транспорта, г. Варшава, Польша, март 2012 г.
- межкафедральном семинаре Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, апрель 2012 г.

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 59 научных трудах, в том числе: 1 монография, 29 статей в специализированных научных изданиях, 3 статьи в научных журналах, 1 патент на полезную модель, 1 учебное пособие, 24 тезисов докладов в материалах конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, шести разделов, выводов, списка использованной литературы и семи приложений. Основной текст работы изложен на 301 страницах. Диссертация содержит 95 рисунков и 54 таблицы; таблицы и рисунки, размещённые на отдельных страницах, занимают 15 страниц. Полный объём диссертации 390 страниц.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГИ ПОЕЗДОВ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Системный подход к моделированию систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока при формировании энергосберегающей политики

Магистральные железные дороги Украины являются достаточно крупным потребителем ТЭР. В общем энергобалансе Украины Укрзалізниця занимает 4-е место. 48 % железнодорожных линий электрифицировано на постоянном токе, а 52 % - на переменном токе. В 2010 году собственное потребление электроэнергии железных дорог Украины составило 5 739,1 млн. кВт·ч. Тяговыми подстанциями и районами электроснабжения железных дорог переработано 12 728,5 млн. кВт·ч. Переработка электроэнергии электросетями железных дорог сторонним железнодорожному транспорту потребителям составила 780,4 млн.кВт·ч.

На железных дорогах Украины электроэнергия поставляется с ОРЭ, от независимых поставщиков электроэнергии и от поставщиков электроэнергии по регулируемому тарифу (рис. 1.1) [74].

Электрическая энергия подаётся в систему тягового электроснабжения через тяговые подстанции (ЭЧЭ), центральные распределительные пункты (ЦРП), трансформаторные подстанции. В некоторых случаях отраслевые предприятия могут получать электроэнергию от трансформаторных подстанций низкого напряжения, которые принадлежат другим промышленным предприятиям или энергопередающим компаниям.

Тяговые подстанции обеспечивают электроэнергией тягу поездов и нетяговых потребителей. Нетяговые потребители (локомотивные и вагонные депо, пункты технического обслуживания и т.д.) обеспечивают эксплуатационную и подсобно-вспомогательную деятельность.

Системы электроснабжения тяги поездов получают электрическую энергию от системы внешнего электроснабжения. СТЭ состоит из подстанций, контактной сети, рельсовых цепей, питающих и отсасывающих фидеров и других линий.

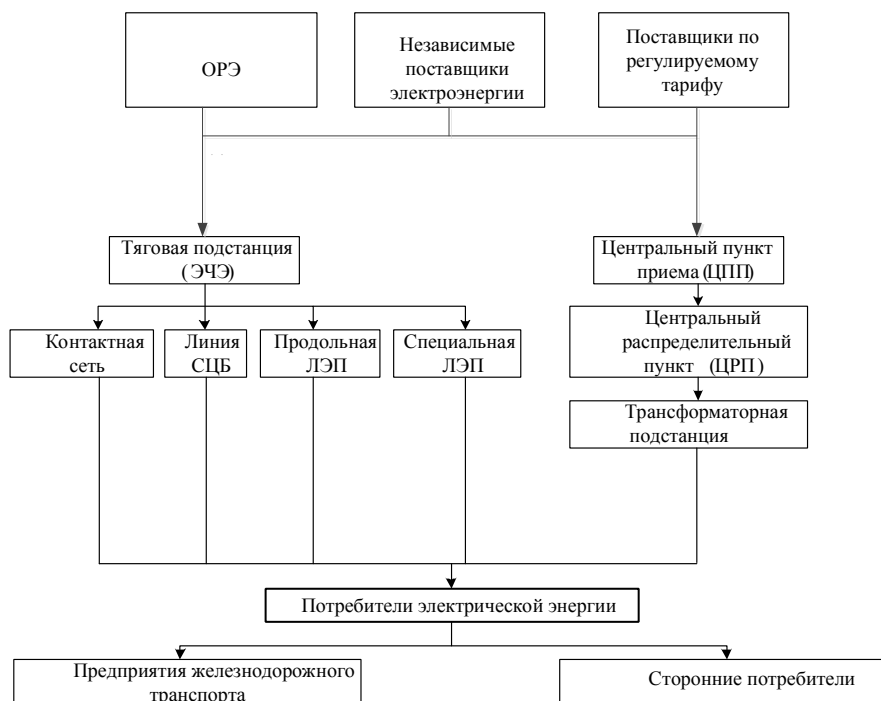


Рисунок 1.1- Электроснабжение железной дороги

Системы тягового электроснабжения питают потребителей железнодорожного транспорта и сторонних потребителей. Структура потребления электроэнергии приведена на рис. 1.2.

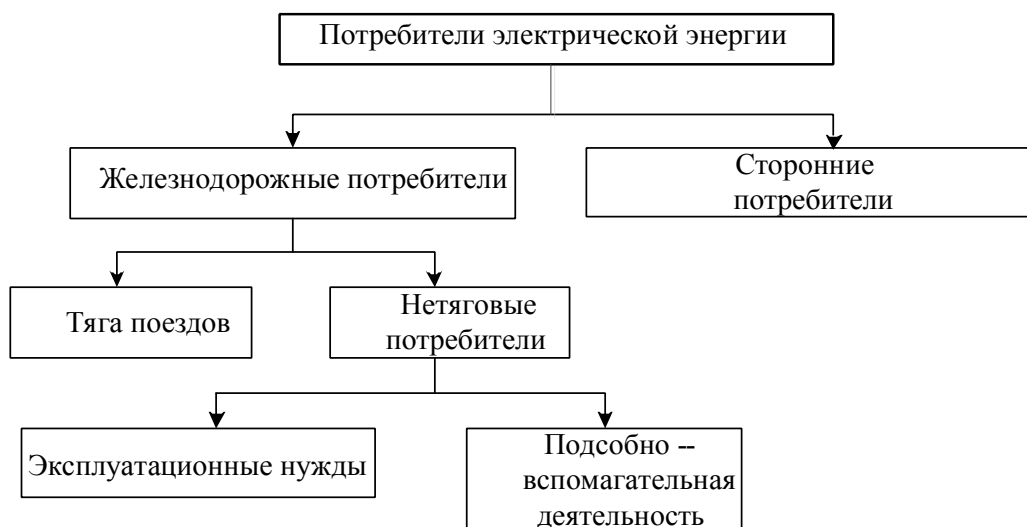


Рисунок 1.2 – Потребление электрической энергии на железной дороге

Железные дороги в Украине получают электроэнергию по линиям 35, 110, 220 кВ. Система тягового электроснабжения может быть как постоянного, так и переменного тока.

Упрощённая схема СТЭ постоянного тока приведена на рис. 1.3 [75]. К шинам 10 кВ подключают преобразовательный агрегат.

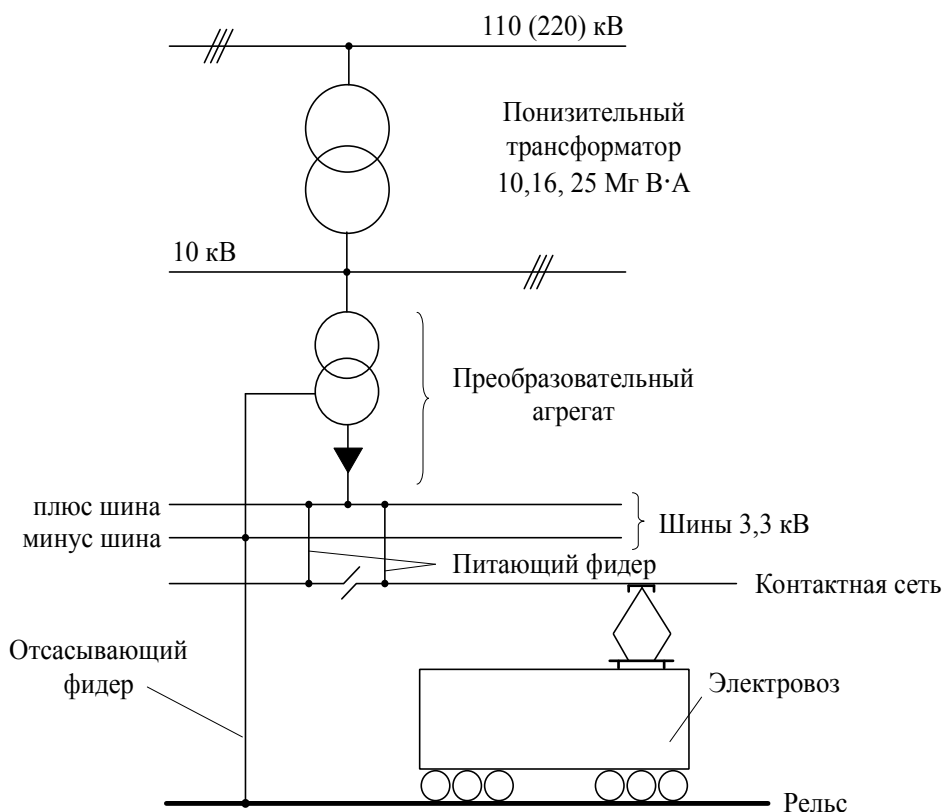
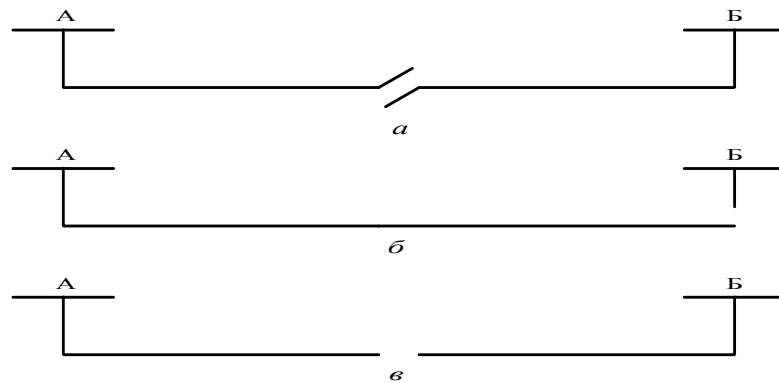


Рисунок 1.3 - Принципиальная схема СТЭ постоянного тока

На сегодняшний день существуют централизованные и распределённые схемы питания тяги поездов. В централизованных схемах предусматривают на тяговой подстанции не менее двух преобразовательных агрегатов. При распределённом питании все подстанции имеют по одному агрегату. При этом сокращается расстояние между подстанциями. В настоящий момент в Украине протяжённость железных дорог, электрифицированных по системе постоянного тока составляет более 4 700 км.

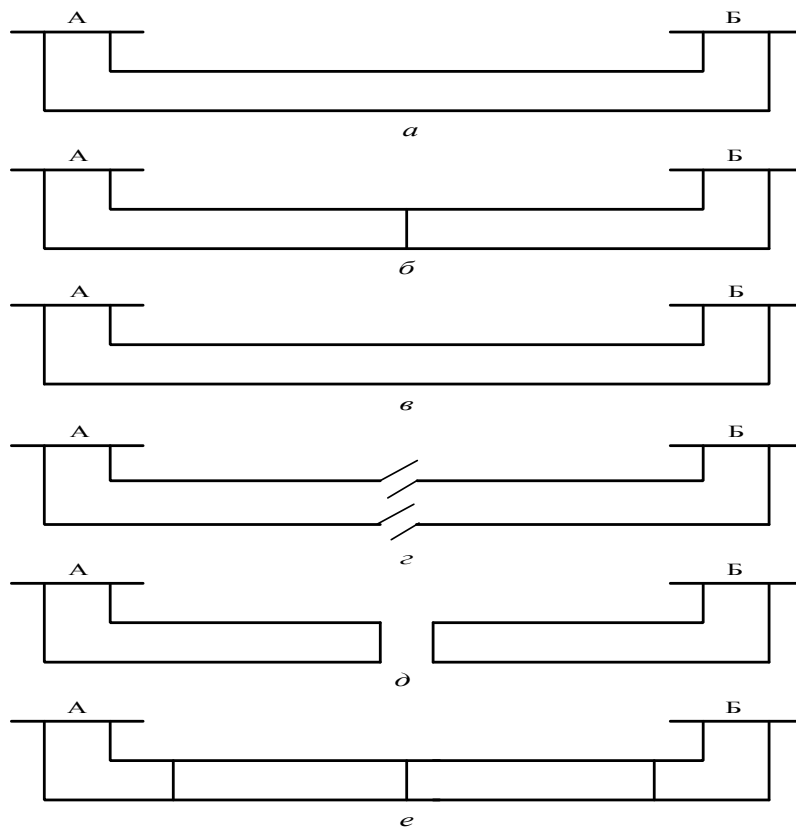
В эксплуатационной практике возможны различные схемы питания контактной сети (рис. 1.4, 1.5). На однопутных участках применяются отдельные, консольные и встречно-консольные схемы питания, на двухпутных - отдельная, узловая, параллельная, встречно-консольная, встречно-кольцевая схемы.

Выбор схемы питания тяги поездов проводят по критериям надёжности и экономичности.



а - раздельная схема, *б* - консольная, *в* – встречно-консольная

Рисунок 1.4 - Схемы питания однопутного участка контактной сети



а-раздельная , *б*-узловая, *в* – консольная, *г*-встречно-консольная,
д- встречно-кольцевая, *е* – параллельная

Рисунок 1.5 - Схемы питания контактной сети двухпутного участка

На железных дорогах Украины параллельная схема питания контактной сети является самой распространённой.

Математическая модель работы системы электроснабжения тяги поездов постоянного тока состоит из следующих элементов:

- схема замещения СТЭ (рис. 1.6);
- способ представления нагрузок ЭПС;
- аналитические выражения, которые связывают электрические параметры СТЭ.

Сопротивления рельсовой сети не указано, т.к. оно при регулировании режимов не изменяется.

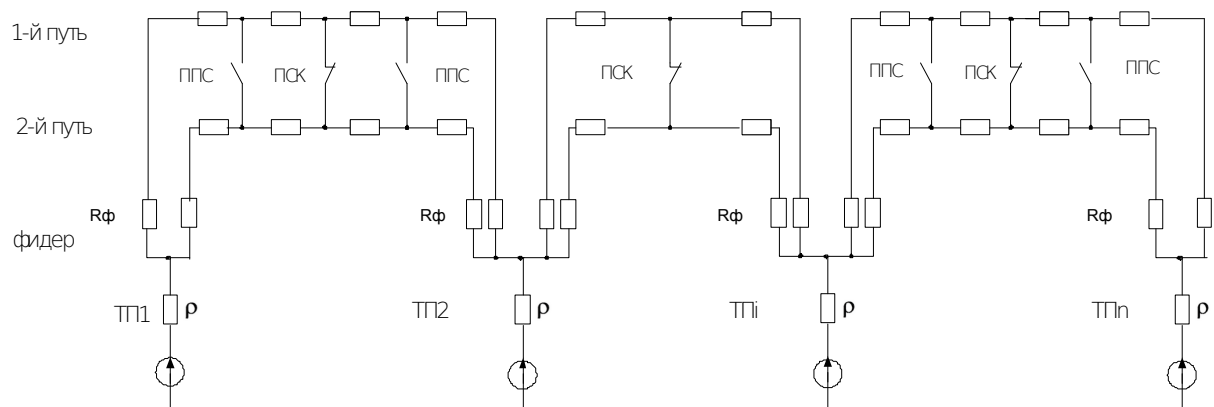


Рисунок 1.6 - Схема замещения электрифицированного участка постоянного тока

Представленная на рис. 1.6 схема замещения [47] учитывает связь межподстанционных зон и наличие на каждой из них ПСК или ППС. Тяговые подстанции представлены в виде источников ЭДС и внутренних сопротивлений ρ . Сопротивление питающих фидеров - с помощью сопротивлений $R_{\text{ф}}$. Величина ЭДС тяговых подстанций принимается равной напряжениям холостого хода (последние определяются по известным внешним характеристикам тяговых подстанций). Контактная сеть представлена в схеме замещения активными сопротивлениями. Нагрузки ЭПС задаются в виде источников тока. Внутренние сопротивления тяговых подстанций могут быть получены аналитическим путём по параметрам силового оборудования. Сделаем допущение, что контактная подвеска является линейным элементом. С учётом этого можно применить принцип суперпозиции – нагрузка от нескольких поездов может быть представлена как сумма нагрузок отдельных поездов.

Для задания способа загрузки СТЭ разобьём электрифицированный участок длиной L на M отрезков, на которых вероятность появления двух и более поездов равна нулю. На каждом таком отрезке поезд может находиться с безусловной вероятностью $p_1(i)$. Если на i -м отрезке тяговой сети находится поезд, то на j -м участке тяговой сети поезд будет находиться с условной вероятностью $p_1^*(i, j)$. Ток ЭПС будет зависеть от номера элементарного отрезка. Кроме того, на каждом элементарном отрезке поезд может находиться или отсутствовать. Исходя из этих рассуждений ток поезда можно представить в виде функции времени $I_n(i, t)$. Распределение тока поезда, находящегося на i -м отрезке, на других отрезках тяговой сети в данной диссертационной работе рассчитывается через функцию токораспределения $\psi(s, i)$, которая определяет долю тока от поезда, находящегося на i -м отрезке, которая проходит через сечение контактной сети S .

В тяговой сети могут протекать уравнительные токи [76], вызванные поездной ситуацией или неравенством напряжений на шинах тяговых подстанций. Для учёта в модели СТЭ протекания уравнительных токов введём функцию $\alpha(s, j)$, определяющую величину уравнительного тока в сечении S , который вызван j -й ТП.

Разделение потерь на составляющие в рассматриваемой модели СТЭ может проводиться по различным критериям - характеру потерь (постоянные, переменные), классам напряжения, группам элементов, производственным подразделениям и т.д. [77]. Для применения энергосберегающих технологий на железнодорожном транспорте целесообразно использовать укрупнённую структуру потерь электроэнергии (рис. 1.7), в которой потери разделены на составляющие, исходя из их физической природы и специфики методов определения их количественных значений.

Исходя из этого критерия фактические потери могут быть определены

следующим образом

$$\Delta W_{\phi} = \Delta W_T + W_{\text{сн}} + \Delta W_{\text{нб}} + \Delta W_{\text{ком}} + \Delta W_{\text{доп}}, \quad (1.1)$$

где ΔW_T - технические потери электроэнергии, которые появляются вследствие физических процессов при передаче электроэнергии по электрическим сетям. Часть электроэнергии при передаче преобразуется в тепло;

$W_{\text{сн}}$ - расход электроэнергии (потери) на собственные нужды подстанций, необходимые для работы основного силового оборудования подстанций и обеспечения работы персонала;

$\Delta W_{\text{нб}}$ - небалансы электроэнергии, обусловленные инструментальными погрешностями ее измерения;

$\Delta W_{\text{ком}}$ - коммерческие потери электроэнергии, обусловленные хищениями электроэнергии, несоответствием показаний счетчиков оплаты за электроэнергию бытовыми потребителями и другими причинами в сфере организации контроля за потреблением энергии. Коммерческие потери не имеют самостоятельного математического описания и, как следствие, не могут быть рассчитаны автономно. Их значение определяется как разница между фактическими (отчетными) потерями и суммой первых трех составляющих;

$\Delta W_{\text{доп}}$ - дополнительные потери электроэнергии, которые вызваны отклонением показателей качества электроэнергии от нормативных значений.

На железнодорожном транспорте выделяют и условные потери электроэнергии – это специфический вид потерь электроэнергии, вызванный несовершенством системы учёта электроэнергии на железнодорожном транспорте [78]. Это разница между расходом электроэнергии на тягу поездов, измеренному по счётчикам, установленным на локомотивах, и расходом электроэнергии на тягу по счётчикам, установленным на тяговых подстанциях [41-43, 79].



Рисунок 1.7 - Структура отчётных потерь электроэнергии

Три первые составляющие укрупненной структуры потерь (ΔW_T , $W_{сн}$, $\Delta W_{нб}$) обусловлены технологическими потребностями процесса передачи электроэнергии по сетям. Сумма этих составляющих хорошо описывается термином технологические потери. Четвертая составляющая, коммерческие потери, представляет собой влияние «человеческого фактора» и включает в себя все его проявления: сознательные хищения электроэнергии некоторыми абонентами посредством изменения показаний счетчиков; потребление энергии, минуя счетчики; неуплата или неполная оплата показаний счетчиков; определение поступления и отпуска электроэнергии по некоторым точкам учета расчетным путем (при несовпадении границ балансовой принадлежности сетей и мест установки приборов учета) и т.п.

Технологические потери можно разделить на поэлементные составляющие. На тяговых подстанциях железных дорог потребители

собственных нужд состоят из 23 типов электроприемников [19]. Погрешности учета включают составляющие, обусловленные измерительными трансформаторами тока, напряжения и электрическими счетчиками. Коммерческие потери также могут быть разделены на многочисленные составляющие, отличающиеся причинами их возникновения. Расход электроэнергии на собственные нужды тяговых подстанций учитывается в отчетности в составе технических потерь, а потери, обусловленные погрешностями системы учета электроэнергии, - в составе коммерческих потерь. Это является недостатком существующей системы отчетности, так как не обеспечивает ясного представления о структуре потерь и целесообразных направлений работ по их снижению.

Критерии отнесения части электроэнергии к потерям могут быть физическими и экономическими [77]. Расход на собственные нужды подстанций по характеру использования электроэнергии действительно ничем не отличается от ее использования потребителями. Однако нет оснований считать ее полезным отпуском, под которым понимают электроэнергию, отпущенную потребителям, а расход электроэнергии на собственные нужды подстанций является внутренним потреблением объекта. Кроме того, при таком обосновании как аксиома предполагается, что расход части энергии в элементах сетей на доставку другой ее части потребителям, в отличие от расхода на собственные нужды подстанций, не является полезным.

Сумму технологических потерь, расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций и коммерческих потерь (хищений) целый ряд специалистов называют физическими потерями электроэнергии [77, 80]. Эти составляющие действительно связаны с физикой распределения энергии по сети. При этом первые две составляющие относятся к технологии передачи электроэнергии по сетям, а третья - к технологии контроля количества передаваемой электроэнергии.

Как показано на рис. 1.7, в отчётных потерях электроэнергии присутствует небаланс электроэнергии. При эксплуатации систем электроснабжения очень важно добиваться уменьшения небалансов до уровня допустимых величин. Основные теоретические причины возникновения небалансов электроэнергии достаточно хорошо освещены в научной литературе [38, 39, 77, 80-84]. Как известно, небаланс электроэнергии определяется разницей между объёмом отпущенной энергии, энергии которую получили потребители (по показаниям счетчиков) и расчетными потерями. Многочисленные публикации о методологии расчета и нормирования потерь, обусловленных погрешностями приборов учета электроэнергии, подтверждают, что реальные ситуации электропотребления соответствуют недоучету энергии [82, 84, 85].

Как известно, типичный измерительный комплекс учета электроэнергии состоит из измерительных трансформаторов тока, напряжения, счетчика и соединительных проводов. Пределы допустимых погрешностей такого комплекса определяются по формуле [77]

$$\delta = \pm 1,1 \sqrt{\delta_I^2 + \delta_U^2 + \delta_L^2 + \delta_C^2 + \delta_\theta^2 + \delta_{\phi_x}^2}, \quad (1.2)$$

где $\delta_I, \delta_U, \delta_C$ - относительные погрешности измерительных трансформаторов тока, напряжения и счетчика соответственно;

δ_L - потеря напряжения во вторичной цепи ТН;

δ_θ - относительная погрешность, выделенная из измеренного полного тока, его активной составляющей, обусловленной угловыми погрешностями трансформатора тока и напряжения;

δ_{ϕ_x} - суммарная дополнительная погрешность, вызванная следующими факторами - отклонениями напряжения, частоты, температуры окружающего воздуха, магнитного поля и другими факторами от нормальных значений, при которых гарантируется нахождение погрешности внутри диапазона, соответствующего класса точности;

1,1 - коэффициент, учитывающий особенности метрологической поверки приборов с помощью эталонных устройств, имеющих свои погрешности и другие причины.

При определении структуры потерь для организации в целом невозможно ориентироваться на наличие таких данных для сотен и тысяч точек учета и приходится использовать усредненную оценку их возможных погрешностей.

При определении допустимых погрешностей измерительного комплекса по формуле (1.2) относительные погрешности приборов обычно принимают равными классам их точности, а они определяют предельные значения погрешностей только в зонах нагрузок, близких к номинальным. Запись в виде среднеквадратичного значения и знак $\pm$ говорят о том, что определяется значение случайной (симметричной) погрешности.

Погрешности ТН нормируются согласно ГОСТ 1983. Допустимые погрешности ТТ в соответствии с ГОСТ 7746 нормируются в трех точках, соответствующих токовой загрузке ТТ 100, 20 и 5 %. Погрешности ТТ классов точности 0,5 и 1,0 в этих точках не должны выходить за пределы $\pm K_{\text{ТТ}}$; $\pm 1,57 K_{\text{ТТ}}$ и $\pm 3,0 K_{\text{ТТ}}$, где $K_{\text{ТТ}}$ - класс точности ТТ. Это означает, что фактическая погрешность ТТ при малых нагрузках может быть в 1,5-3 раза больше класса точности.

Для ТТ класса точности 0,2 соответствующие точки имеют уровни $\pm K_{\text{ТТ}}$; $\pm 1,75 K_{\text{ТТ}}$ и $\pm 3,75 K_{\text{ТТ}}$. Зависимости погрешностей ТТ, как и других аналоговых приборов, описываются кривой *A* на рис. 1.8, однако в большинстве документов эти точки соединяются прямыми линиями и поле погрешностей отражается симметричным растробом [77].

В реальных условиях токовые нагрузки ТТ существенно ниже номинальных даже при максимуме нагрузки. Это объясняется тем, что выбор номинальных параметров оборудования осуществлялся в предположении роста нагрузок, а в действительности из-за падения объемов перевозной работы нагрузки значительно уменьшились.

Зависимости систематической $\Delta_{\text{ТТ}}$ и случайной $\delta_{\text{ТТ}}$ токовых погрешностей ТТ от коэффициента его токовой загрузки $\beta_{\text{ТТ}}$ и класса точности $K_{\text{ТТ}}$ согласно рис. 1.8 приведены в табл. 1.1 [77].

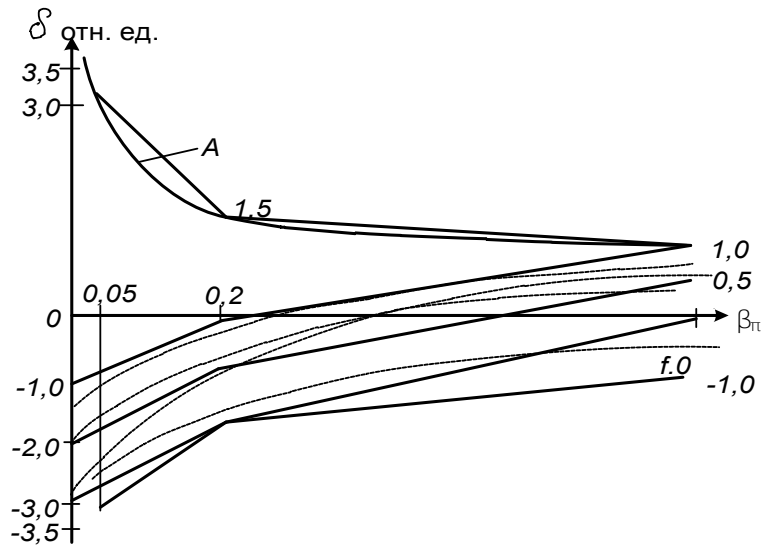


Рисунок 1.8 - Поле допустимых токовых погрешностей ТТ по ГОСТ-7746
и рабочая область нагрузочных характеристик

Таблица 1.1 - Зависимости токовых погрешностей ТТ от коэффициента
токовой загрузки и класса точности

Вид погрешности, %	Зависимости погрешностей ТТ в диапазоне значений $\beta_{\text{ТТ}}$	
	0,05 – 0,2	0,2 – 1,0
$\Delta_{\text{ТТ}}$	$(- 2,0 + 6,25 \cdot \beta_{\text{ТТ}})K_{\text{ТТ}}$	$(- 1,06 + 1,56 \cdot \beta_{\text{ТТ}})K_{\text{ТТ}}$
$\delta_{\text{ТТ}}$	$\pm(1,0 - 1,25 \cdot \beta_{\text{ТТ}})K_{\text{ТТ}}$	$\pm(0,81 - 0,31 \cdot \beta_{\text{ТТ}})K_{\text{ТТ}}$

Как известно, погрешность ТТ зависит не только от его токовой загрузки, но и от нагрузки вторичной цепи, нормированной в Омах. При превышении нормированного значения погрешность ТТ также увеличивается в отрицательную сторону. Поле допустимых погрешностей ТН в отличие от ТТ имеет одинаковую ширину во всем диапазоне коэффициента загрузки вторичной цепи $\beta_{\text{ТН}}$. Зависимость погрешности ТН от загрузки вторичной цепи имеет вид, приведенный на рис. 1.9 [77]. Средняя линия представляет

собой математическое ожидание погрешностей (систематическую погрешность) всех ТН, используемых на объекте, а боковые - пределы рабочей области поля допустимых погрешностей. Очевидно, что при больших нагрузках вторичных цепей ТН погрешность также идет в отрицательную область.

Формулы (1 .3) для систематической $\Delta_{ТН}$ и случайной $\delta_{ТН}$ погрешностей ТН по модулю напряжения, соответствующие прямым рис. 1 .9, имеют вид [77]

$$\begin{cases} \Delta_{ТН} = (0,5 - \beta_{2ТН})K_{ТН}, \\ \delta_{ТН} = \pm 0,5K_{ТН}. \end{cases} \quad (1.3)$$

где $K_{ТН}$ - класс точности ТН.

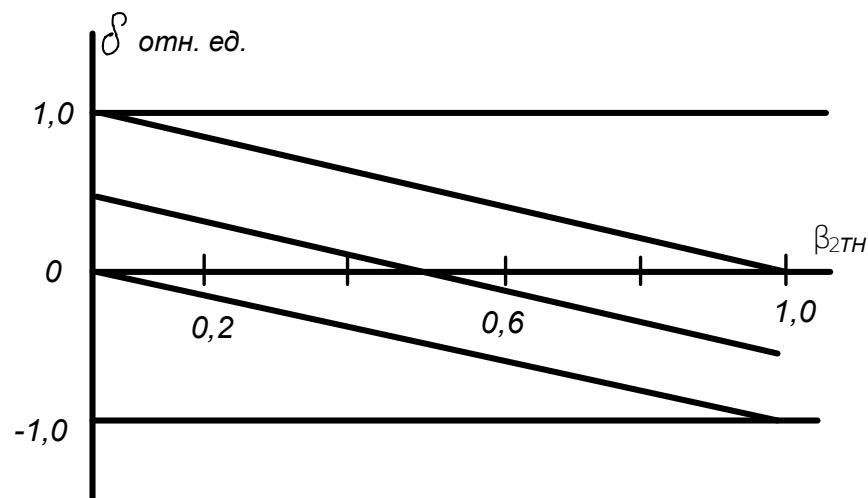


Рисунок 1.9 - Поле допустимых погрешностей ТН по ГОСТ- 1983

и рабочая область нагрузочных характеристик

Загрузка вторичных цепей ТН, как правило, существенная и в основном превышает номинал. В этих условиях средняя погрешность ТН, используемых на объекте, имеет отрицательную систематическую погрешность. Дополнительную негативную погрешность вносят потери во вторичных цепях ТН. На практике они также часто превышают допустимые значения. Эти потери действуют только в одну сторону (уменьшая

напряжение на счетчике по сравнению с выводами ТН), поэтому их учет в формуле (1 .2) в виде симметричной погрешности можно считать ошибкой. Особенно это очевидно для систем технического учета, в которых такие потери допускаются до 1,5 % номинального напряжения.

Особенности реализации энергосберегающих мероприятий на железнодорожном транспорте в современных условиях

Железные дороги Украины характеризуют следующие показатели (табл. 1 .2) [74]

Таблица 1.2 - Основные показатели электрифицированного железнодорожного транспорта Украины

Показатель	Единица измерения	Количество
1	2	3
Эксплуатационная длина электрифицированных участков, в т.ч. переменного тока 25 кВ 50 Гц	км	9 877,09 5 112,58
Удельный вес электрифицированных линий от общей длины сетей	%	45,5
Удельный вес электротяги в эксплуатационной работе	%	89,7
Потребление электроэнергии железными дорогами Украины, в т.ч. на электротяге	млрд. кВт·ч	5,739 4,834
Удельный вес железных дорог в общем потреблении Украины в т.ч. электротяга	%	3,9 3,0
Отпуск электроэнергии сторонним потребителям	млрд кВт·ч	6,561
Удельный вес переработки электроэнергии для сторонних потребителей от общей переработки	%	51,5
Себестоимость: 10 т·км грузовых перевозок 10 пас·км пассажирских перевозок	коп.	97,34 220,30

Окончание табл. 1 .2

1	2	3
Удельный расход условного топлива: электрическая тяга тепловозная тяга	кг у.т. на 10 000 т·км.бр.	39,65 87,8
Удельный расход электроэнергии на тягу	кВт·ч на	

	10 000 ткм.бр.	122

Структура переработки электроэнергии сетями железных дорог в 2010 году представлена в табл. 1.3

Таблица 1.3- Структура потребления электроэнергии железными дорогами Украины в 2010 г.

Железные дороги	Объем поступления (с потерями)	Технологические потери электроэнергии в локальных электросетях	На собственное потребление железных дорог		Передача электроэнергии посторонним лицензиатам	
			всего	в т.ч. железнодорожным потребителям	всего	в т.ч. потребление посторонним и транспорта потребителями
	млн кВт·ч	млн кВт·ч	млн кВт·ч	млн кВт·ч	млн кВт·ч	млн кВт·ч
Донецкая	2159,8	103,0	801,6	162,2	1 255,2	112,3
Львовская	1 521,6	53,6	545,0	94,3	922,4	105,8
Одесская	1 744,1	49,3	1 154,3	107,1	540,5	68,7
Юго-Западная	2 337,0	69,7	1 177,5	158,5	1 089,8	179,9
Южная	1 263,5	58,0	575,9	108,6	629,6	93,3
Приднепровская	2 523,8	59,0	1 127,0	193,4	1 337,8	142,7
Укрзалізниця	11 549,6	392,6	5 381,3	824,1	5 775,3	702,7

Структура потребления электроэнергии железными дорогами следующая:

- электротяга поездов – 4 833,9 млн. кВт·ч., что составляет 84,2 % от общего потребления;
- эксплуатационно-производственное потребление – 858,5 млн. кВт·ч. или 15,0 % от общего потребления;
- коммунально-бытовое потребление – 46,8 млн. кВт·ч, или 0,8 % от общего потребления.

Весь расход электроэнергии для стационарных потребителей состоит из двух частей - производственное потребление по основной деятельности железных дорог и коммунально-бытовое потребление.

Ориентировочный перечень потребителей электрической энергии, которые относятся к основной эксплуатационной деятельности, подсобно-

вспомогательной деятельности и коммунально-бытовым потребителям, представлен ниже в табл. 1.4. Такая структура отвечает действующей номенклатуре расходов средств на основную деятельность железных дорог [86, 87] по электроэнергии. Согласно инструкциям Минэнерго Украины расход электроэнергии общежитий относится к группе "население". Расход электроэнергии для акционерных предприятий относится к посторонним для железнодорожного транспорта потребителям.

Таблица 1.4 - Структура расхода электроэнергии для стационарных потребителей Укрзализныци

Название службы	Производственное потребление на выполнение основной эксплуатационной деятельности железных дорог (перевозочная работа)	Производственное потребление для подсобно-вспомогательной деятельности железных дорог и другие виды продукции и работ	Коммунально-бытовые потребители
1	2	3	4
Локомотивного хозяйства	Локомотивное депо Моторвагонное депо Пункт технического обслуживания и экипировки локомотивов	Составы топлива Дорожные лаборатории Ремонтно-механические мастерские, которые выпускают товарную продукцию	Дом локомотивных бригад Столовая Оздоровительный пункт Химчистка
Вагонного хозяйства	Вагонное депо и участок Вагоно-колесная мастерская Механизированный пункт технического отцепного ремонта Пункт промывки вагонов Промывочно-пропарочные станции Пункт подготовки вагонов под погрузку Пункт технического обслуживания вагонов	Конторы обслуживания пассажиров	Оздоровительный пункт Столовая
Пути	Дистанция пути Мостоиспытательная станция Дорожная лаборатория Путевая машинная станция Путе-испытательная станция Габаритно-исслед. станция Геофизическая станция Дистанция лесонасаждений	Щебеночный завод Шпалопропиточный завод Рельсосварочный поезд Балластовые карьеры Завод железобетонных шпал и изделий	—

Продолжение табл. 1.4

1	2	3	4

Строительно-монтажных работ и гражданских сооружений	Производственная база Дистанция гражданских сооружений	Завод железобетонных конструкций Насосная станция Станция перекачивания сточной воды Очистительные сооружения сточной воды Фильтровальные станции Мастерские	Жилищный фонд Детские оздоровительные заведения Профилакторий Стадион Клуб Другие жилищно-коммунальные потребители
Электроснабжения	Район контактной сети Район электрических сетей Ремонтно-ревизионный цех Мастерские База масляного хозяйства Дистанция электроснабжения Дорожная электротехническая лаборатория Собственные нужды тяговой подстанции	Электромеханические мастерские, которые выпускают товарную продукцию Электростанция	—
Пассажирская	Вокзалы Пассажирские вагонные депо Пункты технического обслуживания вагонов Центральное железнодорожное бюро Платформа Дорожное бюро учёта и распределения мест в пассажирских перевозках Билетные кассы Мастерская Гараж	—	—
Потребители вычислительной техники	Вычислительный центр, периферийный пункт системы "Экспресс"	—	—
Сигнализации и связи	Дистанция сигнализации и связи Дорожная лаборатория Дорожные электротехнические мастерские	—	—
Коммерческой Работы	—	Механизированная Дистанция погрузочно-разгрузочных работ Дорожные мастерские, которые выпускают товарную продукцию Грузовой цех станции Зарядная станция Пункт льда	—

Окончание табл. 1.4

1	2	3	4

Военизированной охраны	Военизированные отряды Административные здания ВОХР	—	—
Другие организации	Контрольно-расчетные группы Административно-хозяйственные здания управлений и участки железной дороги ДЦНТИ	—	Оздоровительно-спортивные базы и сооружения и другие предприятия и организации, которые не входят в выше перечисленные группы

Обобщающим показателем эффективности использования электроэнергии на железнодорожном транспорте является удельный расход электроэнергии на единицу продукции.

На железнодорожном транспорте успешно действовала «Программа энергосбережения на железнодорожном транспорте на период 1996-2010 гг.» [2]. В данной отраслевой программе указаны направления экономии электроэнергии на железнодорожном транспорте, которые учитывают специфику железных дорог как потребителя энергетических ресурсов (наличие электрификации на постоянном и переменном токе, распределённый характер потребления электроэнергии, подвижная нагрузка и т.д.). Энергетическая и экономическая эффективность работы систем электроснабжения железных дорог зависит от многих факторов. Среди них можно назвать:

- тип электроподвижного состава,
- организация движения поездов,
- режимы устройств электроснабжения.

Данные составляющие взаимосвязаны и взаимно влияют друг на друга.

Объём выполненной работы на железной дороге характеризуется выполненным грузооборотом и временем доставки грузов. Первый показатель зависит от числа поездов и от их массы. Характер изменения числа поездов, их массы, межпоездного интервала, а также тип электроподвижного состава, профиль участка в совокупности влияют на характер нагрузки тяговых подстанций. Время доставки грузов определяет

потребность в подвижном составе, количество поездов, которые одновременно могут находиться на данном участке.

Главным резервом экономии электроэнергии на железных дорогах Украины на этапе эксплуатации в настоящее время является применение энергосберегающих технологий. Энергетическая составляющая в общих эксплуатационных расходах Укрзализныци довольно большая и достигает 20 %. Поэтому экономное и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов имеет чрезвычайно большое значение. Вопросы энергосбережения нашли своё отражение и в принятой в Украине «Стратегии развития железнодорожного транспорта до 2020 года» [88], где подчёркивается актуальность внедрения мероприятий, направленных на снижение удельных расходов энергоресурсов.

Экономия электроэнергии предусматривает, прежде всего, уменьшение потерь электроэнергии во всех звеньях системы электроснабжения и в самих электроприемниках железнодорожного транспорта [89, 90]. Основными путями снижения потерь электроэнергии на предприятиях железнодорожного транспорта являются [3, 73, 91, 92]:

1) рациональное построение системы электроснабжения при ее реконструкции, включающее в себя применение рациональных:

- напряжений;
- мощности и числа трансформаторов на тяговых подстанциях (ТП);
- общего числа трансформаций;
- места размещения ТП;
- схемы электроснабжения;
- компенсации реактивной мощности и др.;

2) снижение потерь электроэнергии в действующих системах электроснабжения, включающее в себя:

- ограничение холостого хода электроприемников;

- модернизацию существующего и применение нового, более экономичного и надежного технологического и электрического оборудования;
 - повышение качества электроэнергии;
 - применение экономически целесообразного режима работы силовых трансформаторов;
 - автоматическое управление освещением в течение суток;
 - применение рациональных способов регулирования режимов работы насосных и вентиляционных установок и др.;
- 3) нормирование электропотребления, разработка научно обоснованных норм удельных расходов электроэнергии на единицу продукции;
- 4) составление электробалансов;
- 5) организационно-технические мероприятия, которые разрабатываются конкретно на каждом железнодорожном предприятии с учетом его специфики.

Организационные мероприятия, направленные на экономию ТЭР, безусловно, дали положительный эффект, но к настоящему времени себя практически исчерпали [10]. Дальнейший поиск энергосберегающих мероприятий необходимо осуществлять в направлении рационализации работы хозяйства электрификации и электроснабжения.

Выполнение программы энергосбережения на железнодорожном транспорте по хозяйству электроснабжения позволило за 2010 год уменьшить потребление электроэнергии на 7,61 млн кВт·ч на сумму 4,82 млн грн.

Наиболее эффективными энергосберегающими мероприятиями по хозяйству электроснабжения и электрификации Укрзализныци в 2010 году были [74]:

1. Внедрение экономичных светильников, ламп и автоматов управления внешним освещением – 2,4 млн кВт·ч (1,6 млн.грн.).

2. Отключение из работы по одном тяговому агрегату или тяговому трансформатору в зависимости от поездной ситуации – 1,6 млн кВт·ч (1,0 млн.грн.);

3. Внедрение преобразовательных агрегатов с 12-ти пульсовыми выпрямителями на тяговых подстанциях постоянного тока – 0,4 млн кВт·ч (0,2 млн грн);

4. Применение стационарной (вместо передвижной) тяговой подстанции – 0,5 млн.кВт·ч (0,3 млн грн).

5. Уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети за счёт применения пункта питания контактной сети - 0,1 млн кВт·ч (0,08 млн грн).

Объемы экономии электроэнергии за счет внедрения энергосберегающих мероприятий по хозяйству электроснабжения и электрификации Укрзализныци приведены в табл. 1.5 и на рис. 1.10.

Таблица 1.5- Объемы экономии электроэнергии за счет внедрения энергосберегающих мер по хозяйству электроснабжения

Меры	Ед.изм.	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Организационно-технические меры	млн.кВт.ч	25,67	23,66	23,15	20,72	24,15	6,66	-	-	-	0,64
	млн.грн.	4,28	4,37	4,20	4,41	5,74	2,30	-	-	-	0,42
Программа энергосбережения	млн.кВт.ч	2,43	11,24	15,20	13,00	17,56	43,85	16,63	13,77	7,02	6,97
	млн.грн.	0,68	1,85	2,80	2,16	4,07	12,14	5,46	7,20	4,70	4,4
Всего	млн.кВт.ч	28,11	34,90	38,35	33,72	41,70	50,52	16,63	13,77	7,02	7,61
	млн.грн.	4,96	6,22	7,00	6,57	9,81	14,45	5,46	7,20	4,70	4,82

В основном усилия всех железных дорог направлены именно на рационализацию работы систем электроснабжения тяги [73].

Вопросы повышения энергетической и экономической эффективности электротяговых сетей всегда были в поле зрения кафедры электроснабжения ДИИТа. В работах [91, 93- 96] были заложены рекомендации по построению энергоэффективных систем электроснабжения тяги поездов. Для системного подхода к проблеме энергосбережения необходима разработка энергетической стратегии железных дорог Украины [90, 91, 97].

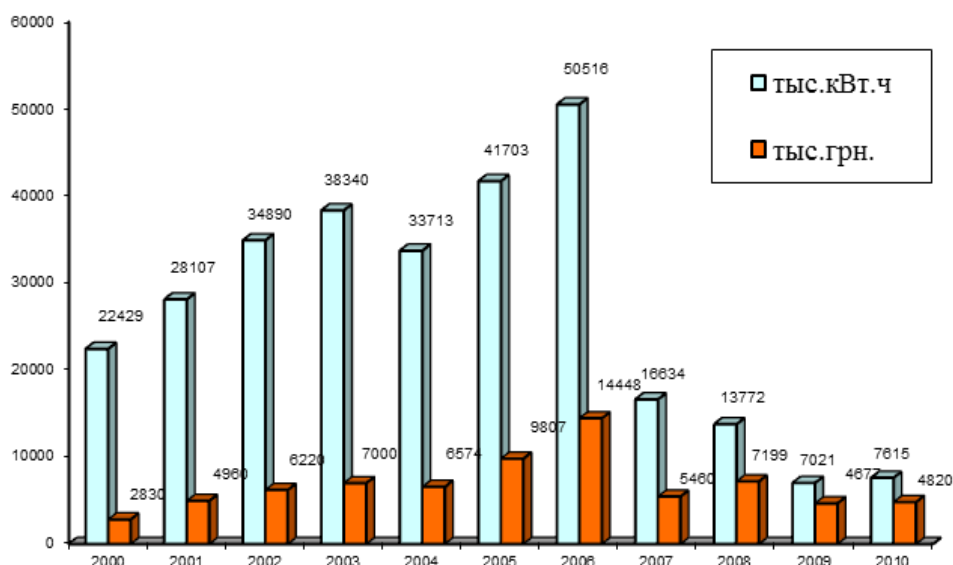


Рисунок 1.11 - Экономия электроэнергии и средств за счет выполнения программы энергосбережения и организационно-технических мер по экономии электроэнергии по хозяйству электроснабжения за 2000-2010 гг.

Реалии сегодняшнего дня таковы, что при выборе энергосберегающих мероприятий необходимо обращать внимание не только на показатели энергетической эффективности систем электроснабжения тяги. На первое место по важности выходят показатели экономической эффективности. Либерализация рынка электроэнергии, реформирование электроэнергетики Украины коренным образом отразилось на железнодорожном транспорте. Железные дороги Украины как квалифицированные потребители электроэнергии [98] получили возможность выбирать оптимальный для себя вариант закупки электроэнергии.

На всех без исключения железных дорогах Украины ведётся плодотворная работа по внедрению прогрессивных методов закупки электроэнергии, по закупке электроэнергии с ОРЭ [50]. За 2010 год затраты железных дорог на покупку активной электроэнергии (в том числе на приобретение электроэнергии непосредственно локомотивными службами Донецкой и Юго-Западной железных дорог у поставщика по нерегулированному тарифу) составили 3 638,35 млн грн без НДС (с НДС – 4 366,0 млн грн), что на 688,95 млн грн больше, чем в 2009. Куплено у поставщиков по регулированному тарифу (облэнерго) 229,6 млн кВт·ч активной электроэнергии на сумму 96,85 млн грн без НДС. В работах [90, 97]

показаны принципы энергетической стратегии Укрзализныци и условия обеспечения энергетической безопасности железных дорог Украины. Указано, что основой энергетической безопасности Укрзализныци может быть только чёткая государственная вертикаль управления энергетическими ресурсами.

Многие зарубежные учёные работают над созданием информационных энергосберегающих технологий, которые учитывают возможности расчётов за электроэнергию по дифференцированным тарифам и покупки электроэнергии по оптовым ценам [99, 105].

Рост оптовой рыночной цены на электроэнергию прослеживается на протяжении нескольких лет. Так, за январь – декабрь 2006 года она возросла на 18,3 % (с 185,14 грн до 219 грн за 1 Мвт·ч), за январь-декабрь 2007 года – на 21 % (с 219,0 грн до 264,82 грн за 1 Мвт·ч). В 2008 году наблюдался самый быстрый за последние годы рост цены ОРЭ - 49,2 %. На протяжении 2009 года оптовая рыночная цена электроэнергии возросла на 8,4 % (с 395,17 до 428,55 грн за 1 Мвт·ч - декабрь 2008 к декабрю 2009 соответственно). На протяжении 2010 г. оптовая цена электроэнергии выросла на 17,25 %.

На рис. 1.12 приведена динамика роста фактических оптовых цен на электроэнергию в Украине [106]. Как видно из данного рисунка, за представленные 5 лет цены на электроэнергию выросли более чем в 3,5 раза.

По состоянию на 01.01.2011 года доли поставщиков электроэнергии для железных дорог Украины согласно объемам закупки электроэнергии распределилась следующим образом: ОРЭ – 12,4 %, ПНТ – 82,4%, поставщики по регулируванному тарифу (облэнерго) – 3,3 %, другие - 1,9 % .

В табл. 1.6 приведен анализ экономии расходов железных дорог от внедрения прогрессивных методов закупки электроэнергии за период с 2001 по 2010 год.

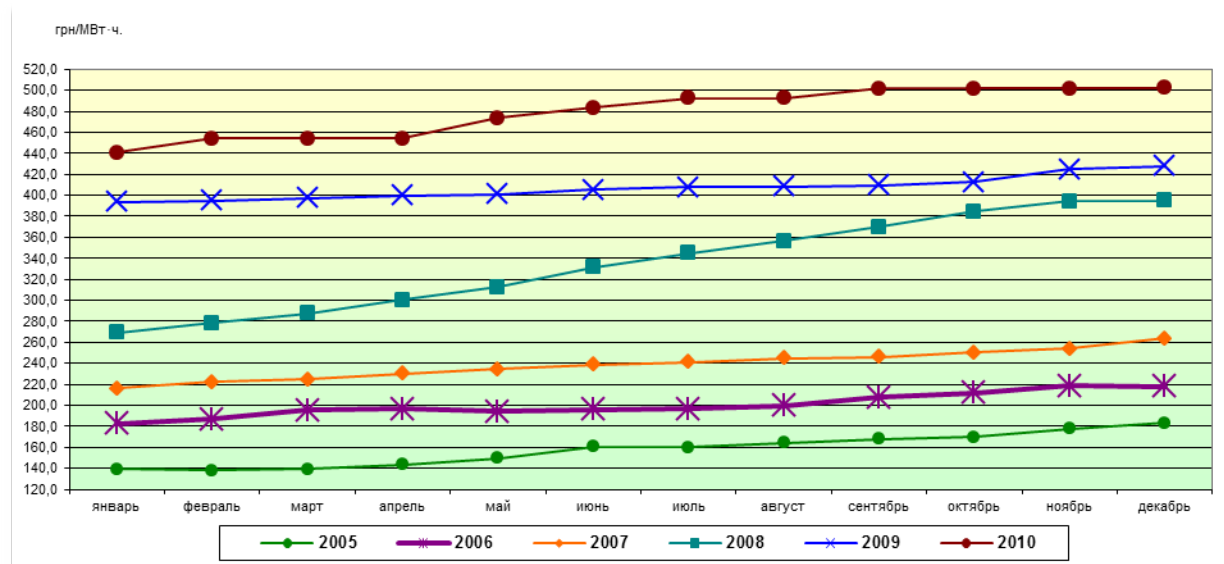


Рис. 1.12 - Динамика изменения фактических оптовых цен на электроэнергию в 2005-2010 г.г.

Таблица 1.6 - Экономия расходов от внедрения прогрессивных методов закупки за 2001-2010 гг. тыс.грн. с НДС

Железная дорога	Закупка с ОРЭ, ПНТ, дифференцированный тариф										Всего за 2001-2010г.
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
Донецкая	0	166	337	599	1 080	3 165	4 747	22 143	29 748	64 334	126 319
Львовская	553	49	0	178	429	1 545	1 668	3 680	3 640	4 501	16 243
Одесская	1 539	2 114	1 178	2 934	4 365	4 040	3 635	4 823	4 313	9 288	38 229
Юг.-западная	6 329	11 148	11 685	21 456	26 124	21 462	30 164	70 209	71 597	85 205	355 379
Южная	0	0	841	1 597	2 392	4 771	4 967	9 022	9 670	12 345	45 605
Приднепровская	225	1 132	691	561	575	1 439	1 691	4 338	7 944	20 088	38 684
Укрзализныця	8 646	14 609	14 732	27 325	34 965	36 422	46 872	114 215	126 912	195 761	620 459

Необходимо отметить, что несмотря на большую работу, которая проделана на пути энергосбережения в системах тягового электроснабжения, не все резервы ещё задействованы, и поэтому данную проблему целесообразно исследовать на системном уровне. Энергосбережение в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока – это, безусловно, комплексная и многоуровневая проблема. Классификация системы энергосберегающих мероприятий в СТЭ представлена на рис. 1.143.

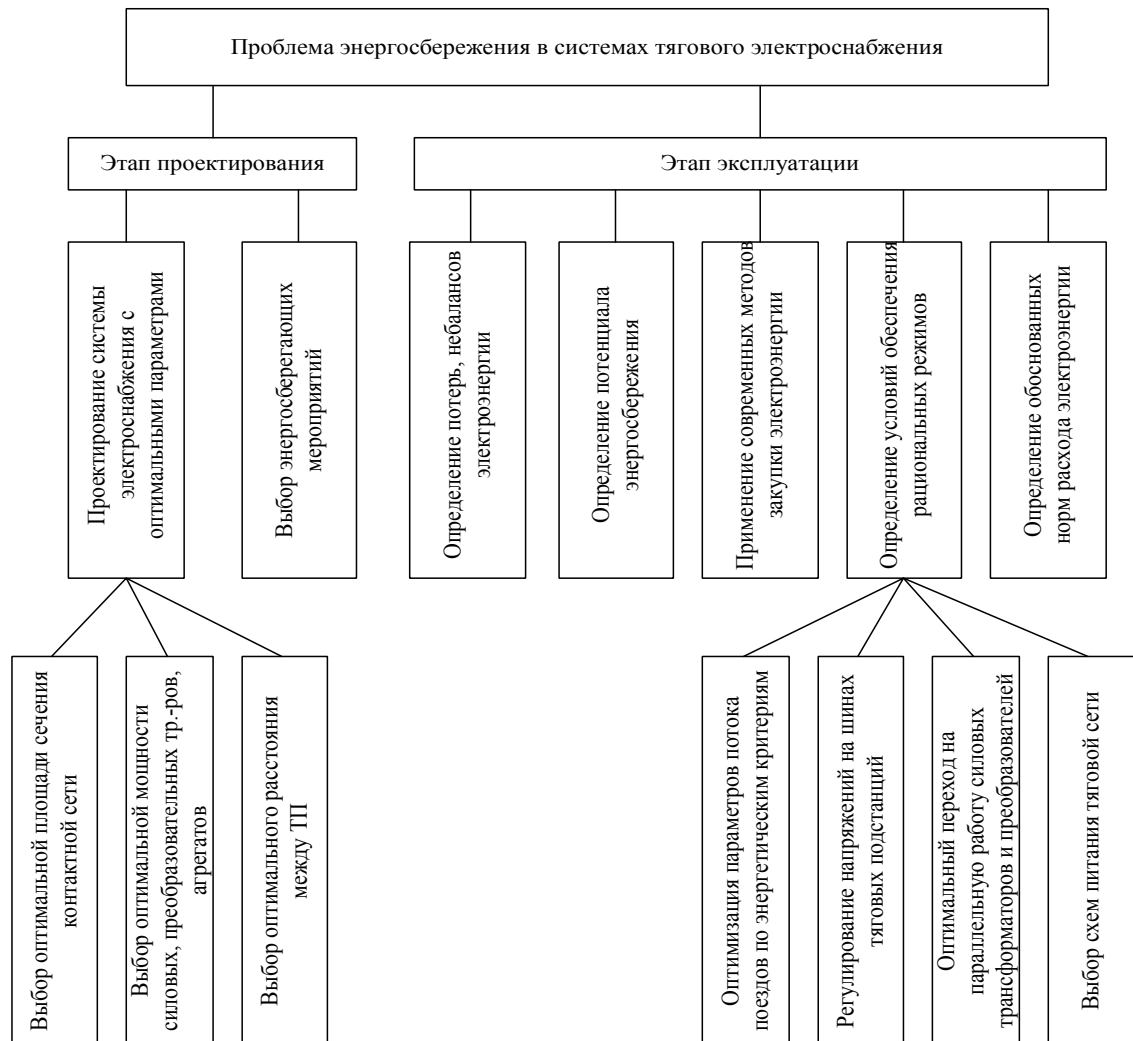


Рисунок 1.13 Классификация энергосберегающих мероприятий в СТЭ

Постановка и успешное решение проблемы энергосбережения требует комплексного, системного подхода [107]. На сегодняшнем этапе развития Укрзализныця находится в стадии реформирования для приближения к требованиям и нормативам Евросоюза. Для обеспечения энергетической

безопасности целесообразно сохранить существующую структуру управления потреблением ТЭР [97].

Хозяйство электрификации и электроснабжения железных дорог можно рассматривать как совокупность различных технологических процессов, объединенных решением задачи бесперебойного электроснабжения ЭПС электроэнергией с допустимыми параметрами качества. При управлении хозяйством электроснабжения в АСУЭ решаются задачи оптимизации режимов СТЭ, а также задачи, связанные с планированием процесса технической эксплуатации оборудования. Система управления СТЭ является сложной и имеет иерархическую структуру, которую можно разделить на отдельные подсистемы (рис. 1.14). Каждая отдельная подсистема имеет самостоятельную цель управления и общую цель для всей АСУЭ. Каждая из рассматриваемых подсистем находится на своём уровне иерархии. Подсистемы взаимодействуют между собой и имеют внешние связи с питающими районными энергосистемами и другими подсистемами железной дороги.

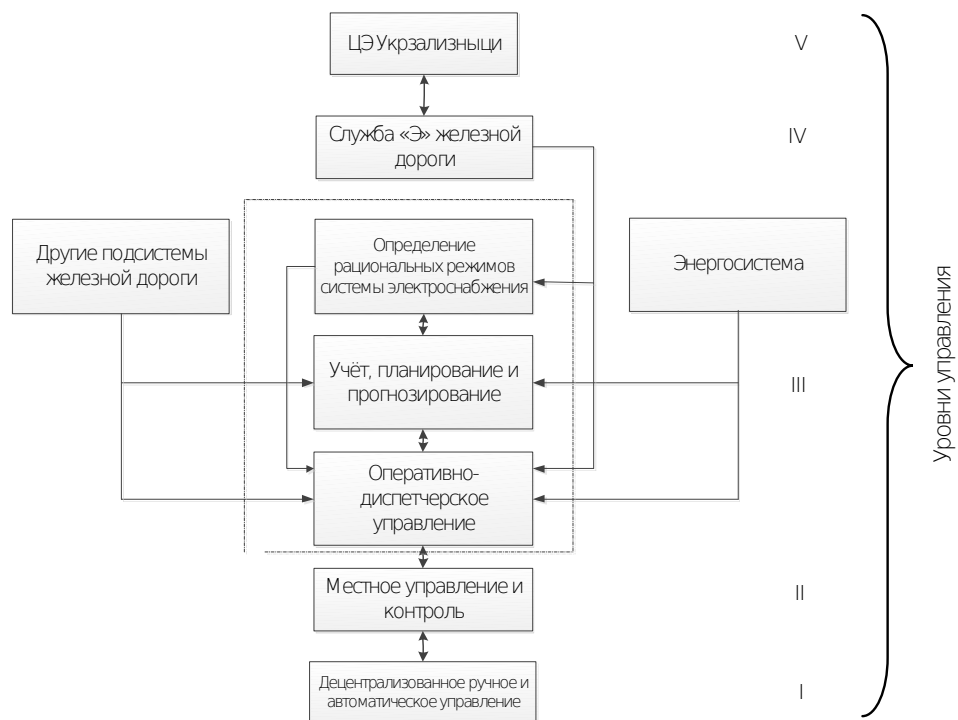


Рисунок 1.14 - Структурная схема управления хозяйством электрификации и электроснабжения Укрзализныци

Управление в пределах дистанции электроснабжения имеет три уровня: на первом уровне осуществляется ручное и автоматическое децентрализованное управление силовым оборудованием; на втором уровне – местное оперативное и автоматическое централизованное управление силовым оборудованием ЭЧЭ, ПСК, ППС; на третьем уровне управления реализуют АСДУ.

От энергодиспетчерских пунктов, соответственно службы электроснабжения дороги и Главного управления электрификации и электроснабжения ЦЭ на энергодиспетчерский пункт дистанции электроснабжения поступает нормативная и оперативно-управляющая информация, с помощью которой координируются режимы работы дистанций электроснабжения в пределах железной дороги.

Энергодиспетчерский пункт службы электроснабжения дороги обрабатывает основные показатели работы ЭЧ, планирует работу ЭЧ в масштабах дороги, обменивается информацией с энергодиспетчерскими пунктами ЦЭ и энергосистем. АСДУ осуществляет автоматизированный сбор и обработку информации, которая необходима диспетчерскому персоналу для непрерывного централизованного контроля и управления [108].

Задачи оперативного управления, решаемые АСДУ, определяются режимом работы системы электроснабжения. Под режимом работы системы электроснабжения электротранспорта подразумевается совокупность процессов, определяющих в любой момент времени состояние параметров режима. Под параметрами режима понимаются показатели, характеризующие режим системы и условия ее работы: мощности, напряжения, перетоки энергии по тяговой сети, частота и т. д.

Система электроснабжения характеризуется параметрами, т. е. показателями, зависящими от свойств оборудования системы, ее конфигурации и определяющими значения тех коэффициентов, с помощью которых устанавливается взаимосвязь и взаимозависимость параметров режима.

В *нормальном режиме* выполняют регулирование режима электроснабжения, его корректировку при отклонениях для выполнения требований по качеству электроэнергии и надежности ее подачи. Именно в этом

режиме целесообразно производить поиск рациональных режимов системы электроснабжения электротранспорта.

В аварийных режимах приходят в действие автоматические устройства первого уровня (релейная защита). В этом случае оперативно-диспетчерский персонал производит необходимые отключения устройств электроснабжения в случае их отказа.

В послеаварийном режиме решают задачи по восстановлению нормальной схемы электроснабжения тяги поездов и стационарных потребителей, принимают меры по устранению причин аварии и производят ремонт поврежденного оборудования.

Для обеспечения рациональности технологического процесса снабжения электроэнергией тяги поездов и стационарных потребителей необходима информация о текущем режиме работы СТЭ, о режиме работы внешней системы электроснабжения, о показателях потока поездов, о надёжности силового оборудования. Для этого необходимы соответствующие модели. На рис. 1.15 приведена взаимосвязь различных моделей для принятия решения, направленного на экономию электроэнергии.

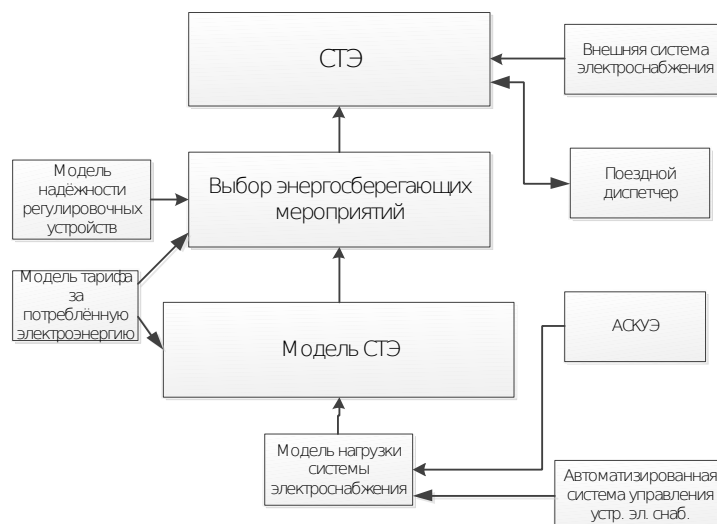


Рисунок 1.16 Взаимодействие моделей для выбора энергосберегающих мероприятий

Система включает в себя следующие составные элементы:

- модель нагрузки системы электроснабжения;
- модель потока поездов;
- модель надёжности переключающих устройств;
- модель выбора энергосберегающих мероприятий для обеспечения рациональных режимов системы электроснабжения;
- модель системы внешнего электроснабжения.

На современном этапе система электроснабжения электротранспорта требует качественно новых подходов при применении энергосберегающих мероприятий. Это объясняется следующими причинами:

- рыночные отношения в организации хозяйственной деятельности железнодорожного транспорта требуют принятия решений, направленных на максимизацию прибыли от перевозок;
- снижение показателей надёжности основного силового оборудования из-за износа;
- либерализация рынка электроэнергии подталкивает к использованию прогрессивных методов закупки электроэнергии.

Опыт эксплуатации системы электроснабжения электротранспорта показал, что в нормальных режимах значения параметров, которые определяют условия надёжности, качества, экономичности передачи и потребление электроэнергии, близки к предельным. Поэтому, если производить поиск рациональных режимов системы электроснабжения только по экономическим соображениям, такой подход будет недостаточным. На наш взгляд, необходимо расширить количество критериев и производить поиск рациональных режимов не по одному частному критерию, а по всей совокупности критериев одновременно. Оптимизация режимов работы системы электроснабжения электротранспорта представляет собой типовую многокритериальную задачу структурной и параметрической оптимизации [109].

Задача структурной оптимизации имеет целью улучшение векторов состояний, которые определяют условия надёжности, качества электроэнергии, экономичности и электромагнитной совместимости (подключение постов секционирования, пунктов параллельного соединения, включение силовых и преобразовательных трансформаторов на параллельную работу). Параметрическая оптимизация направлена на улучшение векторов состояний системы электроснабжения для фиксированной структуры этой системы.

Иерархия целей, которые можно технически реализовать, при внедрении энергосберегающих мероприятий в системах электроснабжения электротранспорта изображена на рис. 1.17.



Рисунок 1.17 - Иерархия целей при осуществлении энергосберегающей политики

Цели могут быть распределены на следующие уровни [110].

1-й уровень. Высшая цель – рационализация работы системы электроснабжения электротранспорта, что обеспечивает в рыночных условиях в числе других факторов конкурентоспособность железнодорожного транспорта.

2-й уровень. Подцелями высшей цели являются: повышение надежности системы электроснабжения, качества электроэнергии, экономичности функционирования и улучшение экологических показателей (показателей электромагнитной совместимости со смежными устройствами, снижение выбросов CO₂) [49].

3-й уровень. В свою очередь, надежность системы электроснабжения зависит от совокупности таких основных свойств: безотказность электроснабжения потребителей; ее живучесть. Качество электроэнергии определяется, в основном, по отклонениям напряжения от номинальных значений. Экономичность функционирования системы определяется уровнем затрат материальных, трудовых и финансовых ресурсов.

4-й уровень. Безотказность системы электроснабжения электротранспорта обеспечивается безотказностью как устройств тяговых подстанций, постов секционирования, пунктов параллельного соединения, так и устройств контактной сети и сетей нетягового электроснабжения.

Существующие подходы к управлению энергосбережением в Украине

В соответствии с законом Украины «Об энергосбережении» [111] под энергосбережением понимается деятельность (организационная, научная, практическая, информационная), которая направлена на рациональное использование и экономное расходование первичной и преобразованной энергии и природных энергетических ресурсов в национальном хозяйстве и реализуется с использованием технических, экономических и правовых методов. В США, Европе, Японии вопросами управления энергосбережением начали заниматься в 70-х годах 20-го века в эпоху нефтяного кризиса. Методы управления энергосбережением постоянно развивались. Тенденцию их развития на государственном уровне можно проследить на примере Европейского союза – от прямого управления энергосбережением путём экономического стимулирования в 70-90 гг. прошлого века к принятию целевых программ по энергосбережению на современном этапе. Программно-целевой подход признан самым эффективным подходом к

управлению энергосбережением на государственном и отраслевом уровнях. В Европейском союзе накоплен большой положительный опыт реализации таких программ энергосбережения, как SAVE, SAVE II, TACIS, PHARE, SURE, «Разумная энергия для Европы» [112].

В Украине в 1997 г. была принята «Комплексная государственная программа энергосбережения Украины (КГПЭУ)» [113], в которой абсолютные показатели энергосбережения поставлены в соответствие с состоянием экономики и потреблением ТЭР. Стратегической целью политики энергосбережения Украины является выход государства в перспективе на уровень передовых государств с рыночной экономикой по энергоемкости как валового внутреннего продукта, так и отдельных видов продукции, работ и услуг [113]. Главными задачами КГПЭУ определены такие:

- определение общего существующего и перспективного потенциала энергосбережения, разработка основных направлений его реализации в материальном производстве и сфере услуг;
- создание программы первоочередных и перспективных мероприятий и задач по повышению энергоэффективности и освоения практического потенциала энергосбережения.

В 2010 г. принята «Государственная целевая экономическая программа энергоэффективности на 2010-2015 годы» [114]. Она была разработана для создания условий, которые будут способствовать приближению энергоемкости валового внутреннего продукта Украины к уровню развитых стран и стандартам Европейского союза. В течение срока действия «Программы...» [114] предусмотрено снижение уровня энергоёмкости валового внутреннего продукта на 20 % по сравнению с 2008 годом (ежегодно на 3,3 %), повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов. В отличие от [113] в [114] предусмотрены мероприятия по оптимизация структуры энергетического баланса государства путем уменьшения доли импортированных ископаемых

органических видов энергоресурсов, в частности природного газа, и замещение их другими видами энергоресурсов, в том числе полученными из альтернативных источников энергии, и вторичными энергетическими ресурсами.

Основными показателями энергосбережения в [113, 114] приняты:

- энергоёмкость;
- потребление ТЭР на душу населения;
- объем замещения потребления ТЭР в результате внедрения энергосберегающих технологий.

Перечисленные выше показатели энергосбережения не учитывают надёжность силового оборудования и экологический аспект политики энергосбережения. Очевидно, что для комплексного подхода к энергосбережению необходимы комплексные показатели.

Вопросам разработки стратегии энергосбережения, расчёта потенциала энергосбережения, системного анализа энергосберегающих технологий и оптимизации энергоёмких производств посвящены работы [112, 115, 117]. В [117] предложен оригинальный алгоритм решения задачи экстремального управления энергосбережением, который базируется на применении теоретико-игровых подходов и учитывает рыночные аспекты управления энергосбережением.

Методы энергосбережения в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока

Методы энергосбережения на этапе проектирования систем тягового электроснабжения

Концепция энергооптимальной системы электроснабжения электротранспорта была предложена в [9]. Под проектированием энергооптимальной системы электроснабжения электротранспорта понимают выбор оптимальных параметров системы электроснабжения. При проектировании условно разделяют режимы работы системы

электрооборудования и электроподвижного состава. Тяговые расчеты выполняются при номинальном напряжении на токоприемниках электропоездов. Результаты исследований многих учёных наглядно показали недопустимость такого разделения взаимосвязанных и зависящих друг от друга элементов системы электрической тяги.

Аналитическая формулировка задачи создания оптимальной системы электрооборудования электрической тяги в общем виде представлена в [9]:

$$\min M[Z(I_1, I_2, R, t)]. \quad (1.4)$$

где M - символ математического ожидания; Z - показатель эффективности; I_1 - технические параметры системы; I_2 - условия эксплуатации; R - показатель надежности; t - время.

Область применения вектора решения $j(I_1, I_2)$ определяется ограничениями, накладываемыми на показатели системы. Показатель эффективности определяет качество каждого принимаемого решения, его минимизация является основной задачей при проектировании системы. Показатель эффективности может быть экономическим (приведенные затраты) или техническим (суммарная мощность системы, потери в системе и т. п.).

Методика решения задачи проектирования оптимальной системы электрооборудования, предложенная Р. И. Мирошниченко, состояла в следующем. Имея данные по профилю участка, расстановке сигналов автоблокировки и координаты остановочных пунктов, рассматривали несколько вариантов системы электрооборудования (сочетание различных типов ЭПС, различных параметров системы электрооборудования при заданных грузопотоке и числе пассажирских поездов) и выбирали вариант, оптимальный по минимуму приведенных затрат при условии обеспечения всех технических требований и критериев.

В настоящее время на железных дорогах СНГ применяются централизованные системы тягового электрооборудования. Однако многие учёные высказываются за применение распределённых систем питания. При

распределённых системах тягового электроснабжения главные подстанции осуществляют преобразование напряжения питающей энергосистемы в напряжение 6,12 или 24 кВ постоянного тока или 35 кВ переменного тока продольной линии. Пункты питания преобразуют напряжение продольной линии в напряжение 3,3 кВ тяговой сети. Применение таких схем позволит использовать провода контактной сети меньшего сечения, уменьшит потери электроэнергии и потери напряжения в контактной сети и создаст предпосылки для автоматического управления системами тягового электроснабжения [118, 119].

Методы расчёта систем электроснабжения тяги поездов

При расчетах систем электроснабжения тяги возникает два вида задач:

- определение расчётных энергетических величин по заданному графику движения поездов;
- определение расчётных величин в условиях, когда не может быть задан конкретный график движения поездов.

Существуют следующие три группы методов расчёта систем электроснабжения электрического транспорта [76] (рис. 1.18):

- 1) методы расчета по заданному графику движения поездов;
- 2) методы расчета по средним размерам движения поездов;
- 3) методы расчета с учетом неравномерности движения поездов.

Ниже рассмотрены лишь основные принципы методов расчета системы тягового электроснабжения.

Методы расчёта, использующие графики движения поездов, для задач энергосбережения в СТЭ не приемлемы, так как задача решается для магистральных железных дорог с грузовым движением, где не может быть задан один определённый график движения поездов. Метод равномерно распределённой нагрузки, а также его модификации обладают недостаточной точностью расчётов вследствие неучёта неравномерности потока поездов и токопотребления.



Рисунок 1.18 - Существующие методы расчёта систем электроснабжения электрического транспорта

Неравномерность процесса движения поездов учитывают методы, основанные на применении теории вероятностей. К. Г. Марквардтом и Г. Г. Марквардтом была разработана методика расчёта системы электроснабжения, ориентированная на применение ЭВМ [7].

Были проанализированы также методы расчёта системы электроснабжения [4, 120], основанные на имитационном моделировании работы электрифицированного участка железной дороги. Методы этого класса ориентированы на применение ЭВМ и позволили отказаться от усреднения токопотребления по длине межподстанционной зоны, а также учесть реальный поток поездов. Однако использовать их для решения задач энергосбережения, регулирования режимов СТЭ оказалось невозможным, так как для достижения приемлемой при оптимизации точности необходимо затратить значительное количество машинного времени. А так как процедура оптимизации обращается к расчёту системы многократно, то решить задачу за приемлемое время невозможно.

Методы энергосбережения за счёт применения рациональных режимов систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока

Достижение рационального электропотребления возможно при оперативном анализе информации на различных уровнях учета экспертными системами (ЭС) и реализации автоматизированного регулирования электропотребления. В [4] разработана стратегия достижения рационального электропотребления в тяговых сетях, базирующаяся на интегрированной системе управления устройствами электроснабжения с распределенным интеллектом и экспертной системе принятия решений. В [121] выявлены факторы, влияющие на составляющие электропотребления, получены обобщающие зависимости потерь энергии, показаны пути автоматизации накопления баз знаний ЭС. В [4, 122, 123] разработаны принципы формирования алгоритмов регулирования режимов работы электротяговых сетей с использованием ЭС, учитывающие координацию локальных и глобальной систем управления устройствами электроснабжения по обобщенному критерию минимума расхода электроэнергии, позволяющие осуществить переход от диспетчерского к автоматизированному и автоматическому регулированию.

Перспективными на сегодняшний день являются и выдвинутые в [124, 125] научные положения по рационализации графиков движения поездов в условиях резкого удорожания энергоресурсов с учетом критерия минимальных потерь энергии в электротяговой сети.

Проведение целенаправленной работы по анализу потерь, выявлению закономерностей и очагов потерь невозможно без соответствующей аппаратуры. Поиск новых технических решений, исследования и эксперименты позволили для специфической тяговой нагрузки предложить косвенные способы измерения потерь энергии. Поэтому были разработаны методики и аппаратура для измерения потерь энергии в тяговой сети переменного тока, тяговой сети постоянного тока и тяговых трансформаторах. Методом планирования эксперимента проведен

дисперсионный анализ коэффициентов настройки счетчиков потерь энергии в тяговой сети переменного тока Ф442П, счетчиков потерь энергии в тяговой сети постоянного тока Ф607П, счетчиков потерь энергии в тяговых трансформаторах Ф443АРП, получены аналитические, регрессионные выражения для определения коэффициента настройки в эксплуатации, разработаны алгоритмы расчета коэффициента в режиме реального времени, позволяющие значительно снизить погрешность метода [121]. Погрешность счетчиков потерь по сравнению с контрольными приборами составила 3,2% на участке постоянного тока и 2,4 % на участке переменного тока, погрешность метода ампер-квадрат часов с нерегулируемым и регулируемым коэффициентом настройки соответственно 7,5 % и 2,5 % [121]. Новые счётчики семейства Альфа имеют возможность измерять косвенным способом потери электроэнергии, основываясь на функции квадрата тока и коэффициенте потерь [126, 127].

К сожалению, на сегодняшний день вопросами развития инструментальных методов определения потерь электроэнергии в тяговых сетях магистральных железных дорог практически не занимаются. Хотя имеются работы, в которых авторы излагают свою точку зрения на потери мощности в тяговой сети, вводят понятие дополнительных потерь электроэнергии. Так, в работах [128-130] изложены результаты исследований, которые указывают на потребление неактивной (реактивной по Фризе) мощности в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока. Показано, что потребление неактивной мощности ведёт к дополнительным потерям электроэнергии в системе. С появлением микропроцессорных счётчиков, АСКУЭ возникли новые возможности для расчёта потерь в тяговых сетях. Современные микропроцессорные счётчики могут быть преобразованы в счётчики потерь программными средствами. [12, 131].

В [132, 133] решена актуальная научно-техническая проблема повышения энергетической эффективности систем электроснабжения

железных дорог на основе разработки и совершенствования методов моделирования режимов их работы. На основе разработанных автором оригинальных технологий моделирования реализован комплекс методов и средств повышения энергетической эффективности систем тягового электроснабжения впервые построена нелинейная динамическая модель СТЭ как многомерного, многосвязного и многорежимного объекта управления. В модели реализован комплексный учет таких сложных факторов, как несимметричность и несинусоидальность токов и напряжений; предложены и апробированы алгоритмы контроля потерь электроэнергии, учитывающие вероятностный характер графика движения поездов; разработаны новые методы мониторинга технического состояния, обеспечивающие повышение надежности важнейших элементов тягового электроснабжения.

Являются актуальными предложенные в [132] рекомендации по мониторингу работы важнейших элементов СТЭ с целью нахождения и поддержания рационального режима. Использование пунктов параллельного соединения (ППС) в тяговых сетях постоянного и переменного тока приводит к сокращению потерь электрической энергии, которые зависят как от особенностей рельефа, по которому проходит железнодорожная магистраль, так и от размеров движения и ритмичности графика движения поездов по путям различного направления. Для оценки эффективности применения ППС в [134] предложена методика, позволяющая более точно определять сокращение потерь в тяговых сетях при их включении.

В [120,121,135-137] было предложено использовать нечёткомножественный подход к определению рациональных режимов системы электроснабжения тяги поездов. Усовершенствована экспертная система принятия решений при регулировании режимов работы систем тягового и внешнего электроснабжения, позволяющая повысить энергоэкономическую эффективность и оперативность принятия решений при неполной или противоречивой информации. Разработаны принципы

формирования алгоритмов и наполнения баз данных и знаний экспертных систем.

Предложенные в [120] алгоритмы создания баз данных ЭС можно реализовать после модернизации систем управления устройствами СТЭ на базе интегрированных систем «Гранит-ж.д.-Микро» (Украина) или АСТМУ (Россия). На базе эксплуатируемых телемеханических систем «Лисна» применение ЭС практически невозможно, т.к. система «Лисна» не имеет цифровых интерфейсов.

Системы телемеханического управления устройствами электроснабжения, являющиеся основой автоматизированных систем управления устройствами электроснабжения (АСУЭ), в настоящее время не позволяют передавать необходимую информацию о параметрах режимов систем тягового электроснабжения на автоматизированные рабочие места энергодиспетчера. Программное обеспечение автоматизированных рабочих мест энергодиспетчера не предусматривает наличия экспертных систем. Такое включение возможно лишь после внедрения микропроцессорных систем телеуправления (таких как «Гранит-ж.д.-Микро»).

При определении рациональных режимов работы системы тягового электроснабжения для осуществления перевозочного процесса определяющим параметром является стоимость электроэнергии. В [138] указано, что стоимость электроэнергии является решающим исходным параметром, определяющим результаты технико-экономических расчетов и сравнений в системе тягового электроснабжения. Поэтому многих учёных стали интересовать вопросы поиска рациональных режимов работы систем электроснабжения тяги поездов с учётом возможности расчётов за электроэнергию по тарифам, дифференцированным по времени суток.

В [139, 140] разработана методика, алгоритмы и процедуры обработки данных о процессах электропотребления на тягу поездов и функционирования системы тягового электроснабжения, которые обеспечили реализацию основных функций анализа, обобщения и

представления в актуальной форме информации в интегрированной системе регулирования системой тягового электроснабжения. Показано, что существует значительный резерв энергосбережения на тягу поездов за счёт регулирования вагонопотоков с учётом стоимости электроэнергии, а также рационального перевода тяговых подстанций на переменные тарифы. Учет прогнозируемых объемов перевозок по периодам суток, времени движения поездов между станциями переработки грузов, состояний сортировочных станций позволяет, по крайней мере для некоторых электрифицированных участков, выполнить эффективное по стоимости регулирование электропотребления на тягу поездов.

Если дано N_T ТП, $i=1,2,\dots,N_T$, которые необходимо отнести к $C=(C_t^{(k)})=(C_1^{(k)}, C_2^{(k)}, \dots, C_{l_k}^{(k)})$ тарифам, то задача оптимального перевода ТП на дифференцированные тарифы может быть формализована в следующем виде [139, 140]:

$$K_1 = S_{(L)} = \sum_{k=1}^L [\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^{l_k} a_{ij}^{(k)} C_j^{(k)} X_{ik})] \Rightarrow \min_{X_{ik} \in D_X \cap D_P}, \quad (1.5)$$

$$D_X = \{ \sum_{k=1}^L X_{ik} = 1; i=1, \dots, N_T \}, X_{ik} \in \{0; 1\}, \quad (1.6)$$

$$D_P = \{ (i, j) : i, j \in N_T; \sum_{(i,j) \in D_N} P(X_{ik}, X_{jk}) = 0; P(\alpha, \beta), \alpha, \beta \in \{0; 1\}; k \in L \}. \quad (1.7)$$

где $C_j^{(k)}(t)$ - коэффициенты относительной стоимости электроэнергии по тарифу "k" на интервале суток t тарифной зоны j -й ;

$A^{(k)} = [\hat{a}_{ij}^{(k)}]$ - матрицы распределения потребления электроэнергии на тягу поездов в тарифных зонах;

X_{ik} - бинарная переменная. $X_{ik} = 1$, когда ТП с номером i проводит оплату электроэнергии по тарифу k .

Уравнения относят каждую подстанцию к одному тарифу, уравнения устанавливают, что ТП с номерами $(i, j) \in D_N$ должны принадлежать к одному тарифу $C_t^{(k)}$.

Применение данных мероприятий позволило для участка Никополь-Марганец Приднепровской железной дороги уменьшить стоимость потребленной электроэнергии на тягу поездов на 16% (при условии применения дифференцированных тарифов оплаты за потреблённую электроэнергию). Кроме того, были бы улучшены режимы работы энергосистем в пиковые часы.

Стоимость электроэнергии рассматривается как функция $C(x, t)$ в [140-145] для задач определения оптимальных режимов при осуществлении перевозочного процесса электротранспортом. Такой подход позволил исследовать совместно задачи выбора вариантов перевода тяговых подстанций на дифференцированный тариф оплаты и расчетов оптимальных режимов ведения поездов. Были разработаны методы решения задачи по расчету оптимальных режимов ведения поезда при переменной цене за электроэнергию при известных (прогнозируемых) матрицах ожидаемого потребления электроэнергии в различные периоды суток и методика расчета компромиссно-оптимальных режимов при отсутствии матриц ожидаемого потребления, представленные моделями векторной оптимизации.

Модель цены на электроэнергию для расчёта режимных карт в условиях ОРЭ может быть представлена в виде следующего выражения [141, 143]

$$C(x, t) = \{(N(M[c(x_k, t_1)], \sigma(x_k, t_1)), \dots, N(M[c(x_k, t_{24})], \sigma(x_k, t_{24})))\}_{k \in N_k}, \quad (1.8)$$

где $N(a, \sigma)$ – функция Гаусса, $M[*]$ – знак математического ожидания, x – координата пути, t – времени.

Было показано, что переход к дифференцированным тарифам для набора поездов дает возможность уменьшить стоимость оплаты электроэнергии на 3,8 % по сравнению с использованием единого тарифа.

В [141, 144] разработаны новые математические модели и методы, предназначенные для решения задачи по оптимальному переводу групп тяговых подстанций на дифференцированный тариф при известных матрицах прогнозируемого потребления (комбинаторная, стоимостно – технологическая модель, модель по регулированию переключениями тяговых подстанций). Методика расчетов позволила установить предельные объемы электропотребления на тягу поездов по зонам дифференцированных тарифов, при которых переход на дифференцированный тариф или условия ОРЭ эффективен по стоимости.

Разработанные в [14, 145-147] методы управления движением поездов при переменной цене электроэнергии внедрены и вошли в рекомендации стран ОСЖД по обеспечению энергооптимального процесса перевозок на основе информационных технологий управления системами электрической тяги (2003 г.).

Для обоснования рациональных режимов работы системы электроснабжения электротранспорта необходимо изучить установившиеся режимы её работы. Для этого необходимо промоделировать нагрузки поездов, которые получают в результате тяговых расчетов.

Большой вклад в разработку и совершенствование теории тяговых расчётов внесли такие учёные, как Б. Д. Воскресенский, О. Н. Исаакян, И. И. Васильев, Б. М. Максимович, В. Е. Розенфельд, Г. Г. Марквардт, Р. И. Мирошниченко, Д. А. Палей, Э. С. Почаевец.

В [148-165] предложены критерии и описаны научные основы оптимального управления поездами в процессе движения. Но в них при постановке задачи оптимального управления поездом не учитывались условия рыночных отношений, при которых основными показателями

рациональности выбора мощности ЭПС целесообразно считать минимум затрат энергоресурсов и времени на доставку грузов [166-168].

При тяговых расчётах удобно использовать универсальные тягово-энергетические характеристики [169, 170]. Их построение сделало возможным решение многих практических задач, например, задач по выбору рационального мощностного ряда тяговых подстанций при условии минимизации расходов и стоимости электроэнергии на осуществление перевозок, энергосберегающих режимов работы СТЭ. Предложенные универсальные предельные тяговые характеристики не зависят от массы состава и однозначно определяются двумя параметрами - расчетным подъемом и расчетной скоростью V_p . Это дало возможность определять оптимальную траекторию $V(S)$ по любому критерию, который не является функцией массы состава, без фиксации значения Q .

Решение задач определения рациональных режимов системы тягового электроснабжения электрического транспорта неразрывно связано с внедрением автоматизированных систем управления устройствами электроснабжения. В этом направлении интересны работы А. Л. Быкадорова. В [6, 171-173] на основе системного подхода теоретически обобщены и разработаны общие принципы организации автоматизированной системы управления тяговым электроснабжением на высоких уровнях иерархии и созданы на этой базе научные основы и методы решения прикладных задач энергодиспетчерских пунктов, технических отделов и отделов эксплуатации на уровнях служб, отделений и управлений дорог. Предложено решать задачу определения рациональных режимов в рамках автоматизированной системы управления устройствами электроснабжения. Выбор наиболее экономичного режима работы системы электроснабжения рекомендуется осуществлять с помощью имитационной модели (как на стадии проектирования, так и в условиях эксплуатации действующего участка). В качестве критерия оптимальности рассматривались потери электроэнергии в системе электроснабжения.

Задача определения рациональных режимов системы электроснабжения электротранспорта неразрывно связана с прогнозированием потребления электроэнергии. В этом направлении необходимо отметить работу [174], в которой было показано, что для повышения точности прогнозирования электропотребления в регламентируемые периоды необходимо выполнить построение структуры моделей прогнозирования в классе линейных динамических стохастических моделей. Данные модели основаны на принципе идентификации процессов электропотребления и перевозочного процесса.

Так, например, линейная однопараметрическая модель, связывающая расход электроэнергии на тягу поездов и перевозную работу выглядит так:

$$W_{\phi} = 19127 + 10,151 \cdot A_{\phi}, \quad (1.9)$$

где W_{ϕ} - фактический расход электроэнергии на тягу поездов, тыс. кВт·ч;

A_{ϕ} - перевозная работа, млн. т·км брутто.

В этой же работе была предложена структура построения модели автоматизированной системы управления приобретением и потреблением электроэнергии (АСУ ППЭ-У), которая включает в себя новые компоненты управления перевозками, электроподвижным составом, системой электроснабжения электротранспорта. Следует обратить внимание на тот факт, что в качестве целевой функции модели АСУ ППЭ-У предложена функция суммарных финансовых расходов на приобретение электроэнергии.

Проблемам управления устройствами электроснабжения тяги поездов при организации скоростного и тяжеловесного движения поездов посвящена работа [175]. В ней разработаны основные положения теории расчёта управляемого электроснабжения. Описано автоматическое принудительное перераспределение мощности параллельно работающим тяговым подстанциям для пропуска скоростных пассажирских поездов и грузовых поездов повышенной массы. Рассмотрены возможности технической реализации и

результаты эксплуатационных испытаний системы управляемого электроснабжения.

Вопросам применения энергосберегающих технологий на железнодорожном транспорте посвящены следующие зарубежные публикации [176-184].

В ряде работ рассмотрены вопросы определения рациональных уровней напряжений на шинах тяговых подстанций. Уровень напряжения в системе тягового электроснабжения играет существенную роль, пределы его изменения регламентированы соответствующими нормативными документами. От величины напряжения на токоприёмнике электровоза зависит скорость движения поездов и работа вспомогательного оборудования. Величиной напряжения определяются также потери энергии во всех элементах системы электрической тяги: тяговой сети, подстанциях, электровозах. При изменении напряжения потери энергии в составных элементах системы имеют различную тенденцию. Так, при уменьшении напряжения в системе снижаются магнитные потери в оборудовании подстанций и электровозов, уменьшаются удельные расходы на тягу поездов, зато увеличиваются электрические потери в тяговой сети и снижается скорость движения. Следовательно, возникает задача определения оптимальной величины напряжения в системе электроснабжения.

На тяговых подстанциях железных дорог установлены РПН, которые могут регулировать напряжение дискретно. Оптимизация напряжений на подстанциях с учётом дискретной природы их регулировочных множеств решена в [185]. В качестве критерия оптимизации выбран минимум приведенных затрат на перевозку грузов.

Современными СТЭ являются системы управляемого электроснабжения [186-188], которые могут решать следующие задачи: регулирование напряжения в контактной сети, сведение уравнивающих токов на фидерных зонах электрифицированных участков к минимальной величине, обеспечение надёжного рекуперативного торможения

автоматическим понижением напряжения на шинах соседних тяговых подстанций при переходе электровоза в режим рекуперации, ограничение допустимых токов нагрузки проводов контактной сети за счёт их перераспределения между соседними тяговыми подстанциями. Технической основой для создания управляемого электроснабжения послужило разработанное совместно с УЭМИИТом, производственным объединением Уралэлектротяжмаш им. В. И. Ленина, Свердловской ж.д. тяговое трансформаторное оборудование с бесконтактным автоматическим регулированием выпрямленного напряжения тяговых подстанций, шкафы автоматического регулирования напряжения типа ШАУН [189].

Б. А. Аржанников проанализировал зависимости КПД двигателей электровозов от скорости, рассчитанных при различных напряжениях. При этом был получен вывод, что при одной и той же скорости движения относительное изменение КПД на порядок меньше относительного изменения напряжения на токоприёмнике электровоза. Всё это дало основания считать, что в случае неизменного времени хода среднее значение КПД изменится на десятые доли процента при изменении напряжения на токоприёмнике от 3,0 до 3,6 кВ. Значит, при одинаковом времени хода расход электроэнергии тяговыми двигателями будет практически один и тот же при длительно допустимом напряжении на токоприёмнике электровоза в диапазоне 2 800-3 600 В [190]. Основываясь на таком выводе, в качестве критерия оптимизации напряжения на шинах тяговых подстанций был выбран минимум потерь электроэнергии в тяговой сети, которые явно зависят от электроэнергии потребляемой электровозом.

Внедрение и использование устройств автоматического регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций выявило противоречивый характер их влияния на технико-экономические показатели функционирования системы тягового электроснабжения. Например, при повышении напряжения на шинах тяговых подстанций Приднепровской железной дороги на 250 – 300 В техническая скорость движения поездов

увеличилась на 9 %, а удельный расход электрической энергии уменьшился на 14 % [191]. Статистическому анализу напряжений на шинах тяговых подстанций и токов фидеров посвящена работа [192]. В этой работе установлено, что при постоянной технической скорости увеличение среднего напряжения с 3,41 до 3,49 кВ ведет к увеличению удельного расхода электрической энергии на 0,7 %. В исследованиях [193], выполненных на Западно - Сибирской ж.д., показано, что при изменении напряжения устройствами автоматического регулирования при постоянном расходе электроэнергии скорости движения увеличились на 4-9 %.

Исследованиями, выполненными на Октябрьской ж.д., было установлено, что увеличение напряжения не приводит на действующих участках к пропорциональному увеличению средней и технической скоростей движения поездов [194]. В ряде случаев наблюдалась даже обратная зависимость - при увеличении напряжения скорость снижалась. В связи с вышеизложенным необходимо отметить, что скорость движения поездов зависит от многих, не связанных с напряжением, факторов - графика движения, поездной обстановки, ограничений по состоянию пути и т.д. [8]. В частности, расчетным путем было установлено, что при увеличении напряжения в случае наличия ограничения скорости расход электроэнергии увеличивается. Кроме того, напряжение на шинах тяговой подстанции зависит не только от величины тяговой нагрузки, которая носит стохастический характер, но и от изменения нагрузки нетяговых потребителей и отклонений напряжения питающей энергосистемы [76]. Поэтому при одной и той же тяговой нагрузке напряжение на шинах 3,3 кВ может быть различным, то есть нет однозначной зависимости между величиной тягового тока и напряжением на шинах 3,3 кВ. В связи с этим был сделан вывод, что поддержание на шинах тяговой подстанции наперед заданного стабилизированного уровня напряжения независимо от влияющих факторов является одной из причин противоречивости данных. В вышеупомянутой работе были разработаны принципиально новый алгоритм

регулирования напряжения и устройство для их реализации, которое способно функционировать в условиях неопределённости и случайности изменения влияющих факторов, учитывать вариации и обеспечивать при этом заданные размеры движения при минимизации расхода электроэнергии, то есть приспособляющийся "интеллектуальный", адаптивный регулятор напряжения.

С 2007 г. специалисты кафедры «Электроснабжение железных дорог» ДИИТа активно занимались анализом показателей качества электроэнергии на шинах тяговых подстанций в различных режимах с использованием современных измерительных комплексов Satес. Так, в [21] исследованы показатели качества электроэнергии в режиме рекуперации.

Развитию методов стабилизации напряжения на шинах тяговых подстанций посвящены работы [118, 195]. Созданные за последние десятилетия современные управляемые преобразователи [196-199], микропроцессорные системы управления, надежные радиоканалы связи позволили решать задачу стабилизации напряжения непосредственно на токоприемниках подвижного состава за счет подчиненного регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций. Центральным вопросом при создании такой системы стала разработка алгоритмов и методов построения устройства управления, обеспечивающего стабильность напряжения на токоприемниках поездов при резкопеременном электропотреблении. В качестве стратегической задачи управления рассматривалось обеспечение оптимальных уровней напряжения на токоприемниках поездов всего участка, в качестве тактической задачи - поиск закона изменения напряжения на шинах смежных тяговых подстанций, который бы обеспечивал нормированный уровень напряжения на токоприемниках подвижного состава.

В работах [118, 200] в качестве меры стабильности напряжения выбраны среднеквадратичное отклонение и коэффициент вариации .

Предложенный в [118, 201-203] принцип построения цифрового регулятора напряжения, в отличие от аналоговых, позволил обеспечить помехоустойчивость, быстродействие, стабильность параметров и надежность.

При регулировании напряжения происходит перераспределение потенциалов опор контактной сети и смежных сооружений. Этот факт необходимо учитывать при расчёте рациональных уровней напряжений на шинах тяговых подстанций [35, 36, 204]. В работах [15, 16, 30, 205-207] предложен модернизированный способ определения технического состояния опор контактной сети.

Качество напряжения на шинах тяговых подстанций также влияет на энергетическую эффективность всей системы электроснабжения тяги поездов. Для дорог постоянного тока наибольшее влияние на энергетическую эффективность оказывает число пульсаций выпрямителей. С ростом числа пульсаций кривой выпрямленного напряжения потери мощности в трансформаторах уменьшаются. Как показали расчёты, у 12-пульсовых выпрямителей КПД выше, чем у 6-пульсовых, на 0,4-0,5 % [208].

В [209, 210] описаны результаты экспериментальных исследований показателей качества электроэнергии на различных присоединениях тяговых подстанций. Установлено, что уровни питающих напряжений на шинах 110 кВ и 35 кВ превышают предельно допустимые значения. Показатели искажения синусоидальности напряжения на шинах 10 кВ тяговых подстанций с 6-пульсовыми выпрямителями не отвечают требованиям стандарта. В таких условиях перспективной является комбинированная идеология построения современных выпрямительных агрегатов, которые будут осуществлять функции активной фильтрации [211, 212]. В [213] показано, что использование преобразовательного агрегата мощностью 5 200 кВт вместо 12 500 кВт позволит уменьшить годовые потери электроэнергии на 80 тыс. кВт·ч (для тяговых подстанций со среднесуточной величиной переработки электроэнергии 100 тыс. кВт·ч).

Перспективным направлением снижения расхода электроэнергии на тягу поездов является применение рекуперативного торможения [21]. Опыт эксплуатации ЭПС показывает, что при рекуперации снижается износ устройств торможения.

К сожалению, не все тяговые подстанции имеют необходимое оборудование для приёма энергии рекуперации. Возможность энергосбережения за счёт рекуперации в существующих СТЭ, которые укомплектованы нерегулируемыми выпрямителями зависит от следующих факторов:

- конструкции ЭПС;
- наличия ЭПС, который может принимать энергию рекуперации;
- максимальной скорости поезда;
- параметров пути;
- расстояния между остановочными пунктами;
- электрических параметров контактной сети;
- уровня напряжений на шинах смежных подстанций.

Эффективным методом энергосбережения является также применение накопителей электроэнергии. Научно-практическим вопросам использования накопителей энергии на железнодорожном транспорте посвящены работы [214-220]. Накопители энергии могут, с одной стороны, принять избыточную энергию рекуперации, а с другой - накапливают энергию для последующего использования. На сегодняшний день разработаны следующие виды накопителей энергии – емкостные, аккумуляторные, сверхпроводящие и инерционные.

Методы энергосбережения, основанные на нормировании расходов электроэнергии

Научные основы определения норм удельных расходов электроэнергии разрабатывались ещё в 30-40-х годах прошлого века многими учёными. В [221] были впервые установлены зависимости между количеством

электроэнергии и технологическими параметрами объекта, предложены энергетические характеристики агрегатов и энергетических объектов.

В работах [222,223] заложены основы научного подхода к нормированию ТЭР, разработана целостная система классификации норм, их структура, предложены единицы измерения объёмов производства. Дальнейшее развитие теории нормирования и её практических приложений можно найти в работах [224, 225].

Все вышеперечисленные подходы базировались на представлении энергопотребления как детерминированного процесса. Однако из практики эксплуатации электрических сетей, и особенно тяговых сетей магистральных железных дорог, известно, что на процесс потребления энергии влияют многие внутренние и внешние факторы, которые в общем случае нельзя описать детерминированными выражениями. Поэтому вполне очевидным был переход от детерминированных основ нормирования потребления энергоресурсов к вероятностным.

Развитию вероятностно-статистического подхода к нормированию расходов электроэнергии было посвящено очень много публикаций. Большой теоретический и практический вклад внесли работы [226-228], в которых работах авторы использовали расчётно-аналитические или экспериментальные методы. Точность расчёта норм расхода электроэнергии повышалась за счёт применения регрессионного, корреляционного и дисперсионного анализа.

В последующем нормы расходов электроэнергии рассчитывались с помощью многофакторных регрессионных моделей [229-238]. Несмотря на все преимущества вероятностного подхода к определению норм расхода электроэнергии, система нормирования в СССР продолжала использовать расчётно-аналитические и экспериментальные методы определения норм. Применение расчётно-статистических методов разрешалось только в крайних случаях, когда использование других методов было невозможно.

Одним из ключевых недостатков системы нормирования потребления ТЭР в СССР был командно-административный подход. На недостатки системы нормирования в СССР ссылались многие авторы [233, 238-244]. Именно поэтому независимой Украине пришлось полностью создавать систему нормирования.

Современное состояние проблем контроля за эффективностью энергопотребления, нормирования потребления энергетических ресурсов в Украине системно показано в [244]. По мнению автора этой работы и исследований [245-247], система нормирования потребления ТЭР в Украине является ещё более несовершенной, чем при СССР.

В соответствии с нормативными документами, регулирующими в Украине систему нормирования ТЭР [248, 249], нормы удельных расходов ТЭР должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Быть технично и экономично обоснованными.
2. Учитывать конкретные условия производства, достижения научно-технического прогресса в соответствующей отрасли производства, планы мероприятий по энергосбережению, которые намечены на соответствующую перспективу.
3. Систематично пересматриваться с учётом изменений технического состояния оборудования, технологии и организации производства, производственных условий и т.д.

В работе [244] систематизированы основные недостатки большинства методик по нормированию потребления энергоресурсов:

1. Нормирование удельных расходов электроэнергии базируется на построении фактических энергобалансов (отсутствует процесс нормализации).
2. Расчёт фактических энергобалансов производится в условиях неопределённости исходных данных.
3. Отсутствует чёткая и объективная процедура контроля и анализа выполнения установленных норм.

Одним из главных недостатков системы нормирования ТЭР в Украине является тот факт, что нормирование удельных расходов ТЭР базируется на попытках получить баланс потребления электрической энергии сразу для всего предприятия или организации. Результаты расчёта такого энергобаланса пытаются максимально приблизить к фактическому среднему объёму потребления электроэнергии.

Нормирование удельных расходов ТЭР в системе железнодорожного транспорта осуществляется на основе государственных нормативных документов [248, 249], номенклатуры расходов [87] и отраслевых методических указаний по нормированию расхода ТЭР на различных предприятиях железнодорожного транспорта. Необходимо отметить большой вклад А. Н. Поплавского в разработку теоретических основ нормирования потребления ТЭР на предприятиях железнодорожного транспорта [250, 251].

Нормирование удельных расходов ТЭР на предприятиях железнодорожного транспорта Украины осуществляется в целях обеспечения рационального их использования и является основой экономического механизма энергосбережения. Также нормирование используется для прогнозирования объемов потребления ТЭР на предприятиях, железных дорогах, и в целом по Укрзализныце. В [59, 60] указывалось на недостатки действующей до 2006 г. системы нормирования удельных расходов ТЭР для стационарных потребителей Укрзализныци. Данная система нормирования базировалась на устаревших нормативных документах, принятых ещё МПС СССР [252-259]. Эти методические указания устарели и не учитывали многих структурных и технических изменений в стационарных потребителях магистральных железных дорог. Например, при нормировании расходов электроэнергии для пассажирской службы учитывались лишь вокзалы и не учитывались пассажирские вагонные депо, пункты технического обслуживания, для службы пути учитывались лишь дистанции пути и не брались во внимание, например, дистанции лесонасаждений, путевые

машинные станции. При планировании расходов электроэнергии на эксплуатационные нужды использовались эмпирические формулы, учитывающие географическую широту. Может быть это и было целесообразно в условиях СССР, но для железных дорог Украины, которые расположены на 48° - 52° географической широты, это стало неудобно. За годы независимости Украины изменился характер сезонности работы железных дорог в целом. Поэтому при участии автора диссертации были разработаны новые методические указания по расчёту удельных норм расхода электроэнергии для стационарных потребителей железных дорог Украины [86]. В [19, 20, 61] предлагаются подходы к определению норм расходов электроэнергии на собственные нужды тяговых подстанций, постов секционирования и пунктов параллельного соединения магистральных железных дорог.

Эффективность использования электроэнергии в стационарных хозяйствах Укрзализныци, сравнительно с нормой года, который рассматривается, оценивается ее экономией (-) или перерасходом (+) в процентах и определяется по формуле (1.10)

$$e_c = \frac{100}{W_{c_{\Sigma}}} (W_{счс_{\Sigma}} - W_{c_{\Sigma}} - W_{стор} - W_{нд}) , \quad (1.10)$$

где $W_{c_{\Sigma}}$ - расход электроэнергии по норме стационарными потребителями всех железных дорог, кВт·ч;

$W_{счс_{\Sigma}}$ - фактический общий расход электроэнергии всеми стационарными потребителями всех железных дорог, кВт · ч;

$W_{стор}$ - расход электроэнергии всеми железными дорогами для сторонних потребителей, кВт · ч;

$W_{нд}$ - расход электроэнергии потребителями всех железных дорог, которые не входят в систему железнодорожного транспорта, кВт · ч.

Снижение (-) или увеличение (+) удельного расхода электроэнергии, сравнительно с предыдущим или базисным годом, определяют по формуле (1.11) с учетом изменений степени технической оснащенности стационарного хозяйства железных дорог:

$$\Delta W = \frac{100}{\omega_{\text{с поп}}} \left(\omega_{\text{с роз}} \frac{k_{\text{м поп}}}{k_{\text{м роз}}} - \omega_{\text{с поп}} \right), \quad (1.11)$$

где $\omega_{\text{с поп}}$ и $\omega_{\text{с роз}}$ - удельные расходы электроэнергии для стационарных потребителей железных дорог соответственно за предыдущий или базисный год и год, который рассматривается, кВт·ч/10⁴ ткм брутто;
 $k_{\text{м поп}}$ и $k_{\text{м роз}}$ - коэффициенты, которые учитывают воздействие уровня технической оснащенности стационарного хозяйства железной дороги на смену удельного расхода электроэнергии соответственно в предыдущем или базисном годе и годе, который рассматривается.

Обоснование цели и постановка задачи исследования

1. В современных условиях железнодорожному транспорту необходимо искать резервы снижения себестоимости перевозочного процесса, чтобы эффективно конкурировать с другими видами транспорта. Энергосбережение и рационализацию технологических процессов во всех службах и хозяйствах железнодорожного транспорта можно рассматривать как главный внутренний резерв в ближайшей перспективе.

2. Анализ систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока Украины показал, что на современном этапе они работают в условиях либерализации рынка электроэнергии, значительного износа основного силового оборудования, неудовлетворительной энергетической и экономической эффективности. В настоящих условиях хозяйствования прежние методы энергосбережения, применявшиеся в период плановой экономики, являются малоэффективными. Поэтому необходима разработка методов энергосбережения, которые позволяют находить решение по

нескольким критериям при переменных во времени тарифах на электроэнергию, учитывая уровень надежности силового оборудования.

В связи с вышеизложенным целью данной диссертационной работы является развитие теоретических основ энергосбережения в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока для повышения их энергетической и экономической эффективности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить комплексный анализ состояния систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока по вопросам энергосбережения.
2. Разработать метод расчёта потенциала энергосбережения в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока с учётом системного эффекта.
3. Разработать математические модели надёжности силового оборудования, экономического ущерба от возможных отказов для задач регулирования режимов систем электроснабжения железных дорог постоянного тока.
4. Разработать математические модели надёжности силового оборудования, экономического ущерба от возможных отказов для задач регулирования режимов систем электроснабжения железных дорог постоянного тока.
5. Усовершенствовать метод расчёта систем электроснабжения тяги поездов в части дополнения его выражениями для расчёта потерь мощности в элементах тяговых подстанций.
6. Выбрать и научно обосновать метод решения задачи определения рациональных режимов систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока.
7. Усовершенствовать методы определения норм расхода электроэнергии на нужды стационарных потребителей в части разработки регрессионных зависимостей для их расчёта.

8. Разработать системные научно обоснованные подходы к определению норм расхода электроэнергии на собственные нужды тяговых подстанций, постов секционирования и пунктов параллельного соединения.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГИ ПОЕЗДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Оценка потенциала энергосбережения

Для успешного проведения энергосберегающей политики в СТЭ целесообразно изучить структуру технологических потерь электроэнергии в её элементах. Обобщённая структура потерь приведена на рис. 2.19. При осуществлении перевозочного процесса энергия теряется в устройствах контактной сети и тяговых подстанций. В устройствах контактной сети отдельно выделены потери от токов поездов и потери от уравнивающих токов, которые зависят от неравенства ЭДС тяговых подстанций, питающих межподстанционную зону. В тяговых подстанциях постоянного тока, имеющих две ступени трансформации, энергия теряется в понизительных и преобразовательных трансформаторах, вентилях, РС-цепях, шунтах, реакторах сглаживающих устройств. Часть электроэнергии, которую перерабатывает тяговая подстанция, потребляется на собственные нужды. Необходимо отметить, что не все потери электроэнергии можно изменить с помощью регулирования режимов СТЭ. Можно влиять лишь на уровень потерь электроэнергии в элементах контактной сети (путём перехода на различные схемы питания и регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций с помощью переключения РПН или применения вольтодобавочных устройств), в понизительных и преобразовательных трансформаторах (путём перехода в процессе эксплуатации на параллельную работу). Потери мощности в оставшихся элементах системы тягового электроснабжения не зависят от параметров режима системы электроснабжения, т.е. не возможно влиять на уровень потерь в этих элементах с помощью регулирования.

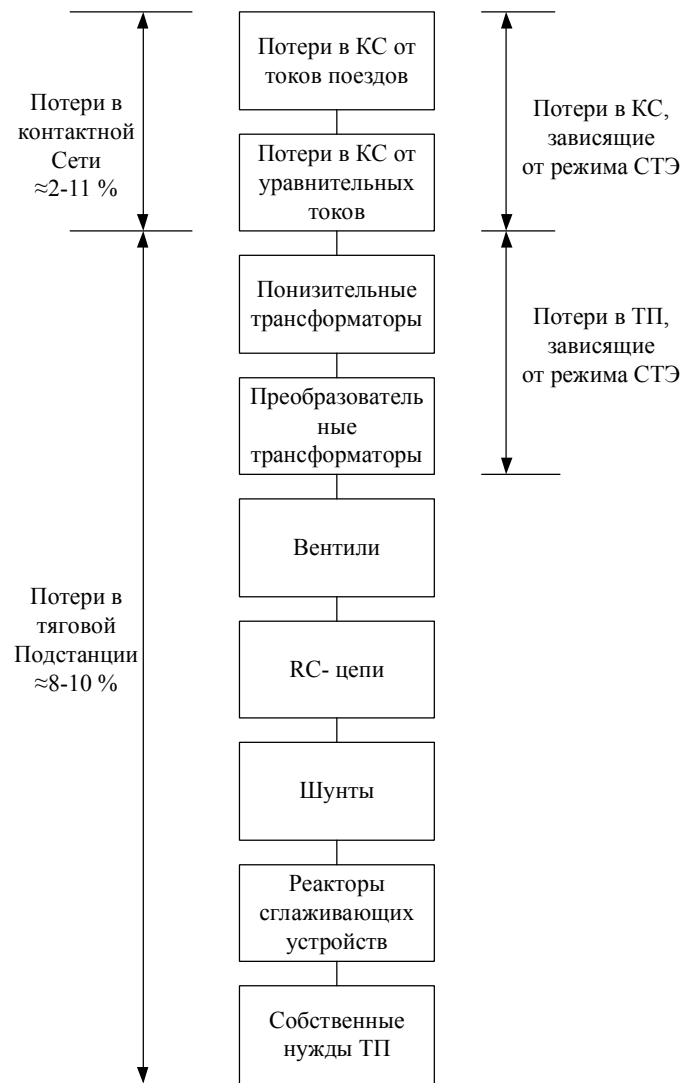


Рисунок 2.19 - Структура технологических потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения

В условиях постоянно растущих цен на топливно-энергетические ресурсы особого внимания требует задача повышения эффективности использования энергоресурсов и реализации энергосберегающей политики в отрасли железнодорожного транспорта Украины, что обуславливает актуальность научных исследований, направленных на её решение.

Первым этапом решения этой задачи является определение технического потенциала энергосбережения, который можно найти как для отдельного i -го энергосберегающего мероприятия на k -м, $k=k \in K$, элементе (объекте) рассматриваемой производственно-хозяйственной системы, так и для различных множеств таких мероприятий $i, i \in I$.

Этот потенциал может рассчитываться как в абсолютном выражении (2 .12), так и в относительных единицах (2 .13) [48]:

$$\Pi_{KI}^A = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left(K_j \cdot (W_{k_i}^B - W_{k_i}^P) \cdot T_{k_i} \right), \quad (2.12)$$

$$\Pi_{KI}^O = \frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left(K_j \cdot (W_{k_i}^B - W_{k_i}^P) \cdot T_{k_i} \right)}{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left(K_j \cdot W_{k_i}^B \cdot T_{k_i} \right)}, \quad (2.13)$$

где Π_{KI}^A , Π_{KI}^O - абсолютный и относительный потенциал энергосбережения;

$W_{k_i}^B$, $W_{k_i}^P$ - потребление ТЭР соответственно до и после реализации энергосберегающего мероприятия в условных единицах измерения (если рассматривается экономия более одного вида ТЭР). Если рассматривается только один вид ТЭР, то в этом случае потенциал может рассчитываться в натуральных единицах;

j - индекс вида ТЭР, $j \in J$;

K_j – коэффициент перевода натуральных единиц измерения в условные;

T_{k_i} - период времени, для которого рассчитывается снижение затрат ТЭР для соответствующего энергосберегающего мероприятия.

При использовании выражений (2 .12) и (2 .13) для k элемента системы может рассматриваться только одно энергосберегающее мероприятие из каждого альтернативного множества.

На практике наибольшее значение имеет определение экономически целесообразного потенциала энергосбережения и формирование на этой основе планов его реализации. Граничным условием экономической целесообразности реализации энергосберегающего мероприятия является, как минимум, равенство дополнительных затрат (инвестиционных, эксплуатационных и т.д.) за жизненный цикл, связанных с реализацией

такого мероприятия Z_{ki} и суммарной стоимости сэкономленных энергоресурсов за жизненный цикл его реализации, что формализуется в таком виде:

$$\Pi_{KI}^E = \sum_{t=1}^T (Z_{ki} - \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{jt} \cdot \Delta O_{kijt}) \geq 0, \quad (2.14)$$

где Π_{KI}^E - экономически целесообразный потенциал энергосбережения;

t - расчетный этап в периоде жизненного цикла;

j - индекс вида ТЭР;

C_{jt} - стоимость соответствующего вида ТЭР;

ΔO_{kijt} - объём сэкономленных ТЭР.

Необходимо отметить, что технологический и экономически целесообразный потенциал может изменяться - с течением времени, под влиянием научно-технического прогресса и экономической конъюнктуры. Однако изменения под влиянием этих факторов, как правило, происходят на протяжении достаточно длительного периода.

С учётом специфики решаемой задачи, показатель потенциала энергосбережения идентифицируется набором классификационных признаков, причем некоторые из них прямо зависят от особенностей исследуемой системы. Для определения потенциала энергосбережения систем электроснабжения железной дороги предлагается использовать набор классификационных признаков, который представлен в табл. 2.7.

В общем виде процесс оценки потенциала энергосбережения для железнодорожного транспорта включает следующие этапы:

- а) формулирование целей оценки потенциала энергосбережения;
- б) определение перечня объектов и соответствующих энергосберегающих мероприятий (множества K и I);

в) разработка алгоритмов оценки потенциала энергосбережения, который бы отражал специфику объекта и энергосберегающего мероприятия;

г) сбор необходимой информации для реализации соответствующих алгоритмов;

д) расчёт потенциала энергосбережения.

Таблица 2.7- Классификационные признаки потенциала энергосбережения на железнодорожном транспорте

Классификационный признак	Классификация				
Элементы (объекты) исследуемой системы	Система электроснабжения тяги поездов в целом	Дистанции электро-снабжения	Цехи, участки, тяговые подстанции, районы контактной сети	Технологические процессы	Установки, оборудование, машины и т.д.
Вид потенциала энергосбережения	Теоретический	Технически достижимый		Экономически целесообразный	
Тип энергосберегающего мероприятия	Организационно-технологический			Инвестиционный	
Вид ТЭР	ТЭР в целом	Группа ТЭР	Конкретный вид ТЭР		
Единицы измерения	Натуральные	Условные	Стоимостные		Относительные
Временной интервал расчета	Жизненный цикл энергосберегающего мероприятия		Определенный период жизненного цикла (год, месяц и т.д.)		
Уровень реализации	Прогнозный	Плановый		Фактический	

При решении практических задач по определению приоритетов реализации потенциала энергосбережения и формированию соответствующих планов необходимо учитывать наличие ограничений, прежде всего инвестиционных. Это связано с тем, что не всегда возможной оказывается реализация мероприятий с наибольшим технически достижимым потенциалом энергосбережения.

Поэтому, для решения таких задач необходимо применение оптимизационных моделей, которые в упрощенной постановке формализуются в следующем виде:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{n \in Nk} b_{kin} \Pi_{kin}^E \rightarrow \max, \quad (2.15)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{n \in Nk} b_{kin} = 1, \quad (2.16)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} Z_{ki} \leq Z^{sum}, \quad (2.17)$$

где n - индекс множества альтернативных энергосберегающих мероприятий;
 b_{kin} - булева переменная;
 Z^{sum} - общий объём средств на реализацию энергосберегающих мероприятий.

При освоении потенциала энергосбережения в первую очередь целесообразно реализовывать организационно-технологические энергосберегающие мероприятия, которые не требуют значительных затрат. Одним из них является реализация технически доступного потенциала снижения потерь для систем электроснабжения тяги поездов на постоянном токе за счёт согласованной оптимизации графика движения поездов и их схем электропитания.

Особенностью этого потенциала является то, что он зависит от уровня потерь при фактическом состоянии схемы электропитания и при оптимальной схеме:

$$\Pi_{KI}^E = F(k_i, N^{opt}) - F(k_i, N^{fact}), \quad (2.18)$$

где k_i - коэффициент интенсивности движения поездов, определяющий загрузку оборудования подстанций, неравномерность нагрузки и т.д.;

N^{opt}, N^{fact} - оптимальная и фактическая схемы электроснабжения соответственно.

Таким образом, этот потенциал может существенно изменяться с течением временем (является динамическим), что обусловлено его спецификой. Наряду с этим, специфическим для централизованных систем электроснабжения является наличие системного эффекта от снижения потерь на низших классах напряжения, т.к. это вызывает дополнительное снижение потерь на более высоких классах напряжения в питающих линиях электропередач и трансформаторах [260]. Величина этого дополнительного эффекта будет определяться характеристиками элементов, входящих в систему электроснабжения, а также всеми имеющимися между ними связями (рис. 2.20). При этом потенциал энергосбережения системы электроснабжения представляет собой совокупность потенциалов энергосбережения входящих в него элементов и может быть рассчитан как сумма значений потенциалов отдельных элементов.

Так, потенциал энергосбережения дистанции электроснабжения (ЭЧ) может быть определён по следующему выражению:

$$P_{эл}^{ЭЧ} = \sum_{i=1}^{n_1} P_{ЭЧci} + \sum_{j=1}^{n_2} P_{СЦБj} + \sum_{l=1}^{n_3} P_{КСl} + \sum_{k=1}^{n_4} P_{ТПk} + P_{ВН}, \quad (2.19)$$

где $P_{эл}^{ЭЧ}$ - электрический потенциал энергосбережения ЭЧ;

$P_{ЭЧci}$ - электрический потенциал энергосбережения i -го района электрических сетей (ЭЧС);

$P_{СЦБj}$ - электрический потенциал энергосбережения j -го участка сетей электроснабжения СЦБ (сигнализация, централизация и блокировка);

$P_{КСl}$ - электрический потенциал энергосбережения l -го участка контактной сети (КС);

$P_{ТПk}$ - электрический потенциал энергосбережения k -й тяговой подстанции (ТП);

n_1, n_2, n_3, n_4 – количество районов ЭЧС, участков питания устройств СЦБ, участков контактной сети и тяговых подстанций соответственно, которые структурно входят в рассматриваемую дистанцию электроснабжения;

$\Pi_{\text{вн}}$ – потенциал энергосбережения во внешней системе электроснабжения (системный эффект), обусловленный снижением потребности в электроэнергии у потребителей железной дороги.

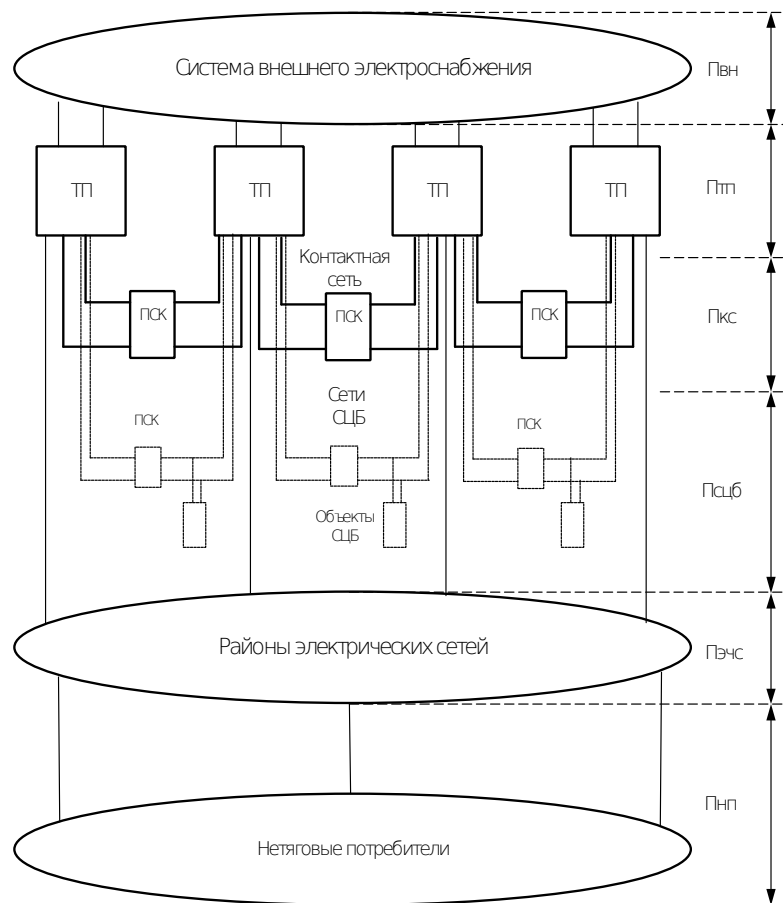


Рисунок 2.20 - Основные элементы системы электроснабжения потребителей электротранспорта и соответствующие потенциалы энергосбережения

Определение $\Pi_{\text{вн}}$ базируется на использовании коэффициента потерь во внешней системе электроснабжения и производится в рамках двухэтапной процедуры. На первом этапе из модифицированного выражения (2 .19), в

котором отсутствует последнее слагаемое, находят потенциал энергосбережения только от мероприятий на железной дороге $\Pi_{\text{жд}}$.

На втором этапе определяется $\Pi_{\text{вн}}$ из выражения

$$\Pi_{\text{вн}} = K_{\text{вн}} \cdot \Pi_{\text{жд}}, \quad (2.20)$$

где $K_{\text{вн}}$ – усреднённый коэффициент потерь в питающих линиях и трансформаторах системы внешнего электроснабжения.

Усредненные значения уровня потерь электроэнергии в контактной сети можно определить на основе экспериментально-аналитического подхода. Для этого используются значения экспериментально определенных потерь электроэнергии и расходов на отдельных участках железной дороги при организации опытных поездок с фиксацией расходов электроэнергии по счётчикам локомотивов и счётчикам тяговых подстанций, а также данные аналитических расчетов, выполненных с использованием выражений, приведенных в [261] для различных схем питания и разной интенсивности движения.

Величина потенциала энергосбережения в контактной сети от уменьшения уравнительных токов зависит от множества случайных факторов. Теоретически с помощью регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций можно полностью избавиться от потерь электроэнергии, вызванных уравнительными токами. Поэтому в данном случае потенциал энергосбережения равен потерям в контактной сети от протекания уравнительных токов.

На тяговых подстанциях постоянного тока в зависимости от интенсивности движения можно переключать на параллельную работу понизительные и преобразовательные трансформаторы [69]. Потенциал энергосбережения в тяговых подстанциях за счёт этих мероприятий зависит от коэффициента загрузки. Очевидно, что он будет равняться сумме потенциалов энергосбережения в понизительном и преобразовательном трансформаторах (если на тяговой подстанции применяется двойная трансформация). Для определения его величины необходимо вычесть

потери электроэнергии при однострансформаторном режиме из потерь электроэнергии при двухтрансформаторном режиме (при соответствующем коэффициенте загрузки). Запишем выражение для потенциала энергосбережения в трансформаторах тяговой подстанции постоянного тока с двойной трансформацией:

$$\Pi_{\text{тп}} = \Pi_{\text{тппт}} + \Pi_{\text{тптт}}, \quad (2.21)$$

где $\Pi_{\text{тппт}}$ - электрический потенциал энергосбережения в понизительных трансформаторах;

$\Pi_{\text{тптт}}$ - электрический потенциал энергосбережения в тяговых трансформаторах.

$$\Pi_{\text{тр}} = \frac{\Delta W_1(k_3) - \Delta W_2(k_3)}{\Delta W_1(k_3)}, \quad (2.22)$$

где $\Pi_{\text{тр}}$ - электрический потенциал энергосбережения в трансформаторах (понижительных или тяговых);

$\Delta W_1(k_3)$ - потери электроэнергии в трансформаторах при однострансформаторном режиме при соответствующем коэффициенте загрузки;

$\Delta W_2(k_3)$ - потери электроэнергии в трансформаторах при двухтрансформаторном режиме при соответствующем коэффициенте загрузки.

В качестве примера определим потенциал энергосбережения для тяговой подстанции, на которой применяется двойная трансформация. На данной подстанции установлены понизительный трансформатор ТДН-10000/110/11 $P_{\text{хх}}=18$ кВт, $P_{\text{кз}}=60$ кВт и преобразовательный трансформатор ТДП -12500/10ЖУ1 с параметрами $P_{\text{хх}}=16$ кВт, $P_{\text{кз}}=72,5$ кВт. Расчётный промежуток времени принимаем $T=24$ ч. Расчёты выполним в соответствии с [261]. На рис. 2.21 и на рис. 2.22 показаны графики изменения

электрического потенциала энергосбережения в преобразовательных и понизительных трансформаторах, рассчитанные по (2 .22).

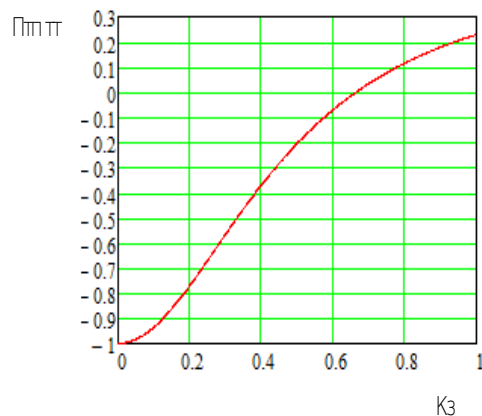


Рисунок 2.21 - График зависимости электрического потенциала энергосбережения в преобразовательных трансформаторах ТДП - 12500/10ЖУ1 от коэффициента загрузки

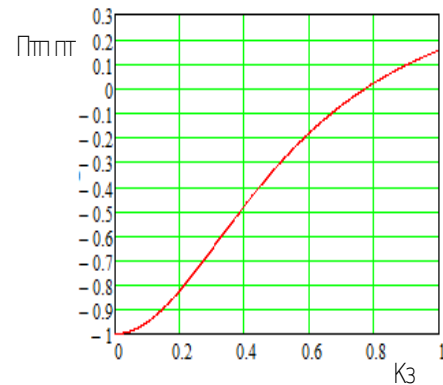


Рисунок 2.22 - График зависимости электрического потенциала энергосбережения в понизительных трансформаторах ТДН -10000/110/11 от коэффициента загрузки

Следует отметить, что отрицательные значения потенциала энергосбережения говорят о нецелесообразности применения двухтрансформаторного режима при низких значениях k_i . Очевидно, что переход на параллельную работу будет наиболее эффективным при максимально возможных коэффициентах загрузки трансформаторов. Для данного примера суммарный технический потенциал энергосбережения в трансформаторах составил 38,3 % при условии, что при максимальных значениях k_i использовалась однитрансформаторная схема. Умножение этого числа на величину средних потерь в оборудовании тяговых подстанций позволяет определить потенциал энергосбережения от такого мероприятия.

Потенциал экономии электроэнергии за счёт применения рациональной схемы питания при высоких значениях k_i приведён в табл. 2 .8 (при его низких значениях получаем по сути зеркальное отражение представленной в табл. 2 .8 ситуации).

Таблица 2.8 - Структура потенциала энергосбережения в элементах системы электроснабжения за счет оптимизации ее схемы

Наименование элемента системы электроснабжения		Величина среднего процента потерь активной энергии, %	Потенциал экономии электроэнергии, %
Тяговая подстанция при двухтрансформаторной схеме питания		8...10	1,5...4*
Контактная сеть	Параллельная	2 - 3	7 – 9**
	Узловая	3 – 4	6 – 8**
	Двухсторонняя	5.5 - 6.5	3.5 – 5.5**
	Консольная схема	10 - 11	–
	Потери от уравнивающих токов	4...5	4 ... 5
* - относительно однитрансформаторной схемы			
** - относительно консольной схемы			

Реализация этого потенциала требует создания специальных алгоритмов и методов согласованной оптимизации интенсивности движения поездов и схем электропитания и внедрения соответствующих организационно-технологических мероприятий на железнодорожном транспорте.

Рассмотрим методологические подходы к определению потенциала энергосбережения за счёт рациональной организации движения поездов. Данной проблематике посвящено множество работ [120, 139, 174, 262], однако, проблема исследования зависимостей потерь мощности в тяговой сети от неравномерности потока поездов до конца не решена. Для уменьшения потерь мощности в контактной сети за счет повышения качества управления транспортным потоком необходимо определить степень влияния каждого показателя потока поездов в отдельности на общую величину потерь мощности.

Средние потери мощности в контактной сети ΔP обычно определяются по аналитическим формулам [263]. Для двухстороннего питания фидерной зоны:

$$\Delta P = \frac{r l I_0^2 n_0^2}{12} \left(k_{\text{сп}}^2 + \frac{2k_{\text{э0}}^2 - 1}{n_0} \right), \quad (2.23)$$

где r - сопротивление 1 км тяговой сети, Ом;

l - расстояние между подстанциями, км;

I_0 - средний ток одного поезда;

n_0 - среднее количество поездов между подстанциями;

$k_{э0}$ - коэффициент эффективности одного поезда;

$k_{сп}$ - отношение коэффициентов $\frac{k_{эс}}{k_{эп}}$ или $\frac{k_{эс}}{k_{эт}}$ ($k_{эс}$ - коэффициент,

учитывающий переход от среднего к среднеквадратичному количеству

поездов за сутки; $k_{эп}$ - коэффициент эффективности нагрузки участка (в

поездах), характеризующий соотношение среднеквадратичного и среднего

количества поездов за исследуемый период; $k_{эт}$ - коэффициент

эффективности нагрузки участка (в поездах), характеризующий соотношение среднеквадратичного и среднего количества поездов в интенсивный период рассматриваемой продолжительности.

При узловой схеме питания

$$\Delta P = \frac{r l I_0^2 n_0^2}{32} \left(k_{сп}^2 + \frac{4k_{э0}^2 - 1}{n_0} \right). \quad (2.24)$$

Как известно, при протекании колеблющейся нагрузки в проводах контактной сети, а также в обмотках трансформаторов на тяговых подстанциях возникают потери энергии, которые определяются по среднеквадратичному (эффективному) току $I_э$, величина которого определяется по формуле:

$$I_э = \sqrt{\frac{\int_0^T i^2 dt}{T}}, \quad (2.25)$$

де i - мгновенное значение тока, А;

T - период протекания тока.

Коэффициент эффективности $k_э$ выражается следующим уравнением:

$$k_э = \frac{I_э}{I}, \quad (2.26)$$

Коэффициент эффективности одного поезда определяется на основании данных тяговых расчетов или по формуле:

$$k_{э0} = 1.04 \sqrt{\frac{t}{t_m}}, \quad (2.27)$$

$$t = \frac{\sum \alpha_p A_p}{\sum \frac{\alpha_p A_p}{t_p}}, \quad (2.28)$$

где α_p - доли поездов разных категорий;

A_p - расход энергии поездом данной категории на рассматриваемой фидерной зоне, кВт·ч;

t_p - время хода поезда по ограничивающему перегону при расчетном напряжении.

$$\alpha_p = \frac{n_i}{n_{пр}}, \quad (2.29)$$

где n_i - количество поездов каждой категории;

$n_{пр}$ - приведенное количество поездов.

$$n_{пр} = \sum n_{гр} + \varepsilon' n_{пс} + \varepsilon'' n_{сб}, \quad (2.30)$$

где $n_{гр}$, $n_{пс}$, $n_{сб}$ - количество соответственно грузовых, пассажирских и сборных поездов;

ε' и ε'' - соответственно коэффициент съема пассажирского и сборного поездов.

$$t_m = \frac{\sum \alpha_p A_p}{\sum \frac{\alpha_p A_p}{t_{mp}}}, \quad (2.31)$$

t_m - время хода поезда под током.

Средний ток для каждого поезда на фидерной зоне при разнотипных поездах определяется для каждого пути по формуле:

$$I_o = \frac{1}{Ul} \sum \alpha_p A_p v_p = \frac{1}{U} \sum \frac{\alpha_p A_p}{t_p}, \quad (2.32)$$

l - длина фидерной зоны, км;

v_p - средние ходовые скорости поездов данной категории на фидерной

зоне, км/ч;

t_p - время хода поезда по фидерной зоне.

В [23, 25, 26] проведен анализ графиков выполненного движения поездов на двухпутном участке Приднепровской железной дороги. В ходе исследования установлены пределы изменения коэффициентов:

$$k_{эс} = 1,09 \dots 1,3$$

$$k_{ин} = 1,55 \dots 2,2$$

$$k_{эт} = 1,005 \dots 1,18$$

$$k_{эп} = 1,01 \dots 1,03$$

$$k_{сп} = 1,08 \dots 1,26$$

Проанализируем пределы изменения потерь мощности в тяговой сети межподстанционной зоны постоянного тока при изменении коэффициента

$k_{сп}$ [28]. Исходные данные для расчёта представлены в табл. 2.9.

Таблица 2.9 - Исходные данные

г, Ом/км	l, км	I ₀ , А	n ₀	k _{эо}
0,058	12	1360	2	1,25

При принятых исходных данных потери мощности в контактной сети на межподстанционной зоне могут изменяться на 18,9 % для схемы двухстороннего питания и на 11,1 % для узловой схемы питания в зависимости от величины коэффициента $k_{\text{сп}}$, который характеризует неравномерность потока поездов на участке (рис. 2.23).

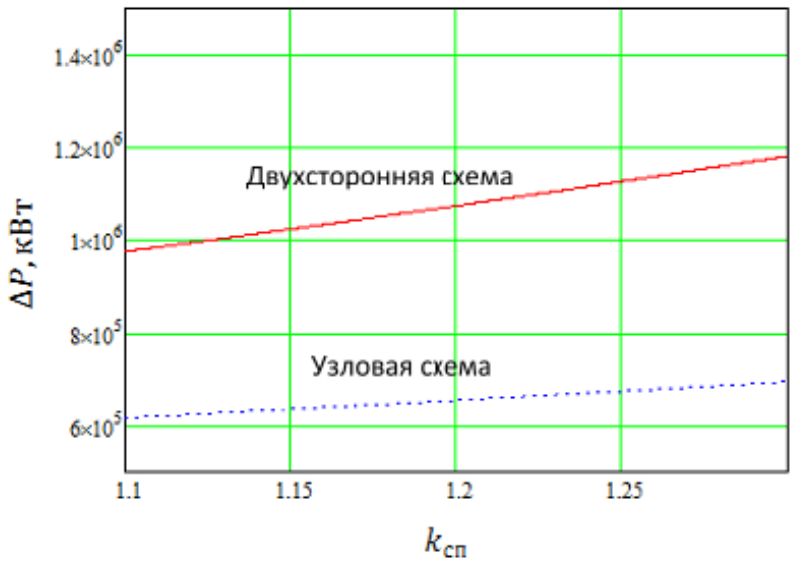


Рисунок 2.23 - Зависимость потерь мощности на межподстанционной зоне от коэффициента $k_{\text{сп}}$

Таким образом, установлены пределы изменения потерь мощности в контактной сети на межподстанционной зоне при изменении характеристик потока поездов. Это даёт возможность рассчитывать потенциал экономии электроэнергии за счёт рациональной организации перевозочного процесса.

Методология оценки объёмов сокращения ТЭР в системе электроснабжения тяги поездов постоянного тока магистральных железных дорог

Снижение технологического расхода электроэнергии в элементах

системы тягового электроснабжения будем рассматривать в двух срезах:

- снижение прямых потерь электроэнергии в элементах и сегментах системы тягового электроснабжения с напряжением 3,3кВ постоянного тока - 110 кВ переменного тока;
- системный эффект от реализации мер по снижению потерь электроэнергии на основе оценок прямого снижения потерь электроэнергии.

Будем учитывать все прямые снижения ТРЭ за счет инвестиционных энергосберегающих мероприятий, реализованных в системе электроснабжения тяги поездов.

Под инвестиционными будем понимать такие мероприятия, которые осуществляются согласно действующему законодательству за счёт средств железных дорог, а именно – прибыли и амортизационных отчислений.

Уровень потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения определяется многими факторами:

- электротехническими характеристиками системы электроснабжения;
- конфигурацией тяговой сети;
- организацией движения поездов;
- погодными условиями;
- характеристиками подвижного состава.

Это обуславливает постоянное изменение уровня потерь. Поэтому влияние энергосберегающих мероприятий на снижение этих потерь имеет две составляющие. Первая – это прямой эффект от реализации мероприятий, который определяется как разность потерь электроэнергии в отдельном элементе системы электроснабжения до и после реализации соответствующего мероприятия (проекта). Этот эффект рассчитывается по выражению

$$\Delta P_{it}^{пр} = \Delta P_{it}^{баз} - \Delta P_{it}^{пр.скор.}, \quad (2.33)$$

где ΔP_{it}^{np} - сокращение ТРЭ за расчетный период t , $t=1 \div T$, за счет реализации i -го мероприятия по снижению технических потерь. В качестве расчетного периода t принимается год, для которого рассчитывается снижения потерь;

$\Delta P_{it}^{баз}$ - ТРЭ в элементе системы тягового электроснабжения, который был бы при сохранении его в работе в t -м году. Рассчитывается при электротехнических показателях, которые существовали до реализации соответствующей меры по снижению потерь электроэнергии;

$\Delta P_{it}^{пр.скор.}$ - фактический ТРЭ в элементе системы тягового электроснабжения, который был в t -м году.

При определении уменьшения ТРЭ в t -м году $\Delta P_{it}^{баз}$ и $\Delta P_{it}^{пр.скор.}$ рассчитываются на основе фактических показателей коммерческих и технологических измерительных систем учета электроэнергии и контроля за работой системы электроснабжения в t -м году относительно значений показателей, которые характеризуют режимы работы системы электроснабжения.

Учет снижения ТРЭ за счет реализации энергосберегающих мероприятий в системе тягового электроснабжения осуществляется следующим образом. Для года, в котором мероприятие было реализовано, учитывается 50 % от прямого снижения, так как меры в течение года реализуются неравномерно [260], что обеспечивает достаточно корректную оценку эффекта от их реализации. В последующие годы это снижение учитывается в полном объеме.

Таким образом, общее сокращение прямого ТРЭ для года t определяется по выражению [260]

$$\Delta P_t^{np} = \sum_i^{i \leq t} 0,5 \cdot \Delta P_{it}^{np} + \sum_{t=1}^{t-1} \sum_{i=1}^{i \leq t(i \neq n)} \Delta P_{it}^{np} . \quad (2.34)$$

Второй эффект от осуществления мер по снижению ТРЭ – это системный эффект, который обуславливается комплексным влиянием реализованных мер на общее снижение ТРЭ в соответствующей энергетической системе. Этот эффект связан с более оптимальными режимами работы энергосистемы после реализации соответствующих мер и снижением потерь в сетях высшего степени напряжения, при реализации мер на низших степенях напряжения. Обозначенный эффект определяется по выражению

$$\Delta P_t^{\text{сист}} = (\Delta P_t^{\text{баз. заг. сист.}} - \Delta P_t^{\text{заг. сист.}}) - \Delta P_t^{\text{пр}}, \quad (2.35)$$

где $\Delta P_t^{\text{сист}}$ - снижение ТРЭ за счет системного эффекта от внедрения комплекса мер в t -м году;

$\Delta P_t^{\text{баз. заг. сист.}}$ - базовые общие ТРЭ в t -м году без учета реализации мер по ним снижению в системе электроснабжения;

$\Delta P_t^{\text{пр}}$ - общие ТРЭ в t -м году при учете реализации мер по их снижению в системе электроснабжения.

При расчетах $\Delta P_{it}^{\text{сист}}$ не учитываются мероприятия по повышению надежности электроснабжения путем учета изменений режимов работы сети по схемам, которые отличаются от схемы нормального режима, по которой рассчитываются годовые отчетные и нормативные потери электроэнергии и формируется годовой баланс электроэнергии. Это обеспечивает консервативность оценки уменьшения ТРЭ.

Полный эффект от реализации мер по снижению ТРЭ в системе тягового электроснабжения за год t может быть рассчитан согласно выражению:

$$\Delta P_t^{\text{загал.}} = \Delta P_t^{\text{сист.}} + \Delta P_t^{\text{пр}}. \quad (2.36)$$

Этот эффект может применяться, например, для расчетов снижения выбросов парниковых газов за счет уменьшения потребности в электроэнергии, которое определяется по выражению:

$$\Delta O_t^{CO_2} = EF_{CO\_2t}^{TEC.} \cdot \Delta P_t^{загал.}, \quad (2.37)$$

где $\Delta O_t^{CO_2}$ - общий объем сокращения выбросов CO_2 за счет уменьшения потребности в генерации электроэнергии на тепловых электростанциях, которые работают на органическом ископаемом топливе;

$EF_{CO\_2t}^{TEC.}$ - коэффициент выбросов парниковых газов в CO_2 экв. на один кВт·ч сэкономленной электроэнергии.

Для определения системного эффекта от реализации мер по снижению потерь электроэнергии в СТЭ постоянного тока на основе оценок прямого снижения потерь электроэнергии составлена специальная модель (рис. 2.24).

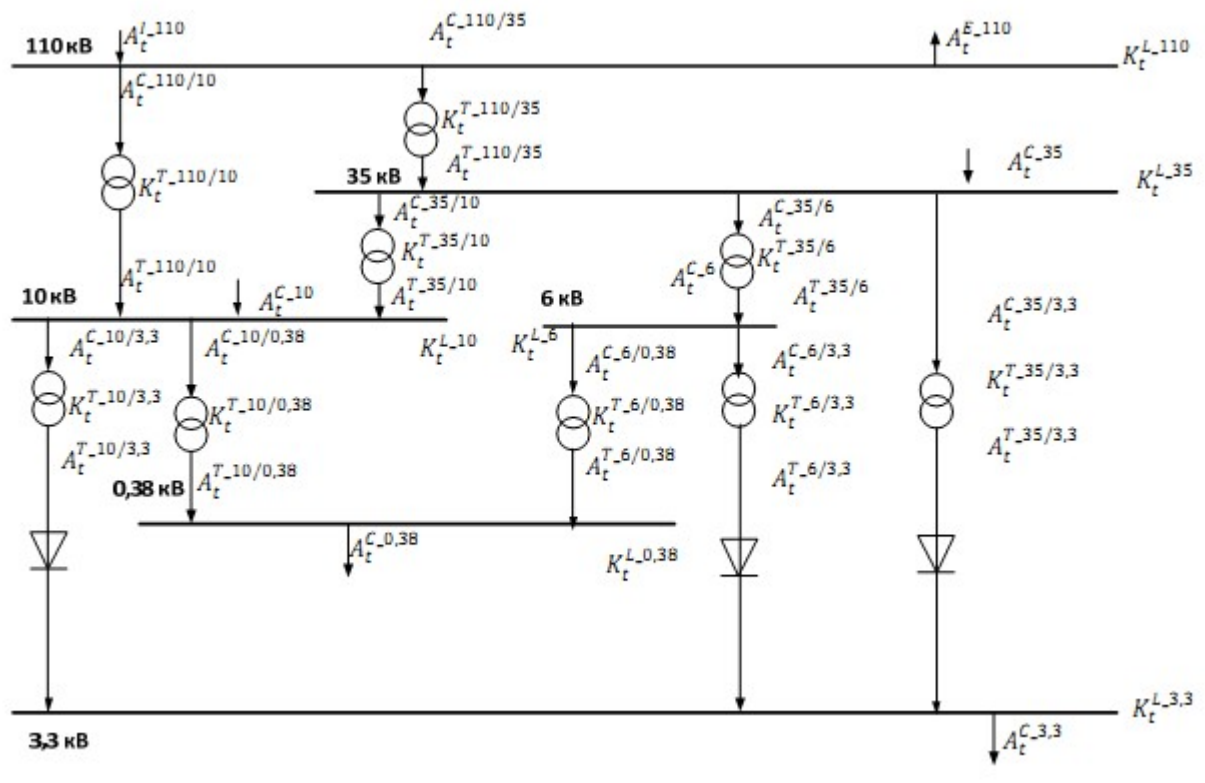


Рисунок 2.24 - Упрощенная схема представления системе тягового электроснабжения в модели

Выбросы ПГ, обусловленные системным эффектом при отсутствии новых или реконструкции существующих элементов, а также сегментов системы тягового электроснабжения в базовом сценарии, рассчитываются по выражению [49, 260].

$$BE_{t,system}^B = W_{t,system}^B \cdot EF_{CO\_2t}^{TEC}, \quad (2.38)$$

где $W_{t,system}^B$ – потери электроэнергии, обусловленные системным эффектом при отсутствии внедрения новых или реконструкции существующих элементов, а также сегментов системы тягового электроснабжения за период t базового сценария, кВт·ч;

$EF_{CO\_2t}^{TEC}$ – коэффициент эмиссии двуокиси углерода, т CO₂е/кВт·ч;

n, m — индексы, которые отвечают определенному классу напряжения из множества U , например $n=1$ отвечает классу напряжения 0,38 кВ; $n=2$ - классу напряжения 3 кВ и так далее; сопоставление между индексом m и множеством U аналогичные.

Объёмы электроэнергии, которые необходимо передать на протяжении данного периода времени к сетям данного класса напряжения A_t^C , нормативные коэффициенты потерь в линиях k_t^L , в трансформаторах k_t^T могут быть определены по отчётным формам 1ВТВЕ с использованием методологии, приведенной в [260].

Графовая модель системы энергосберегающих мероприятий

Для представления задачи выбора энергосберегающих мероприятий в удобном виде будем использовать графовую модель. Графовая модель даёт наглядную интерпритацию взаимосвязей в СТЭ [264]. Вершины графа

соответствуют характерным точкам СТЭ, а дуги (ветви), соединяющие эти вершины – энергосберегающим мероприятиям. В конечном итоге поиска будет найден путь от начальной вершины к целевой, соответствующей выбранному критерию принятия решения.

В [265] приведен пример определения пути между источником электроэнергии и потребителем на графе поиска, составленном для небольшой энергосистемы. Но структура СТЭ железных дорог более сложная.

Корневая вершина графа соответствует решению исходной задачи – повышение энергетической и экономической эффективности СТЭ электротранспорта; промежуточные вершины соответствуют подзадачам, а конечные вершины – элементарным подзадачам. Вершины данного графа могут принадлежать к двум типам:

- типа «и», или конъюнктивные, если решение поставленных в них задач непосредственно следует из возможности решения всех подзадач, определенных в дочерних или нижестоящих вершинах;

- типа «или» или дизъюнктивные, если решение поставленных в них задач следует из решения хотя бы одной подзадачи, поставленной в нижестоящих вершинах.

Сформулируем требования к структуре данного графа:

- верхняя вершина графа соответствует источнику электроэнергии (тяговые подстанции получают питание от районных подстанций энергосистемы);

- промежуточные вершины графа являются характерными точками системы электроснабжения, в которых происходит разделение потока электроэнергии (трансформаторные подстанции, контактная сеть, линии электропередачи);

- дуги графа представляют собой технические или организационные мероприятия, которые обеспечивают экономию электроэнергии при ее передаче или преобразовании на данном участке схемы. Заметим, что в

общем случае таких дуг может быть несколько. При этом возможные мероприятия по экономии электроэнергии на электроподвижном составе не рассматриваются.

Вершины графа должны иметь и организационное назначение – определять, сколько мероприятий (дуг графа) может быть использовано для снижения потребления электроэнергии электроприемниками или же сокращения потерь при передаче через рассматриваемый элемент системы электроснабжения. Дуга графа должна иметь оценку или несколько оценок, показывающих эффективность и затраты на моделируемое мероприятие. Вид графа приведен на рис. 2.25.

Дуги 18 определяют мероприятия по экономии электроэнергии в тяговой сети, которые сводятся к подбору наиболее рациональной схемы электроснабжения фидерной зоны:

- узловая схема электроснабжения (дуга 1);
- параллельная схема электроснабжения (дуга 2);
- консольная схема электроснабжения (дуга 3);
- двухсторонняя схема электроснабжения (дуга 4).

Дуги 58 определяют аналогичные мероприятия для противоположной фидерной зоны.

Каждое из этих мероприятий имеет свой эффект, который выражается как в уменьшении потерь электроэнергии, так и в стоимостном выражении. Из мероприятий 18 может быть применено только одно.

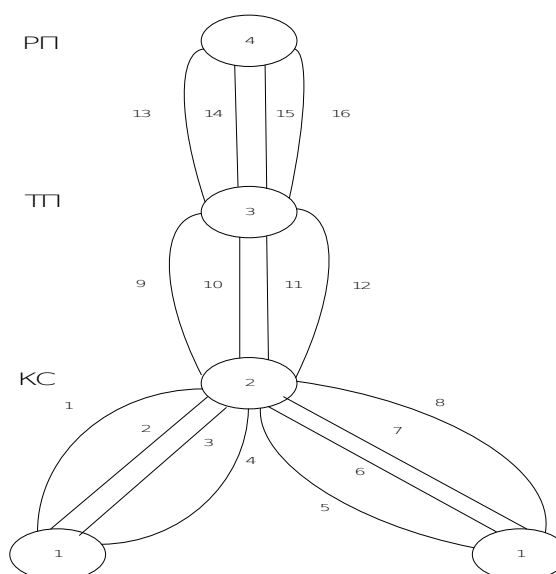


Рисунок 2.25 Граф системы электроснабжения электротранспорта для выбора энергосберегающих мероприятий

Дуги 912 определяют мероприятия, которые могут быть выполнены для повышения энергетических и экономических показателей системы электроснабжения на тяговой подстанции:

- переход на параллельную работу (или наоборот) выпрямительно-инверторных агрегатов (дуга 9);
- переход на параллельную работу (или наоборот) силовых понизительных трансформаторов (дуга 10);
- регулирование напряжения на шинах тяговых подстанций путём изменения коэффициента трансформации (дуга 11);
- регулирование напряжения вольтодобавочными устройствами.

На тяговой подстанции имеется возможность выбора от одного до всех мероприятий, перечисленных выше.

Дуги 1316 показывают возможные мероприятия по экономии электроэнергии в сетях внешнего электроснабжения:

- корректировка показателей транспортного потока (дуга 13);
- применение фильтрокомпенсирующих устройств (дуга 14);
- применение активных фильтров (дуга 15);
- применение компенсированных выпрямительно-инверторных агрегатов (дуга 16).

Представив процесс выбора энергосберегающих мероприятий в виде подобного графа, можно «пройти» от контактной сети к районной подстанции и определить получаемое при этом уменьшение потерь электроэнергии и экономический эффект. Это позволяет оценить по выбранным критериям эффективность рассматриваемых мероприятий.

Затраты и эффект можно определить при проходе по ветвям графа. Здесь возможны два случая: нижний уровень (замена технологии) - выбор одного варианта из нескольких; верхний уровень - выбор одного или нескольких альтернативных вариантов.

Порядок выбора альтернативных вариантов можно предложить следующий [266]:

- формирование множества альтернативных вариантов решения (альтернатив);
- формирование множества критериев оценки альтернатив;
- расчёт оценок альтернатив по каждому критерию;
- выбор лучшей альтернативы.

Методика решения задачи выбора энергосберегающих мероприятий

Объектом оптимизации является система электроснабжения электротранспорта. Энергосбережение направлено на повышение энергетических и экономических характеристик системы тягового электроснабжения. Рассматриваемые энергосберегающие мероприятия могут быть организационными и техническими.

Итак, задача выбора энергосберегающих мероприятий в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока заключается в выборе организационных или технических мероприятий, внедрение которых может обеспечить получение максимального эффекта. Эффективность тех или иных мероприятий будем рассматривать по нескольким критериям в соответствии с иерархией целей (рис. 1.17).

Пусть M представляет собой множество всех мероприятий по энергосбережению, которые можно применить в системе электроснабжения электротранспорта. Множество мероприятий по энергосбережению M имеет такое свойство, что некоторые мероприятия можно применять вместе, а некоторые только по одиночке. Поэтому разделим множество M на два непересекающихся подмножества M_1 и M_2 .

Положим, что множество M_1 включает в себя мероприятия, которые планируются в контактной сети. В результате из этого множества будет выбрано лишь одно мероприятие (это связано со спецификой схемы электроснабжения электротяги. Не возможно в один и тот же момент применить несколько схем электроснабжения). Множество M_2 будет включать те мероприятия, которые будут реализовываться в элементах тяговых подстанций (силовых и тяговых трансформаторах, в выпрямительно-инверторных преобразователях) и в сети внешнего электроснабжения.

Каждому мероприятию поставим в соответствие его стоимость и эффект от внедрения (который в общем случае выражается в сокращении потерь электроэнергии в конкретном элементе системы электроснабжения электротранспорта). Пусть множество M_1 содержит k мероприятий, а множество M_2 – l мероприятий. Введём обозначение: i – номер мероприятия по энергосбережению. Векторы $K_1(i)$ и $C_1(i)$ содержат стоимости и выходные эффекты от внедрения мероприятий из множества M_1 . Аналогично определим векторы $K_2(i)$ и $C_2(i)$. Рассмотрим также векторы $X_1(i)$ и $X_2(i)$, элементы которых принимают значение 1 в случае, когда мероприятие по энергосбережению принимается, и 0, когда мероприятие не принимается. Очевидно, что имеются ограничения на инвестиционные ресурсы. Этот факт учитывает третье выражение в (2.388). Общая сумма стоимости всех энергосберегающих мероприятий не должна превышать имеющихся в распоряжении предприятия средств K .

С учётом введённых обозначений концепция решения задачи выбора энергосберегающих мероприятий в системе электроснабжения

электротранспорта может быть сформулирована как последовательность следующих шагов:

1. Формирование множества энергосберегающих мероприятий для в системы электроснабжения электротранспорта.
2. Выбор из всего множества мероприятий альтернатив на основе метода анализа иерархий в соответствии с иерархией критериев.
3. Составление целевой функции, ограничений и граничных условий.

Математическая запись данной задачи имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} M = M_1 \cup M_2, \\ F(x) = \sum_{i=1}^k C_1(i) \cdot x_1(i) + \sum_{i=1}^l C_2(i) \cdot x_2(i) \rightarrow \max, \\ \sum_{i=1}^k K_1(i) \cdot x_1(i) + \sum_{i=1}^l K_2(i) \cdot x_2(i) \leq K. \end{array} \right. \quad (2.39)$$

Решение задачи (2.39) предлагается провести в 2 этапа в виде решения двух отдельных задач. Вначале в соответствии с иерархией целей формируется множество M (первая задача). Затем (вторая задача) в соответствии с предложенным графом системы электроснабжения производится выбор мероприятий для решения (2.39) [53].

Определим выходные эффекты энергосберегающих мероприятий. Предположим, что имеется математическая модель системы электроснабжения постоянного тока, в которой есть N подстанций, питающих линейный участок тяговой сети. В качестве меры эффективности мероприятий по энергосбережению будем рассматривать следующее выражение:

$$C = \left[\sum_{m=1}^T C_e(t_m) t_m \left(\sum_{i=1}^{N-1} (\Delta P_{Ti} + \Delta P_{yi}) + \sum_{i=1}^N \Delta P_{\Pi i} \right) + Y \right], \quad (2.40)$$

где $C_e(t)$ - стоимость электроэнергии, которая потребляется на перевозочный процесс;

ΔP_{Ti} - потери мощности в тяговой сети i -й зоны без учета уравнительных токов;

ΔP_{yi} -потери мощности в тяговой сети i -й зоны, вызванные неравенством электродвижущих сил подстанций;

$\Delta P_{\Pi i}$ - потери мощности в оборудовании i -й тяговой подстанции [267];

$У$ - ущерб, который учитывает ненадежность трансформаторов и переключающих устройств;

T - период времени, за который определяются затраты;

t_m - m -й интервал времени.

Рассмотрим выражение (2 .40). В нем содержатся факторы, влияющие на процесс принятия решения о выборе энергосберегающего мероприятия в соответствии с иерархией целей управления. Отметим, что для определения вектора C_1 в выражении (2 .40) учитывается только первая составляющая, стоящая в скобках, а при определении вектора C_2 - соответственно только вторая составляющая.

Разработка плана по энергосбережению предусматривает решение задач учета энергосберегающих мероприятий, их ранжирования и отбора в соответствии с имеющимися возможностями; ранжирования и выбора объектов внедрения; выделение технологических составляющих мероприятий; установление сроков, исполнителей, методов и средств контроля эффективности применения.

Ключевым элементом планирования является ранжирование мероприятий по энергосбережению и объектов их внедрения, что и является задачей данной работы. Анализ проблемы позволил выделить особенности, которые необходимо учесть при построении иерархии проблемы.

Структурно-организационная модель планирования, управления и выполнения мероприятий имеет три уровня: Укрзализныця, служба электроснабжения дороги и дистанция электроснабжения.

На уровне дистанции электроснабжения принимаются решения:

- о схеме питания контактной сети;
- установке вольтодобавочных устройств;
- модернизации контактной сети;

- переключении на параллельную работу силовых трансформаторов и преобразователей;
- регулировании напряжения на шинах тяговых подстанций;
- замене преобразовательных и силовых трансформаторов, выпрямителей и др.

На этом уровне все вопросы замены оборудования согласовываются с вышестоящими инстанциями, а вопросы регулирования режимов решаются энергодиспетчером с использованием устройств телемеханики.

На уровне службы электроснабжения принимаются решения:

- о переводе тяги поездов на высший уровень напряжения;
- выборе метода расчётов за электроэнергию (одноставочный тариф, дифференцированный тариф или оптовые цены) и др.

На уровне главка электроснабжения осуществляется:

- формирование технической политики хозяйства электрификации;
- распределение оборудования по дистанциям (в соответствии с заявками);
- контроль норм расхода электроэнергии;
- контроль эффективности мероприятий по энергосбережению и др.

Отметим, что количество альтернатив (мероприятий по энергосбережению, а тем более объектов внедрения) достаточно большое и значительно превышает возможности стандартного МАИ.

Особенность планирования мероприятий по энергосбережению состоит в необходимости их рассмотрения с позиций развития в пределах жизненного цикла (рис. 2.26) и учёта всех технологических аспектов мероприятий (рис. 2.27).

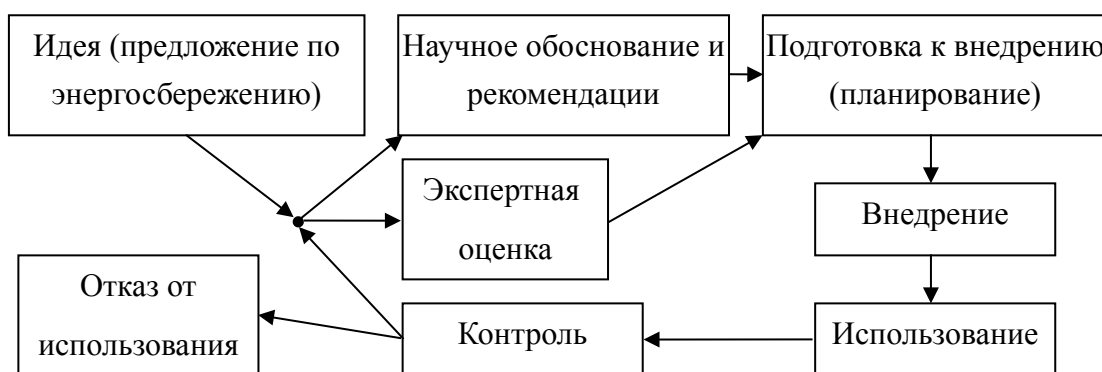


Рисунок 2.26- Жизненный цикл мероприятия по энергосбережению



Рисунок 2.27- Технологические составляющие энергосберегающих мероприятий

При планировании мероприятий по энергосбережению необходимо учитывать следующие факторы:

- степень готовности к исполнению. Если в структуре мероприятия преобладает организационная составляющая, то к внедрению можно приступить немедленно после принятия решения. Модернизация технических средств может задерживаться из-за тендерных процедур, необходимости изготовления уникальной техники и т. п.;

- затратность. При принятии решений необходимо учитывать потребности финансирования, его порядок и периодичность, возможности внеплановых затрат;

- вероятность достижения цели;
- ожидаемый экономический эффект;
- осуществимость или технические возможности внедрения. Этот фактор, в частности, учитывает сложность технических решений, наличие скрытых проблем, организационные возможности.

МАИ [266] предназначен для повышения объективности и обоснованности принятия решений в задачах выбора или ранжирования альтернатив. Метод заключается в последовательном построении иерархической модели проблемы, определении приоритетов элементов иерархии в виде матрицы предпочтений, синтезе глобальных приоритетов альтернатив в виде линейной свертки и проверке суждений на согласованность.

Наиболее сложным элементом метода является составление экспертом (экспертами) в предметной области матрицы предпочтений – определение степени приоритетности в каждой паре имеющихся альтернатив. Сложность заключается в том, что возможное отсутствие у эксперта развитого логического мышления, нечеткость информации об альтернативах часто приводят к несогласованности экспертных оценок.

Пусть имеется n альтернатив A_i , которые имеют объективную степень приоритетности w_i . Тогда превосходство альтернативы A_i над A_j $a_{ij} = w_i / w_j$. Задача МАИ - определить w_i по заданным экспертом значениям a_{ij} . Абсолютно согласованная матрица предпочтений должна обладать свойствами [268]:

- $\forall a_{ij} > 0; a_{ii} = w_i / w_i = 1$;
- обратной симметричности $a_{ij} = 1 / a_{ji}$ или $(w_i / w_j = 1 / (w_j / w_i))$;
- транзитивности $a_{ij} / a_{jk} = a_{ik}$ или $(w_i / w_j) / (w_j / w_k) = (w_i / w_k)$.

Добиться абсолютной согласованности экспертных оценок с одной стороны практически не возможно, а с другой – в этом нет необходимости. Саати [266] предложен метод определения отношения согласованности (ОС) матрицы предпочтений, который является количественной оценкой непротиворечивости экспертных сравнений.

Опыт показывает, что добиться допустимой согласованности сравнений (по ОС) также достаточно непросто. Подтверждение тому - выполненные вычислительные эксперименты тому подтверждение. При трех альтернативах количество возможных матриц предпочтения со шкалой,

предложенной Саати – 4 913 (17³) и только 1 116 (23 %) из них являются согласованными, при четырех альтернативах – 24 137 569 (17⁶) и 749 886 (3 %) соответственно.

МАИ не предусматривает процедур согласования оценок эксперта. Если индекс согласованности превышает допустимые пределы, эксперт по интуитивным представлениям может пытаться изменить оценки для повышения согласованности. Саати в таких случаях предлагает сменить эксперта, привлечь дополнительные данные или решать проблему другим способом.

Одним из выходов [268] является построение абсолютно согласованной матрицы, при этом задаются только базовые оценки, остальные вычисляют согласно свойству транзитивности. Однако проблема согласованности оценок эксперта при этом не решается, а просто камуфлируется.

Нами предлагается методика построения матрицы предпочтений, которая на каждом шаге инвариантно обеспечивает согласованность по допустимому уровню индекса согласованности – инвариантно-согласованный МАИ (ИС МАИ) [45].

Работа эксперта должна выполняться в программной среде, обеспечивающей возможность одновременного доступа к графическому элементу управления и двум представлениям матрицы предпочтений.

На рис. 2.28 приведен элемент управления для трех альтернатив.

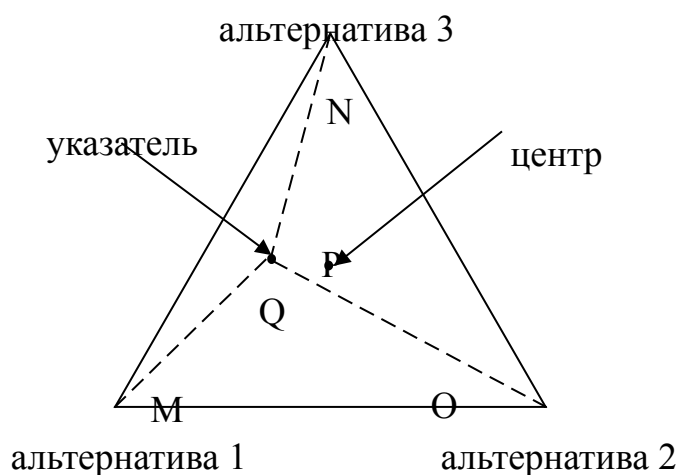


Рисунок 2.28 - Элементы интерфейса пользователя для сравнения альтернатив

Например, допустимые перемещения указателя из исходного расположения вершин показаны на рис. 2.28. Согласно заданным пользователем соотношениям формируются матрицы предпочтений в числовом (табл. 2.10) и семантическом представлении (табл. 2.11).

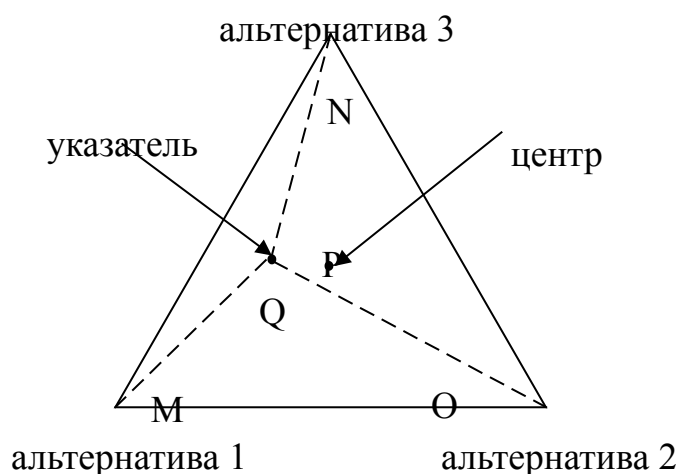


Рисунок 2.29 - Отметки, соответствующие согласованной матрице предпочтений

Для работы с представленным элементом управления эксперту необходимо знать единственное правило: чем ближе относительное положение указателя к некоторой вершине, тем соответствующая альтернатива предпочтительнее. Эксперт имеет возможность перемещения как указателя, так и вершин. Допустимые перемещения соответствуют согласованным матрицам предпочтения.

Таблица 2.10 - Матрица предпочтений в числовом представлении

Альтернативы	1	2	3
1	X	6	8
2	1/6	X	1/2
3	1/8	2	X

Таблица 2.11- Матрица предпочтений в семантическом представлении

	Готовность	Затратность	Эконом. эффект
Готовность	X	Превосходство между сильным и значительным	Превосходство между значительным и очень сильным
Затратность	X	X	Уступает меньше,

			чем умеренно
Эконом. эффект	X	X	X

Каждому возможному заполнению матрицы предпочтений соответствует допустимая точка на элементе управления, в которой минимизируется несогласованность предпочтений. Для каждого элемента рассчитывается :

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij} - \frac{s_{ij} - r_i}{s_{ij} - r_j})^2, \quad (2.41)$$

где F – функция несоответствия точки на элементе управления значениям матрицы предпочтений; s_{ij} – расстояние между вершинами, соответствующих альтернативам i и j ; r_i – расстояние между вершиной, соответствующей альтернативе i , и указательной точкой.

Ввиду того, что мероприятий энергосбережения достаточно много, а МАИ теоретически ограничено десятью альтернативами, а практически ранжирование 5-6 альтернатив может быть достаточно сложным, предлагается следующий алгоритм сортировки (ранжирования).

Особенность сортировки альтернатив по убыванию весов заключается в том, что веса альтернатив не обладают свойством транзитивности, они неизвестны, можно лишь установить их соотношения, которые, в свою очередь, изначально неизвестны и имеют субъективную составляющую.

Представим укрупненный алгоритм на псевдокоде:

выполнить:

- группировку альтернатив по 3-4 в группе, последовательно выбирая элементы исходного массива (формулы (2 .42), (2 .43));
- ранжирование ИС МАИ в каждой группе (формулы (2 .45)-(2 .47), (2 .54));
- повторно группировку альтернатив по 3-4 в группе таким образом, чтобы не было одинаковых групп в первой и повторной группировках (формулы (2 .42), (2 .44));

- ранжирование ИС МАИ в каждой группе (формулы (2 .45)-(2 .47), (2 .54));

цикл пока изменяется местоположение альтернатив в массиве *выполнить*:

- группировку альтернатив по 5-6 в группе (формулы (2 .42), (2 .43));
- сортировку альтернативы в группах согласно весам, для чего:
 - построить матрицу предпочтений (формулы (2 .45), (2 .46)), дополнив недостающие элементы матрицы;
 - *если* известных транзитивных отношений больше либо равно двух
 - *то* усреднением оценки в предположении выполнения свойства транзитивности (формула (2 .48));
 - *иначе* запросив у эксперта ИС МАИ подматрицы размерностью три (формулы (2 .49), (2 .50));
 - *если* матрица предпочтений не согласована
 - *то* преобразовать к ближайшей согласованной, незначительно изменяя дополненные элементы (формула (2 .51));
 - вычисление весов альтернатив согласно МАИ (формула (2 .52)) и сортировка (формулы (2 .53), (2 .54));
- повторно группировку альтернатив по 5-6 в группе, выбирая элементы в исходном массиве со сдвигом на три элемента (формулы (2 .42), (2 .44));
- сортировку альтернативы в группе как описано ранее (формулы (2 .45)-(2 .54)).

Уточним алгоритм формальными средствами. Будем обозначать ${}^k A_i$ – i -й элемент массива ${}^k \bar{A}$ на k -м шаге алгоритма, размерность массива ${}^k \bar{A} = n$; a_{ij} – элементы парных сравнений (степень превосходства альтернативы ${}^0 A_i$ над ${}^0 A_j$, согласно шкале относительной важности Саати). Элементы a_{ij} являются экспертными оценками и вначале $\forall a_{ij} = 0$.

Группировка альтернатив

$${}^k\bar{B}_i = [{}^k B_j, {}^k B_{j+1}, \dots, {}^k B_{j+{}^k n}], \quad (2.42)$$

где ${}^k B_j$ – j -я альтернатива r -й группы на k -м шаге алгоритма, чередуясь с МАИ, выполняется следующим образом:

$$k = 4I + 1 \ (I = 0, 1, 2, \dots): \ , \sum_{r=1}^{{}^k N} {}^k n = n \ ({}_0 n = 0), \ {}^k B_i = {}^{k-1} A_j, \ j = i + {}^k m, \ {}^k m = \sum_{i=0}^{r-1} {}^k i n; \quad (2.43)$$

$$k = 4I + 3: \ {}^k N = {}^{k-1} N - 1, \ {}^k n = {}^{k-2} n \ {}^k B_i = {}^{k-1} A_j, \text{ где } j = i + {}^k m + [{}^{k-1} n / 2], \quad (2.44)$$

где ${}^k N$ – количество групп на k -м шаге. Количество альтернатив в группах ${}^k n$ при $k = 1$ выбирается равным 3...4 (предпочтение трем), при $k > 4$ – 4...6 (предпочтение шести).

Для каждой ${}^k \bar{B}$ строится матрица предпочтений $\{{}^k b_{ij}\}$ и признаков $\{{}^k u_{ij}\}$

$${}^k b_{ij} = a_{pq}, \ p, q: ({}^k B_i = {}^{k-1} A_p \ \& \ {}^k B_j = {}^{k-1} A_q) \text{ и } {}^k u_{ij} = 0. \quad (2.45)$$

Матрица предпочтений $\{{}^k \tilde{b}_{ij}\}$ для группы ${}^k \tilde{B}_i$ в интерактивном режиме определяется экспертом на основе ИС МАИ

$${}^k b_{ij} = \mu_p \ \bar{\mu} = [1/9, 1/8, \dots, 1, 2, \dots, 9]. \quad (2.46)$$

Матрица $\{a_{ij}\}$ дополняется элементами, полученными от эксперта:

$$a_{ij} = {}^k b_{pq} \text{ при } {}^0 A_i = {}^k B_p \ \& \ {}^0 A_j = {}^k B_q. \quad (2.47)$$

При $k > 4$ выполняется дополнение матрицы $\{^k_r b_{ij}\}$ следующим образом:

если $^k_r b_{ij} = 0$ и $\exists v$ таких t_d , что $^k_r b_{it_d} > 0$ & $^k_r b_{t_d j} > 0$, то

$$^k_r b_{ij} = 1 / v \left(\sum_{l=1}^v (^k_r b_{it_d} / ^k_r b_{t_d j}) \right) \text{ и } ^k_r u_{ij} = 1.$$

(2.48)

Если после дополнения в матрице $\{^k_r b_{ij}\}$ остаются нулевые элементы, они определяются на основе ИС МАИ: формируется группа альтернатив $^k_r \tilde{B}_i = [^k_r \tilde{B}_1, ^k_r \tilde{B}_2, ^k_r \tilde{B}_3]$ так, что для $\forall ^k_r b_{ij} = 0 \exists ^k_r \tilde{B}_p = ^k_r B_i$. Матрица предпочтений $\{^k_r \tilde{b}_{ij}\}$ для группы $^k_r \tilde{B}_i$ в интерактивном режиме определяется экспертом на основе ИС МАИ с ограничениями, согласно данным ранее оценкам эксперта

$$^k_r \tilde{b}_{ij} = \mu_p.$$

(2.49)

Матрица предпочтений дополняется элементами, полученными от эксперта:

$$a_{ij} = ^k_r \tilde{b}_{pq} \text{ при } {}^0 A_i = ^k_r \tilde{B}_p \text{ \& } {}^0 A_j = ^k_r \tilde{B}_q.$$

(2.50)

Если в матрице $\{^k_r b_{ij}\}$ нет нулевых элементов, но она не согласована, выполняется ее согласование. Элементы $^k_r b_{ij}$, для которых $^k_r u_{ij} = 1$, изменяются

$$^k_r b_{ij} = ^k_r b_{ij} \pm ^k_r \delta_{ij} = (\mu_p / ^k_r b_{ij} + \mu_{p \pm q}),$$

(2.51)

где p такое, что $\mu_p = ^k_r b_{ij}$; $^k_r \delta_{ij}$ определяются полным перебором из условия минимума отношения согласованности при $q \leq 1$. Если минимум больше 0,1,

поиск ${}^k_r\delta_{ij}$ продолжается при $q \leq 2$, $q \leq 3$ и т.д. до согласования матрицы $\{{}^k_r b_{ij}\}$.

Согласно МАИ выполняется ранжирование альтернатив в группе. Для этого стандартным образом определяются веса:

$${}^k_r w_i = \frac{1}{{}^k_r n} \sum_{i=1}^{{}^k_r n} ({}^k_r b_{ij} / \sum_{j=1}^{{}^k_r n} {}^k_r b_{ij}). \quad (2.52)$$

Выполняется сортировка элементов в группах:

$$\forall {}^2_r B_i \exists {}^1_r B_i : {}^1_r w_j \leq {}^1_r w_i \leq {}^1_r w_k \text{ при } j < i < k \text{ и } 1 \leq i, j, k \leq {}^2_r n, \forall {}^2_r n = {}^1_r n. \quad (2.53)$$

Соответственно переставляются элементы и в массиве альтернатив:

$${}^k A_i = {}^{k-1} A_i, \text{ при } k=1,3,5,\dots; \quad {}^k A_i = {}^{k-1} B_q, \quad (2.54)$$

где p и q определяются из соотношений

$$i - {}^k_p m = \min_s (i - {}^k_s m), \quad q = i - {}^k_p m,$$

а s удовлетворяет неравенству $i - {}^k_s m > 0$.

Выводы к разделу 2

1. На основе комплексного подхода и системного анализа разработан метод определения потенциала энергосбережения для СТЭ постоянного тока, предложена его классификация. Показано, что потенциал энергосбережения в СТЭ железных дорог носит динамический характер, зависит от интенсивности движения поездов. Предложенный научный подход к определению потенциала энергосбережения позволяет:

- формализовать потенциал энергосбережения на железнодорожном транспорте;

- дать качественную и количественную характеристику каждому из видов потенциала энергосбережения;
- разработать алгоритмы определения потенциала энергосбережения.

2. Разработана методология определения снижения технологического расхода электроэнергии в элементах СТЭ при применении энергосберегающих мероприятий. Данное снижение рассмотрено в двух срезях:

- снижение прямых потерь электроэнергии в элементах и сегментах системы тягового электроснабжения с напряжением 3,3кВ постоянного тока-110 кВ переменного тока;
- системный эффект от реализации мер по снижению потерь электроэнергии на основе оценок прямого снижения потерь электроэнергии.

Такой подход позволяет определять не только энергетический и экономический эффект от применения энергосберегающих мероприятий, но и экологический эффект, который выражается в снижении выбросов CO_2 в атмосферу.

3. Предложена графовая модель СТЭ для наглядного представления системы энергосберегающих мероприятий, определения суммарного эффекта. Решение задачи выбора энергосберегающих мероприятий рекомендовано проводить в два этапа в виде решения двух отдельных задач. Вначале в соответствии с иерархией управления режимами системы электроснабжения производится отбор энергосберегающих мероприятий и формируется множество M (первая задача). Затем (вторая задача) в соответствии с предложенным графом системы электроснабжения производится выбор мероприятий.

4. Предложенная математическая модель выбора энергосберегающих мероприятий в СТЭ на основе усовершенствованного МАИ позволяет системно подходить к решению задач энергосбережения. Разработанный ИС МАИ обеспечивает согласованность экспертных оценок на всех этапах ранжирования альтернатив.

МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Точность исходных данных при применении энергосберегающих технологий в системе электроснабжения тяги поездов

Характер электрических нагрузок в системе тягового энергоснабжения является резко переменным как по количеству нагрузок, их величине, так и по месту приложения. Изменение этих нагрузок зависит от значительного ряда факторов, не все из которых можно учесть математически, поэтому для качественного проведения электрических расчетов необходимо наложить определенные ограничения на точность применяемых методов и формул и установить допущения, которые могут быть приняты или должны быть отвергнуты.

Нагрузки одного поезда, определенные тяговыми расчетами и являющиеся исходным материалом для электрических расчетов, являются приближенными по следующим основным причинам:

а) тяговые расчеты выполняются для определенного напряжения на пантографе электровоза, тогда как в действительности это напряжение все время меняется и в связи с изменением расстояния пантографа (токоприемника) от источника питания (подстанций), и в связи с изменением нагрузки поезда, вызванным переменной режима движения - скорости или профиля пути или других причин, и в связи с изменением величины нагрузки от других поездов на подстанцию, и вследствие изменения характеристик подстанций и питающих их систем внешнего энергоснабжения;

б) тяговые расчеты выполняются для определенного веса поезда и определенных условий сцепления, тогда как на практике вес прицепной части поезда у формально однотипных (с одной весовой нормой) поездов может отличаться на 10-15 % у разных поездов, а коэффициент сцепления в зависимости от климатических условий может меняться в еще более широких пределах (25-30 %);

в) методы ведения поездов у различных машинистов весьма различны и поэтому условия энергопотребления в значительной степени зависят от того, какие машинисты ведут поезда на участке.

Имеются еще и другие факторы, некоторые из которых в дальнейшем при электрических расчетах возможно учесть специальными коэффициентами. Однако и сказанного достаточно, чтобы подвергнуть сомнению точность тяговых расчетов. Тем не менее, если определить степень их практической точности, то эта точность (точность исходных данных) может быть положена в основу дальнейших требований к точности электрического расчета.

Применение методов теории вероятности для расчетов системы тягового энергоснабжения (о чем говорится в соответствующих разделах) позволяет определить параметры этой системы с любой степенью точности, однако чем выше точность расчетов, тем эти расчеты более сложны и трудоемки. Поэтому следует установить необходимые и достаточные границы уточнений. Например, определяя мощность тяговой подстанции с точностью даже до 10 кВт, мы принимаем решения об установке дополнительного агрегата мощностью 2 500 кВт, который к тому же еще допускает 20 %-ную перегрузку в течение определенного времени. По-видимому, в этом случае достаточно определять мощность подстанции с точностью 350-500 кВт, т. е. порядка 15-20 %. Также, проверяя сечение контактной подвески по нагреванию, нет необходимости определять эти токи с точностью до 5-10 А, так как, переходя к следующему большему сечению путем использования даже провода ПБСМ-70, мы увеличиваем пропускную способность подвески сразу на 100 А. И в этом случае, как и при определении токов короткого замыкания, уточнения, которые дают изменение результатов менее чем на 100-120 А, могут не учитываться.

Модели тарифов за потреблённую электроэнергию

На современном этапе развития экономики Украины экономические отношения между производителями электроэнергии, компаниями,

передающими электроэнергию, и потребителями регулируются тарифами на электроэнергию. Установление научно обоснованных тарифов на электроэнергию является одним из самых эффективных методов управления в электроэнергетике. Тарифы на электроэнергию должны:

- включать все виды затрат на производство, передачу, распределение электроэнергии, развитие сетей;
- стимулировать потребителей к выравниванию своего графика потребления электроэнергии, уменьшению потребления электроэнергии в пиковые часы;
- обеспечивать прозрачность измерений и расчётов за электроэнергию;
- способствовать снижению затрат, связанных с технологическими потерями электроэнергии.

У железных дорог существует возможность выбирать метод расчёта за электроэнергию (по одноставочным тарифам; по тарифам, дифференцированным по зонам суток) и закупать электроэнергию на оптовом рынке. Ставка тарифа для каждого периода времени определяется путем умножения установленного розничного тарифа для потребителей соответствующего класса на тарифный коэффициент. Для определения границ периодов по часам суток (ночного, полупикового и пикового), установлены четыре сезона: 1-й – ноябрь, декабрь, январь, февраль; 2-й – март; 3-й – апрель, май, июнь, июль, август; 4-й – сентябрь, октябрь. Границы периодов по часам суток для каждого сезона устанавливаются соответствующими службами НЭК «Укрэнерго» по согласованию с НКРЭ. Для определения уровня ставок тарифов, дифференцированных по периодам времени, для каждого периода (ночной, дневной, полупиковый, пиковый) и всех сезонов установлены следующие тарифные коэффициенты и длительность периодов (табл. 3.12) [269].

Таблица 3.12- Тарифные коэффициенты

Период времени	ночной	дневной	полупиковый	пиковый
Двухзонные тарифы, дифференцированные по периодам времени				
Тарифные коэффициенты	0,4	1,5	-	-

Продолжительность периода, ч	8	16	-	-
Трёхзонные тарифы, дифференцированные по интервалам времени				
Тарифные коэффициенты	0,35	-	1,02	1,68
Продолжительность периода, ч	7	-	11	6

Согласно факсограммы НЭК "Укрэнерго" от 08.12.2010 г. № 04/11633, для расчетов потребителей (кроме населения) за электрическую энергию по тарифам, дифференцированным по периодам времени на расчетный месяц, устанавливаются следующие границы тарифных зон:

По трёхзонным тарифам:

- пиковая зона 8.00-10.00; 17.00-21.00;
- полупиковая зона 6.00-8.00; 10.00-17.00; 21.00-23.00;
- ночная зона 23.00 - 6.00.

По двухзонным тарифам:

- дневной период 7.00-23.00;
- ночной период 23.00-7.00.

Приверженность к старым методам принятия решений (опирающимся на одноставочные тарифы) приводит зачастую к завышенным потерям материальных ресурсов. Сегодня экономное расходование энергоресурсов, внедрение энергосберегающих технологий является для Укрзалізнички одним из главных путей снижения себестоимости перевозок. Здесь, по нашему мнению, возникает проблема стимулирования энергосбережения на предприятиях и в отраслевых службах Укрзалізнички. Энергосберегающие мероприятия внедряются в линейных предприятиях всех служб железных дорог, а результат виден лишь в тяговых сетях и сетях нетягового электроснабжения, которые эксплуатируются линейными предприятиями служб электрификации и электроснабжения.

Принятая в Украине концепция функционирования и развития ОРЭ [98], которая закреплена Законом Украины «Об электроэнергетике» и многочисленными актами Кабинета Министров Украины, предусматривает рыночное формирование цен на электрическую энергию. Розничные цены на

электроэнергию формируются энергоснабжающими компаниями в соответствии с Условиями и Правилами осуществления предпринимательской деятельности по поставке электрической энергии по регулируемому тарифу. Для всех групп потребителей, кроме населения, розничные тарифы рассчитываются по рыночной формуле, которая предусматривает возмещение затрат энергоснабжающих компаний на осуществление закупки электроэнергии на рынке по оптовой цене (цена учитывает расходы на производство электроэнергии, содержание магистральных сетей и услуги по диспетчеризации), а также на передачу электроэнергии сетями компании и поставку её потребителю. Следует отметить, что при передаче электроэнергии в сетях часть её теряется. Для возмещения стоимости потерь при транспортировке электроэнергии закупочная цена электрической энергии корректируется на коэффициент нормативных технологических потерь электроэнергии. При этом при поставке электроэнергии бытовым потребителям потери электроэнергии намного больше, чем при обеспечении электроэнергией промышленных потребителей. Безучётное потребление электрической энергии в бытовом секторе (в том числе воровство) приводит к тому, что фактические потери электроэнергии превышают нормативные и энергоснабжающие компании несут убытки. Тариф для населения ниже необходимого и возмещает только 60 % реальных затрат энергетических предприятий. Это связано с неизменным тарифом на электроэнергию для населения при значительных инфляционных процессах в прошлые годы. Разница в тарифах для населения между фиксированным и рыночным уровнями покрывается за счёт промышленности, транспорта, бюджетных организаций и других потребителей.

Затраты энергоснабжающих компаний на передачу электрической энергии электрическими сетями определяются по классам напряжения для обслуживания и содержания отдельно линий электропередач и местных сетей. Нормативные затраты на передачу электрической энергии

рассчитываются по удельным нормативным затратам и исходным данным энергоснабжающих компаний, которыми являются объёмы электрических сетей в физических единицах измерения, их техническая характеристика и структура в условных единицах, балансовая стоимость основных фондов по группам основных фондов, приведенным по классам напряжения.

Некоторые железные дороги (в частности Юго-Западная, Донецкая и Приднепровская) также получили лицензию на поставку электрической энергии по регулируемому тарифу, что предполагает предоставление электрической энергии потребителю с помощью собственных электроустановок лицензиата на основании договора и по тарифам, которые формируются согласно Условиям и Правилам осуществления предпринимательской деятельности по поставке электрической энергии по регулируемому тарифу.

Модели надёжности переключающих устройств и трансформаторов

Анализ надёжности силового оборудования, задействованного в управлении режимами систем электроснабжения постоянного тока

Эффективность управления режимами систем электроснабжения электротранспорта существенно зависит от достоверности результатов расчетов. Для получения показателей надёжности регулировочных устройств в процессе эксплуатации необходимо контролировать ряд параметров, которые влияют на процесс износа коммутационного и регулировочного оборудования. Существует два подхода к определению характеристик надёжности силового оборудования, участвующего в управлении режимами систем тягового электроснабжения. Первый подход основан на изучении физических процессов в регулировочных устройствах, физической природы отказов. При втором подходе во внимание берутся статистические характеристики появления отказов однотипных устройств. Отказы рассматриваются при этом как случайное событие, не связанное

непосредственно с параметрами устройств. В хозяйстве электроснабжения и электрификации Укрзалізниця організований збір інформації про відмови силового обладнання на основі [270]. Безумовним недоліком даного підходу до визначення показників надійності є обезличивання силового обладнання, задіяного в регулюванні режимів системи тягового електропостачання. Більш достовірну інформацію можна отримувати, маючи залежності показників надійності обладнання від їх фізичних параметрів, з однієї сторони, і від показників експлуатаційних навантажень, з іншої сторони. Але, на жаль, існуюча практика збору інформації про надійність силового обладнання в дистанціях електропостачання, існуючий рівень систем діагностики не дозволяють на сьогоднішній день в повній мірі використовувати перший підхід до визначення показників надійності силового обладнання. В регулюванні режимів системи тягового електропостачання бере участь наступне обладнання:

1. Високовольтні вимикачі змінного струму.
2. Роз'єдинники.
3. Швидкодіючі вимикачі постійного струму.
4. Прилади регулювання напруги під навантаженням або вольтдобавочні пристрої.

Високовольтні вимикачі змінного струму. В пристроях електропостачання залізничних доріг найчастіше застосовуються масляні, элегазові і вакуумні вимикачі. Діелектрична міцність масла знижується з ростом числа відключень коротких замикань. З часом розвивається підгар контактів вимикача. Це призводить до наступного збільшення перехідного електричного опору.

Діелектричну міцність масла і фактичний знос контактів в процесі експлуатації важко контролювати. Тому в дистанціях електропостачання знайшло застосування інтегральний параметр - сума

отключаемых токов. Для измерения суммы отключенных токов применяется сумматор ФСТКЗ-76. Вакуумные выключатели по сравнению с масляными и элегазовыми имеют больший ресурс по отключениям, отсутствует необходимость в их ревизиях и ремонтах. Коммутационный ресурс выключателей переменного тока колеблется в пределах 250-400 в зависимости от типа выключателя. К сожалению, нет систематического научного исследования по надёжности коммутационного оборудования систем электроснабжения железных дорог. Однако множество публикаций было посвящено надёжности коммутационного оборудования в системах внешнего электроснабжения [182, 271- 273]. В [273] показано, что параметр потока отказов коммутационного оборудования имеет сложную структуру, которая кроме того, зависит от длительности эксплуатации оборудования и приводит к многократным разбросам значений рассматриваемого параметра: в 2–6 раз по компонентам и в 4–5 раз по сроку эксплуатации.

Разъединители. Характер физических процессов деградации разъединителей при их эксплуатации зависит от места установки (наружная или внутри помещения).

В процессе эксплуатации у разъединителей систем тягового электроснабжения могут наблюдаться [274]:

- ослабление крепления контактов на изоляторах;
- смещение подвижного контакта относительно оси неподвижного;
- ослабление соединения шин с неподвижным контактом, заземления с разъединителем;
- изменение плотности соприкосновения подвижного и неподвижного контактов, допустимые значения вытягивающего усилия не должны превышать заданных значений;
- разновременность касания ножей с губками трехфазного разъединителя, граница поля допуска - 3 мм;
- отклонения времени замыкания и размыкания блок-контактов;

- излом пластин гибкой связи вала заземляющих ножей с каркасом разъединителя;
- эрозия, коррозия и окисление мест контакта ножа и губки;
- загрязнение и растрескивание изоляторов.

Для описания надёжности разъединителей обычно используются следующие показатели [274-276]:

- средняя наработка на отказ (циклов включение-отключение) в среднем не менее 2 000;
- механический ресурс разъединителей и приводов (циклов включение-отключение) – в среднем не менее 10 000;

Для построения модели надёжности переключающих устройств в задачах управления режимами системы тягового электроснабжения в качестве показателя надёжности разъединителей наиболее подходит средняя наработка на отказ.

Быстродействующие выключатели постоянного тока. В хозяйстве электроснабжения и электрификации железных дорог Укрзализныци эксплуатируются выключатели АБ-2/4, ВАБ –28, ВАБ-43, ВАБ-48, ВАБ-206. Быстродействующие выключатели имеют наибольшее число повреждений среди оборудования тяговых подстанций постоянного тока. Процесс гашения дуги постоянного тока более сложный, чем дуги переменного тока. На постоянном токе нельзя погасить дугу в момент перехода тока через нуль в какой-либо специальной среде. Для улучшения дугогашения в системе тягового электроснабжения железных дорог для фидеров применяют последовательное включение выключателей постоянного тока.

В качестве показателя наработки, который определяет техническое состояние быстродействующего выключателя, удобно использовать количество отключений и суммарную энергию, которая выделяется в дугогасительной камере. Число отключений непосредственно влияет на степень износа элементов и приводит к изменению токов

уставки. Энергия, выделившаяся в дугогасительной камере, вызывает повышение тока утечки и износ главных контактов.

В соответствии с действующей инструкцией по техническому обслуживанию устройств тяговых подстанций [276] ремонт быстродействующих выключателей по техническому состоянию производится:

- после отказа в работе или повреждения;
- для выключателей АБ-2/4 и ВАБ-43 с одним разрывом - после 40 отключений;
- для выключателей с двумя разрывами (ВАБ-28) или сдвоенных выключателей - после 80 отключений;
- для выключателей АБ-2/4, АБ-2/3, ВАБ-2 - при уменьшении зазора δ на 0,5 мм ;
- для выключателей ВАБ-43, ВАБ-49, установленных на тяговых подстанциях, оборудованных устройствами для шунтирования реакторов, которые имеют фиксаторы - сумматоры отключённого тока, ремонт выполняется через 1 000 кА отключенного тока с измерением параметров и сопоставлением их с допустимыми.

Устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). Рассмотрим оборудование РПН, которое используется в системе электроснабжения электрического транспорта. Вероятность безотказной работы оборудования РПН зависит от надежности тех элементов, которые определяют его непосредственное функционирование. С точки зрения физики отказов, к ним можно отнести регулировочную обмотку, обмотку контактора и обмотку токоограничивающих устройств, контактную систему, механические детали и узлы. Для безотказной работы устройств регуляции напряжения необходимо, чтобы все перечисленные элементы находились в рабочем состоянии, которое с точки зрения надежности отвечает их последовательному соединению. Тогда вероятность безотказной работы регулировочных устройств на некотором интервале времени можно представить как произведение функций надежности соответствующих узлов

$$P_{\text{РПН}} = P_{\text{об}} \cdot P_{\text{конт}} \cdot P_{\text{мех}}, \quad (3.55)$$

где $P_{\text{об}}$, $P_{\text{конт}}$, $P_{\text{мех}}$ - вероятности безотказной работы обмоток, контактной системы и механических деталей соответственно.

Для определения показателей надежности устройств РПН с целью учета их в модели коррекции режима системы электроснабжения необходимо установить связь между скоростью изнашивания и физическими характеристиками элементов, с одной стороны, и режимами функционирования регулировочных оборудования, с другой стороны.

Надежность работы как обмоток, так и всего оборудования регуляции в значительной мере зависит от надежности изоляции. Основной характеристикой изоляции электротехнических устройств есть ее электрическая прочность, которая определяется величиной пробивной напряженности электрического поля или величиной пробивного напряжения. Если напряжение электрического поля, которое действует на изоляцию, превышает $U_{\text{пр}}$, то происходит пробой диэлектрика [277].

Необходимо отметить, что значение тока зависит не только от величины нагрузки трансформатора, но и от её характера и типа устройства РПН [278].

С учетом изложенных соображений и данных, приведенных в [279-282], интенсивность отказов можно определить по следующей формуле:

$$\lambda_k = - \frac{a_0 \cdot B \cdot n}{\sigma_I \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[- \frac{(R - \bar{R})^2}{2\sigma_I^2} \right]; \quad (3.56)$$

$$B = \frac{\Delta P_k}{\Delta n}; \quad R = \ln \left(\frac{I_k}{I_{\text{св}}} \right)^2, \quad (3.57)$$

где ΔP_k - уменьшение контактного усилия при количестве включений Δn ; a_0 - эмпирический коэффициент, который зависит от материала и конструкции контактов; n - общее количество включений; I_k - величина

тока в момент замыкания круга; σ_1 , $\bar{R}$ - параметры распределения случайной величины R .

В случае если нет данных для расчёта по выражению (3.56), можно воспользоваться данными инструкций заводов-изготовителей РПН или требованиями ГОСТ 24126-80 «Устройства регулирования напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой. Общие технические условия» [283]. В соответствии с [283] безотказная наработка устройств РПН должна составлять не менее 35 000 переключений.

Эффективность решения задач энергосбережения в СТЭ во многом зависит от использованного ресурса трансформаторов [284]. Для его определения существуют системы диагностики [278].

За основу измерений использованного ресурса принимается определенный интеграл на базе формулы Монтзингера, по которой вычисляется относительное изнашивание изоляции за конкретный период времени

$$\begin{aligned} H_B &= \int_0^{t_p/c} L(t) \cdot dt = \frac{1}{n} \sum_0^{t_p/c} L_i \cdot \Delta t_i = \frac{1}{n} \sum_0^{t_p/c} 2 \frac{V_i - 98}{6} \cdot \Delta t_i = \\ &= \frac{1}{n} \sum_0^{t_p/c} \exp 0,1155(V_s - 98) \Delta t_i, \end{aligned} \quad (3.58)$$

где L_i - относительный использованный ресурс за элементарный интервал времени Δt_i ; t_p - наработка установки; c - единица измерения использованного ресурса и времени, время; n - число элементарных интервалов времени, на которые разбивается время; V_i - температура наиболее нагретой точки обмотки трансформатора при i -м измерении. Исходя из вышесказанного, интенсивность отказов трансформаторов будет определяться из выражения

$$\lambda_{BP} = \frac{\Delta t_0}{\sigma_{\Delta t} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\Delta t - \bar{\Delta t})^2}{2\sigma_{\Delta t}^2} \right] \cdot \exp 0,1155(V_s - 98). \quad (3.59)$$

Кроме того, во время регулирования режимов системы тягового электроснабжения необходимо осуществлять контроль потенциала железобетонных опор контактной сети, который в числе других параметров является показателем, определяющим вероятность коррозии опор. То есть, при определении U необходимо учитывать ущерб от коррозионного разрушения опор. В [35, 285] показывается необходимость учета потенциального состояния опор контактной сети при определении рациональных уровней напряжений на шинах тяговых подстанций.

Устройства телемеханики. Рассматривая перспективу развития скоростных перевозок, которые приведут соответственно к увеличению грузопотока на железнодорожных магистралях Украины, нужно учитывать, что с возрастанием последних вырастут и нагрузки на устройства электроснабжения. К сожалению, многие устройства тягового электроснабжения уже находятся на этапе интенсивного износа, отслужили свой нормативный срок эксплуатации. Для поддержания показателей надёжности системы тягового электроснабжения на требуемом уровне необходимо произвести модернизацию, использовать более совершенное оборудование, свести контроль за его состоянием в целях быстрого реагирования в единую систему, ужесточить контроль на местах за качеством используемого оборудования, использовать современные материалы, усовершенствовать средства защиты, производить разработки и внедрять диагностические устройства оборудования, укомплектовать согласно норм штаты дистанций, а также постоянно повышать квалификацию обслуживающего персонала. Всё сказанное выше в полной мере касается и систем управления устройствами тягового электроснабжения [17]. От уровня надёжности устройств телемеханики во многом зависит возможность управления режимами систем тягового электроснабжения.

Анализ причин отказов системы телемеханики

На основании технических отчетов дистанций электроснабжения Приднепровской ж.д. были составлены сводные таблицы, характеризующие

надежность устройств телемеханики за 3-й квартал 2006 г. (табл. 3.13-3.16).

Структура повреждений за рассматриваемый период оказалась следующей:

Телеуправление

Неисправность приёмника.....	3
Неисправность передатчика.....	3
Повреждение разъёма в блоке ТУ.....	1
Неисправность блока питания.....	3
Неисправность блока ТС.....	2
Неисправность блока ТУ.....	1
Неисправность модулей.....	12
Перегрев стойки ТМ.....	6
Неисправность оптронов.....	2
Повреждение герконов.....	3
Неисправность диодной матрицы.....	3
Неисправность дифсистемы.....	1
Итого.....	38

Дистанционное управление

Повреждение в клемной коробке кабеля ДУ.....	2
Повреждение, реле РПР в пульте ДУ.....	1
Повреждение реле в пульте ПУ-3.....	2
Повреждение двигателя моторного привода.....	1
Итого.....	6

Линии связи

Повреждение кабеля связи	1
Повреждение предохранителей в связевом шкафу.....	1
Итого	2

Таблица 3.13 - Показатели работы устройств телемеханики за III квартал 2006 г.

Показатели	Устройств а	ЭЧ-1	ЭЧ-2	ЭЧ-3	ЭЧ-4	ЭЧ-5	ЭЧ-6	ЭЧ-7	По дороге
Количество команд	ТУ-ДП	4602	4537	899	4559	7396	7267	2430	31390
	ТУ-ДПР	626	1495	2464	2694	3693	2439	1549	14960
	Всего	5228	6032	3363	6953	11089	9706	3979	46350

Таблица 3.14 - Показатели работы устройств телемеханики за III квартал 2006г.

Показатель	ЭЧ-1	ЭЧ-2	ЭЧ-3	ЭЧ-4	ЭЧ-5	ЭЧ-6	ЭЧ-7	По дороге
Количество отказов по устройствам	3	6	11	9	9	4	4	46
Средняя наработка на отказ, тыс. ч.	39,7	24,6	13,4	34,8	25,8	42,5	25,4	26,8
Ср. время ликвидации повреждений, ч.	9	11,6	1,3	1,7	3,9	6,6	3,25	3,9
Количество отказов на одну стойку	0,056	0,089	0,164	0,063	0,086	0,052	0,087	0,082
% отказов к количеству команд	0,057	0,099	0,327	0,129	0,081	0,041	0,101	0,099
Количество команд на отказ	1743	1005	306	773	1232	2426	995	1008
Интенсивность исполнения ТУ,	8,98	7,13	4,25	6,1	103	11,4	6,9	7,91

Таблица 3.15 - Распределение отказов в ЭЧ по устройствам ТМ за III квартал 2006 г.

Дистанция	Распределение отказов, %			
	ТУ	А	ДУ	ЛС
ЭЧ-1	66,7	-	33,3	-
ЭЧ-2	83,3	-	-	16,7
ЭЧ-3	81,8	-	18,2	-
ЭЧ-4	88,9	-	11,1	-
ЭЧ-5	88,9	-	11,1	-
ЭЧ-6	100	-	-	-
ЭЧ-7	50	-	25	25
По дороге	82,6	-	13,04	4,35

Таблица 3.16 - Показатели надёжности отдельных устройств ТМ за III квартал 2006 г.

Показатели	Год	Вид	ЭЧ1	ЭЧ-2	ЭЧ-3	ЭЧ-4	ЭЧ-5	ЭЧ-6	ЭЧ-7	По дороге
Наработка на отказ, тыс. ч	2005	ТУ	176,6	48,1	98,3	21,8	58,5	136,9	22,1	50,64
	2006		88,3	48,2	35,3	33,7	43,9	68,4	61,8	45,7
	2005	А	-	-	-	-	47,5	53,0	64,0	91,8
	2006		-	-	-	-	-	-	-	-
	2005	ДУ	0,572	-	0,378	-	1,245	-	0,229	0,897
	2006		0,572	-	0,236	0,107	1,245	-	0,5299	0,9012
	2005	ЛС	1,073	1,179	0,267	-	-	2,049	-	1,468
	2006		-	1,179	-	-	-	-	0,728	5,362
Количество отказов на единицу оборудования	2005	ТУ	0,0125	0,046	0,022	0,101	0,038	0,016	0,1	0,044
	2006		0,025	0,046	0,0625	0,07	0,05	0,032	0,054	0,048
	2005	А	-	0,03	-	-	0,046	0,042	0,034	0,024
	2006		-	-	-	-	-	-	-	-

	2005	ДУ	0,004	-	0,006	-	0,002	-	0,01	0,002
	2006		0,004	-	0,009	0,002	0,002	-	0,004	0,002
	2005	ЛС	0,002	0,002	0,008	-	-	0,001	0,003	0,002
	2006			0,002						0,001
Среднее время ликвидации повреждений, ч	2005	ТУ	3 1,75	5,6	1,5	1,5	4,67	18,5	2,25 2,5	4,06
	2006			4,3	1,1	1,63	4,1	6,6		3,02
	2005	А	-	4,5	-	-	6	31	2	9,9
	2006		-	-	-	-	-	-	-	-
	2005	ДУ	4,5 2,5	-	2 1	-	4 2	-	3	3,08
	2006			-		2		-	3	1,92
	2005	ЛС	2,33	24 48	2,5	-	-	6	5	6,05
	2006		-		-	-	-	-	-	2,65

Как видно из представленной структуры повреждений, основная часть неисправностей приходится на устройства телемеханики, а остальные повреждения распределились между дистанционным управлением и линиями связи. По автоматике за III квартал 2006 г. отказы в работе аппаратуры не зафиксированы.

В устройствах телемеханики большая часть отказов относится к модулям, в которых повреждаются полупроводниковые приборы из-за атмосферных перенапряжений, увеличения температуры окружающей среды, что часто приводит к температурному дрейфу в диодах. Так как аппаратура телемеханики эксплуатируется уже многие годы, то в модулях образуются микротрещины вокруг пайки, и особенно в местах подключения платы к модульному разъёму. Отсутствие запасных частей и других полупроводниковых приборов в конечном итоге приводит к увеличению времени устранения отказов в работе аппаратуры телемеханики.

Повреждения в аппаратуре телемеханики во многих случаях вызваны старением элементной полупроводниковой базы, применяемой в системе ЭСТ-62 и Лисна. Это приводит к отказам в работе блоков ТУ, ТС, блоков питания, а также в каналах связи линейных стоек. Продолжают возникать сбои в работе устройств телемеханики в период грозových перенапряжений, которые попадают в аппаратуру как по линиям связи, так и по линиям основного питания. Для уменьшения такого рода отказов необходимо

устанавливать защиты от атмосферных перенапряжений по линиям связи и по питанию. В летний период наблюдались сбои в работе стоек ТМ, установленных в металлических ППС и ПСК. Следует продолжать работы по установке малогабаритных вентиляторов в стойки ТМ для улучшения температурного режима работы полупроводниковых приборов.

По дистанционному управлению зафиксированы случаи неисправностей в пультах ДУ, к ним относятся повреждения катушек реле РПР. Отмечены и случаи повреждения кабелей дистанционного управления, моторных приводов. По линиям связи основной неисправностью были повреждения кабелей связи [96].

Разработка структурно-логической схемы для оценки надёжности системы тягового электроснабжения в задачах регулирования режимов

Учёт надёжности системы тягового электроснабжения в задачах регулирования режимов удобно осуществлять, предварительно составив структурно-логическую схему [30, 72]. По данной схеме можно проследить как влияет на уровень надёжность всей системы составляющие её элементы. Составим структурно-логическую схему для расчёта показателей надёжности системы тягового электроснабжения при регулировании её режимов. В ней будем учитывать лишь те элементы, которые участвуют в процессе регулирования режимов системы электроснабжения, остальные элементы считаем абсолютно надёжными (рис. 3.30). В данной схеме элементы 1,2,5 представляют высоковольтные выключатели переменного тока; элементы 3,4 – устройства РПН понизительных трансформаторов; элементы 6,7 – выключатели переменного тока; 8,9 – устройства РПН преобразовательных трансформаторов; элементы 10,11 – быстродействующие выключатели постоянного тока; элемент 12 представляет систему телемеханики (анализ надёжности устройств телемеханики приведен в [17, 18, 30]); элементы 13 и 15 – ППС, элемент 14 – ПСК. Схема, приведенная на рис. 3.30, относится к сложным структурно-логическим схемам и может быть сведена путём преобразований к

эквивалентной мостовой схеме. Рассчитать показатели надёжности мостовой схемы можно, воспользовавшись методом разложения относительно особого элемента [30].

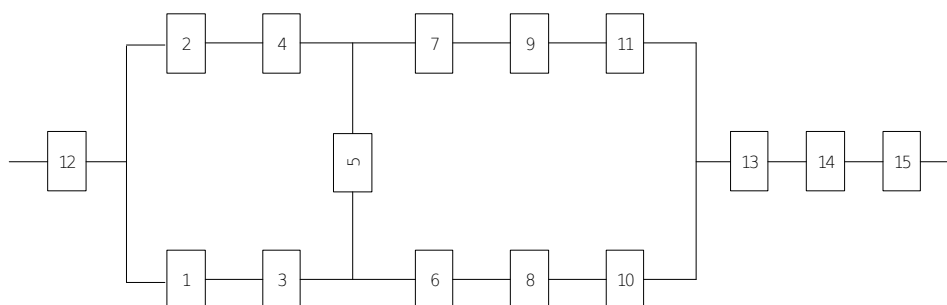


Рисунок 3.30- Структурно-логическая схема расчёта надёжности системы тягового электроснабжения при регулировании режимов

Принципиальная схема ПСК и ППС приведена на рис. 3.31

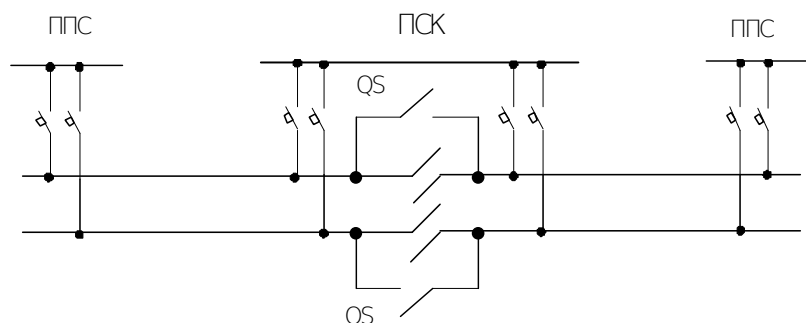


Рисунок 3.31 - Упрощённая принципиальная схема ПСК и ППС

Можно считать, что все выключатели, которые входят в состав ПСК и ППС, соединены по надёжности последовательно, т.к. при отказе любого выключателя наступит отказ подсистемы ПСК-ППС.

В результате выполнения данной диссертации будут выданы рекомендации по определению рациональных режимов системы тягового электроснабжения транспорта в соответствии с целевой функцией (2.40). Для расчёта значения целевой функции на каждом шаге модельного времени необходимо определить экономический ущерб от возможного отказа силового оборудования, которое участвует в регулировании режимов системы электроснабжения. Для этого необходимо иметь информацию о величине потока отказов системы элементов, участвующих в регулировании.

Рассмотрим возможные ситуации, возникающие в процессе регулирования режимов, и определим соответствующие значения параметра потока отказов.

Подстанция работает в однотрансформаторном режиме, осуществляется переключение на параллельную работу понизительных трансформаторов. В данном случае переключение на параллельную работу понизительных трансформаторов осуществляется с помощью разъединителей и высоковольтных выключателей (т.к. величина параметра потока отказов для разъединителей намного меньше по сравнению с величиной потока отказов выключателей переменного тока, в структурно-логической схеме разъединители не учитываем). Суммарная величина параметра потока отказов для подсистемы переключения понизительных трансформаторов на параллельную работу может быть определена по следующему выражению (в предположении, что все элементы работают в установившемся периоде эксплуатации). В формулах (3.60)-(3.69) индексы соответствуют номеру элемента в структурно-логической схеме (рис. 3.32).

$$\omega_{\text{пар пт}} = \omega_2 + \omega_5, \quad (3.60)$$

где $\omega_{\text{пар пт}}$ — величина параметра потока отказов подсистемы

переключения на параллельную работу понизительных трансформаторов.

Подстанция работает в однотрансформаторном режиме, осуществляется переключение на параллельную работу преобразовательных трансформаторов. В данном случае подключение в работу преобразовательного трансформатора вместе с преобразовательным агрегатом осуществляется с помощью выключателя переменного тока 7 и выключателя постоянного тока 11. Суммарная величина параметра потока отказов для подсистемы переключения преобразовательных трансформаторов на параллельную работу может быть определена по следующему выражению:

$$\omega_{\text{пар тт}} = \omega_7 + \omega_{11}, \quad (3.61)$$

где $\omega_{\text{пар тт}}$ — величина параметра потока отказов подсистемы переключения на параллельную работу преобразовательных трансформаторов.

Необходимо отметить, что в случаях перехода с двухтрансформаторного на однотрансформаторный режим могут применяться те же формулы.

Подстанция работает в однотрансформаторном режиме, осуществляется регулирование напряжения на шинах тяговой подстанции с помощью РПН понизительных трансформаторов и РПН преобразовательных трансформаторов. В данном случае надёжность работы тяговой подстанции будет определяться надёжностью РПН (остальные элементы во время регулирования считаем абсолютно надёжными)

$$\omega_U = \omega_3 + \omega_8, \quad (3.62)$$

где ω_U — величина параметра потока отказов подсистемы регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций с помощью устройств РПН.

Подстанция работает при параллельно включённых понизительных трансформаторах и при параллельно включённых преобразовательных трансформаторах, осуществляется регулирование напряжения на шинах тяговой подстанции с помощью РПН понизительных трансформаторов и РПН преобразовательных трансформаторов. В этом случае структурно-логическая схема будет иметь следующий вид (рис. 3.32)

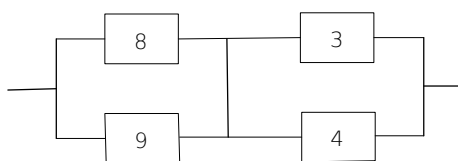


Рисунок 3.32- Структурно-логическая схема расчёта надёжности подсистемы регулирования напряжения для случая параллельной работы понизительных и преобразовательных трансформаторов

Данная схема относится к классу сложных последовательно-параллельных схем. Определить суммарную величину потока отказов подсистемы регулирования напряжения в данном случае можно с помощью метода преобразования исходной схемы. Структурно-логические схемы, в которых присутствует параллельное соединение, удобно рассчитывать, определив сначала вероятности отказов такой системы. В формулах для удобства опускаем аргумент наработки [72].

$$P_{34} = 1 - Q_3 Q_4, \quad (3.63)$$

где P_{34} - вероятность безотказной работы квазиэлемента 34,

образованного параллельным соединением элементов 3 и 4;

Q_3 Q_4
и - вероятности отказов элементов 3 и 4 соответственно.

Аналогично можно записать

$$P_{89} = 1 - Q_8 Q_9, \quad (3.64)$$

где P_{89} - вероятность безотказной работы квазиэлемента 89,

образованного параллельным соединением элементов 8 и 9;

Q_8 Q_9
и - вероятности отказов элементов 8 и 9 соответственно.

Суммарная вероятность безотказной работы подсистемы регулирования напряжения с помощью устройств РПН может быть определена по следующему выражению

$$P_U = P_{34} P_{89} = (1 - Q_3 Q_4)(1 - Q_8 Q_9), \quad (3.65)$$

где P_U - вероятность безотказной работы подсистемы регулирования напряжения.

Вероятность возникновения отказа определится следующим образом:

$$Q_U = 1 - P_U = 1 - (1 - Q_3 Q_4)(1 - Q_8 Q_9), \quad (3.66)$$

где Q_U - вероятность безотказной работы подсистемы регулирования напряжения.

Сделаем предположение, что все элементы работают в установившемся периоде эксплуатации, тогда для каждого элемента для описания характера возникновения отказов можно использовать экспоненциальную модель. В таком случае вероятность возникновения отказа можно определить так:

$$Q_U(t) = 1 - (1 - (1 - e^{-\omega_3 t})(1 - e^{-\omega_4 t}))(1 - (1 - e^{-\omega_8 t})(1 - e^{-\omega_9 t})). \quad (3.67)$$

В том случае, когда элементы, участвующие в регулировании напряжения на шинах ТП, идентичны по надёжности (

$\omega_3 = \omega_4 = \omega_8 = \omega_9 = \omega_{\text{рпн}}$), формула может быть упрощена

$$Q_U(t) = 1 - (1 - (1 - e^{-\omega_{\text{рпн}} t})^2)^2. \quad (3.68)$$

Ещё раз подчеркнём, что в качестве наработки на отказ t здесь понимается количество коммутаций.

Случай переключения схемы питания контактной сети на параллельную схему со схемы двухстороннего питания. В случае когда осуществляется только переключение схем питания контактной сети, надёжность подсистемы регулирования «контактная сеть» зависит от надёжности коммутационной аппаратуры ППС и ПСК. Очевидно, что с точки зрения надёжности ППС и ПСК соединены последовательно, т.к. отказ

какого -либо элемента приводит к отказу всей системы. Суммарная величина параметра потока отказов в данном случае будет равняться

$$\omega_{\text{КС}} = \omega_{13} + \omega_{14} + \omega_{15}, \quad (3.69)$$

где $\omega_{\text{КС}}$ – параметр потока отказов подсистемы регулирования схем питания контактной сети.

В тех случаях когда осуществляется переход на узловую схему питания, надёжность рассматриваемой подсистемы регулирования будет определяться только надёжностью ПСК. В случае переключения с параллельной схемы на узловую надёжность рассматриваемой подсистемы регулирования будет определяться надёжностью двух ППС.

Модель экономического ущерба от ненадёжности силового оборудования, участвующего в регулировании режимов системы тягового электроснабжения

Подходы к оценке экономического ущерба от ненадёжности силового оборудования определяются типом предприятия, для которого производится регулировка режимов работы оборудования. Ущерб может быть выражен в виде стоимости недовыпущенной продукции или стоимости расходов от простоя вследствие перерывов в электроснабжении, недополученных доходов энергопередающих компаний или социального ущерба при рассмотрении систем электроснабжения жилищно-коммунального сектора. В данной диссертации мы будем рассматривать лишь составляющую ущерба, связанную с уменьшением надёжности силового оборудования тяговых подстанций и контактной сети при осуществлении регулирования режимов с целью достижения рационального.

Регулирование режимов системы тягового электроснабжения вызывает повышенное количество включений-отключений коммутационного оборудования. Это ведёт к более быстрому использованию технического

ресурса. В результате может наступить отказ системы электроснабжения, который вызовет задержку или остановку поездов на участке. В данном случае величина экономического ущерба будет включать в себя материальные затраты, связанные с задержкой или остановкой поездов, и материальные затраты на покрытие последствий отказа. Отказ всей системы тягового электроснабжения может и не наступить. В таком случае ущерб будет связан лишь с материальными затратами на восстановление работоспособности отказавшего элемента (например, быстродействующего выключателя).

В общем виде ущерб при осуществлении регулирования режимов на тяговых подстанциях может быть определён по следующему выражению:

$$Y = \Delta D + Y_{\text{отк}}, \quad (3.70)$$

где ΔD - недополученные доходы предприятия из-за перерыва в электроснабжении (или в связи с пониженной эффективностью системы электроснабжения);

$Y_{\text{отк}}$ - составляющая ущерба, связанная с ликвидацией последствий отказа силового оборудования.

С другой стороны, общий ущерб можно разбить на четыре составляющие по типу регулирующих воздействий:

$$Y = Y_U + Y_{\text{пт}} + Y_{\text{тт}} + Y_{\text{кс}}, \quad (3.71)$$

где Y_U - составляющая ущерба, вызванная ненадёжностью силового оборудования, задействованного в регулировании напряжения на шинах тяговых подстанций;

$Y_{\text{пт}}$ - составляющая ущерба, вызванная ненадёжностью силового оборудования, задействованного в переключении понизительных трансформаторов на параллельную работу;

$Y_{\text{тт}}$ - составляющая ущерба, вызванная ненадёжностью силового оборудования, задействованного в переключении преобразовательных агрегатов тяговых подстанций на параллельную работу;

$Y_{\text{КС}}$ - составляющая ущерба, вызванная ненадёжностью силового оборудования, задействованного в переключении схем питания контактной сети.

Величина ущерба может быть определена по отчетным данным работы предприятия при сложившемся за год уровне отказов действующих защит. Теоретический расчет этой составляющей ущерба включает учет следующих факторов [286]:

$$\Delta D = \Delta W \cdot C_{\omega} \cdot \omega \cdot T, \quad (3.72)$$

где ΔW - недоотпущенная потребителям электроэнергия, кВт·ч;

C_{ω} - тариф на электроэнергию;

ω - параметр потока отказов устройств электроснабжения;

T - математическое ожидание времени недоотпуска электроэнергии.

Составляющая ущерба, связанная с ликвидацией последствий отказа силового оборудования, может быть определена следующим образом

$$Y_{\text{отк}} = C_{\text{зп}} + C_{\text{тр}}, \quad (3.73)$$

где $C_{\text{зп}}$ - расходы заработной платы бригады, ликвидирующей аварийную ситуацию;

$C_{\text{тр}}$ - затраты на спецтранспорт, используемый при выездах на ликвидацию аварий.

Отказы силового оборудования систем тягового электроснабжения железных дорог вызывают потери в эксплуатационной работе транспорта, связанные с остановкой поездов и перерывами в перевозочном процессе. Для электроснабжения тяги экономический ущерб может быть определён по следующему выражению:

$$Y = Y_{\text{пр}} + Y_{\text{ост}} + Y_{\text{отк}}, \quad (3.74)$$

где $Y_{\text{пр}}$ - ущерб от простоя поездов при перерывах в тяговом электроснабжении;

$Y_{\text{ост}}$ - ущерб от остановки поездов.

Ущерб от простоя поездов определяется по формуле [286]

$$Y_{\text{пр}} = \sum Nt_{\text{гр}} \cdot C_{Nt_{\text{гр}}} + \sum Nt_{\text{пс}} \cdot C_{Nt_{\text{пс}}}, \quad (3.75)$$

где $\sum Nt_{\text{гр}}$, $\sum Nt_{\text{пс}}$ - поездо-часы простоя грузовых и пассажирских поездов соответственно при отказе силового оборудования во время регулирования режимов; $C_{Nt_{\text{гр}}}$, $C_{Nt_{\text{пс}}}$ – укрупненная расходная ставка простоя грузовых и пассажирских поездов соответственно, грн./поездо·ч [287, 288].

Величина поездо-часов задержки поездов зависит от размеров движения на участке, средней продолжительности простоя поездов при авариях данного типа, от типа системы сигнализации и связи. Величина поездо-часов простоя поездов вследствие отказов силового оборудования во время регулирования режимов может быть определена по данным эксплуатации дистанций электроснабжения. При отсутствии данных эксплуатации для приближённых теоретических расчётов поездо-часов отключения тяговой сети может использоваться следующая формула

$$\sum Nt_{\text{откл}} = \omega \cdot N_{\text{сут}} \cdot l_{\text{уч}} \cdot T, \quad (3.76)$$

где ω – параметр потока отказов системы электроснабжения из-за регулирования режимов, ед./поездо·км;

$N_{\text{сут}}$ – суточные размеры движения на участке, поездов/сут;

$l_{\text{уч}}$ – длина участка, км;

T – математическое ожидание времени закрытия участка в результате одного отказа устройств электроснабжения в результате регулирования режимов.

Экономический ущерб от остановки поездов при перерывах в электроснабжении включает расходы, связанные с энергетическими затратами на разгон и торможение поездов, и определяется по формуле

$$Y_{\text{ост}} = \sum N_{\text{з.гр}} \cdot C_{\text{ост.гр}} + \sum N_{\text{з.пс}} \cdot C_{\text{ост.пс}}, \quad (3.77)$$

где $\sum N_{\text{з.гр}}$, $\sum N_{\text{ост.пс}}$, - число задержанных грузовых и пассажирских поездов при соответствующих размерах движения;

$C_{\text{ост.гр}}$, $C_{\text{ост.пс}}$ - расходы на одну остановку грузового и пассажирского поезда [287, 288].

Ущерб, связанный с ликвидацией последствий в перерывах тягового электроснабжения, определяется аналогично ущербу от перерывов общесетевого энергоснабжения по (3.70).

Величину экономического ущерба от ненадёжности регулировочных устройств во время осуществления регулирования режимов систем тягового электроснабжения можно определить по (3.71), где каждая из четырёх составляющих будет учитывать материальные затраты на восстановление работоспособности элемента. Затраты труда на выполнение операций по восстановлению работоспособности элементов могут быть определены по [289]. Стоимость отдельных операций рассчитывается по типовым калькуляциям работ.

Стоимость отказа каждого элемента системы электроснабжения, который задействован в процессе регулирования режимов, можно рассчитать по следующему выражению:

$$Y = \sum_{i=1}^m C_i P_i t_{\text{отк}}, \quad (3.78)$$

где C_i - средняя стоимость часа отказа для i - того состояния отказа элемента;

$t_{\text{отк}}$ - продолжительность периода, в котором рассчитывается ущерб от отказа;

m - общее число состояний, в которых присутствует отказ.

В том случае когда в системе применяются различные методы резервирования, т.е. когда имеются резервные элементы в системе, ущерб от отказа может быть рассчитан по следующему выражению:

$$Y = \sum_{i=1}^{m_1} C_i P_i t_{\text{отк}1} + \sum_{i=1}^{m_2} C_i P_i t_{\text{вр}} , \quad (3.79)$$

где C_i - стоимость часа отказа системы (элемента), грн./ч.

m_1 - число состояний с отказом, в которых количество отказавших элементов превосходит число резервных элементов;

m_2 - число состояний с отказом, в которых число отказавших элементов не превосходит число резервных элементов;

$t_{\text{вр}}$ - время, в течение которого происходит ввод резервных элементов в работу.

Очевидно, что доля второго слагаемого в выражении (3 .79) меньше, чем первого слагаемого. Если время ввода в работу резервных элементов достаточно мало, то вторым слагаемым можно пренебречь.

Величина C_i представляет собой среднюю величину за время длительности отказа. Ущерб в данном случае возникает из-за перерыва в электроснабжении. В общем случае ущерб от перерыва в электроснабжении будет зависеть не только от длительности интервала времени, в течении которого ликвидировался отказ, но и от положения этого интервала на оси времени. При одноставочных тарифах на электроэнергию величина ущерба от отказа i -го элемента может быть рассчитана по известному тарифу на электроэнергию и средней продолжительности перерыва в электроснабжении

$$C_i = \frac{C_9}{t_{\text{отк}}} \sum_{l=1}^k S_l t_l, \quad (3.80)$$

где C_9 - величина одноставочного тарифа на электроэнергию;

S_l - потеря мощности в l - м интервале;

t_l - продолжительность l -го интервала;

k – общее количество интервалов.

$$t_{\text{отк}} = \sum_{l=1}^k t_l, \quad (3.81)$$

В случае когда необходимо рассчитать ущерб от отказа при использовании дифференцированных во времени тарифов или при расчётах за электроэнергию по оптовым ценам, можно воспользоваться следующим подходом. Будем считать стоимость электроэнергии и продолжительность перерыва электроснабжения (длительность отказа) случайными величинами. Законы распределения этих случайных величин могут быть довольно просто получены по статистическим данным за предыдущие периоды эксплуатации системы электроснабжения.

$$p(S = S_i) = p_{si} \quad (i = 1, \dots, ns), \quad (3.82)$$

$$p(C_9 = C_k) = p_{rk} \quad (k = 1, \dots, nr), \quad (3.83)$$

где S_i , p_{si} и ns - реализация случайной величины, вероятность и число реализаций для величины S соответственно;

C_k , p_{rk} и nr -реализация случайной величины, вероятность и число реализаций для случайной величины стоимости электроэнергии C_9 соответственно.

Основываясь на данном подходе, запишем величину средней стоимости отказа (перерыва в электроснабжении)

$$C_i = \sum_{i=1}^{ns} \sum_{k=1}^{nr} S_i r_k p_{si} p_{rk}. \quad (3.84)$$

Математически C_i рассматривается как математическое ожидание двух случайных величин – потери мощности и стоимости электроэнергии. Очевидно, что в выражении (3 .84) перемножаются все реализации данных случайных величин.

Для учёта экономического ущерба от возможных отказов при регулировании режимов системы тягового электроснабжения необходимо прежде всего описать все возможные ситуации, которые могут возникнуть при регулировании, определить степень риска, просчитать стоимость операций по ликвидации отказов, стоимость остановки или простоя поездов в пути следования (для отказов, связанных с фактами простоя или остановки поездов). Все возможные ситуации заносим в табл. 3 .17.

Таблица 3.17 - Экономические риски от возможных отказов

Ситуация	Описание рассматриваемого отказа	Суммарный параметр потока отказов, $\omega(t)$, 1/перекл.	Стоимость операции по восстановлению ресурса (замены), грн.
Переключение понизительных трансформаторов на параллельную работу (или в обратном направлении)	Восстановление (ремонт) выключателя переменного тока	0,008	2 400
Переключение преобразовательных трансформаторов на параллельную работу	Восстановление (ремонт) выключателя переменного тока или быстродействующего выключателя постоянного тока	0,029	2 400
Регулирование напряжения на шинах тяговой подстанции при однострансформаторной схеме	Восстановление (ремонт) устройств РПН	$5,71 \cdot 10^{-5}$	30 000
Регулирование напряжения на шинах тяговой подстанции при двухтрансформаторной схеме	Восстановление (ремонт) устройств РПН, ввод в работу резервного питания	Не является постоянной величиной. Может быть рассчитан по формуле $\omega(t) = \frac{Q'(t)}{P(t)}$	Возможна задержка поездов или прекращение движения в некоторых случаях
Переключение со схемы двухстороннего питания на схему параллельного питания (и обратно)	Восстановление (ремонт) выключателей постоянного тока на ППС или ПСК	0,2	9 600
Переключение со схемы узлового питания на схему параллельного питания (и обратно)	Восстановление (ремонт) выключателей постоянного тока на ППС или ПСК	0,1	4800

Переключение со схемы двухстороннего питания питания на схему узлового питания	Восстановление (ремонт) выключателей постоянного тока на ППС или ПСК	0,1	4800

Модель определения рациональных параметров контактной сети на этапе проектирования

Как и для обычных линий, основными параметрами тягового электроснабжения являются: род тока, мощность источников питания, расстояние между тяговыми подстанциями ($L_{\text{тп}}$), установленная мощность тяговой подстанции ($S_{\text{тп}}$), тип и сечение проводов контактной подвески, схема питания и секционирования тяговой сети. Правильный выбор параметров устройств тягового электроснабжения обеспечивает основные условия надежной и безопасной эксплуатации железной дороги, особенно при повышенных скоростях. Вопросы выбора этих параметров чрезвычайно сложны.

Нагрузка системы тягового электроснабжения и ее элементов непосредственно зависит от графиков движения, применяемых на данной линии. Вместе с тем многие факторы, влияющие на выбираемый параметр, не поддаются экономической оценке и учитываются при выборе варианта как некоторые показатели качества, определяющие надежность работы. Главную трудность расчета создают резкие случайные изменения нагрузок систем электроснабжения, исключающие возможность использования методов расчета, применяемых в системах со стационарными нагрузками [9, 76].

В существующей проектной практике сравнение различных вариантов системы тягового электроснабжения производится по приведенным затратам. Возможны различные варианты системы электроснабжения - разное число тяговых подстанций при различном их расположении, различные схемы питания, разное сечение проводов линий передачи, контактной сети и т. д. При этом варианты могут быть примерно технически равноценны, т. е. все они в одинаковой мере будут обеспечивать необходимые размеры движения, пропускную и провозную способность, высокую надежность и другие показатели работы участка. Технически целесообразный вариант, при

котором требуются наименьшие капиталовложения и обеспечиваются наименьшие ежегодные расходы в эксплуатации, будет наиболее выгодным. Обычно вариант, более совершенный в техническом отношении, требует больших капиталовложений, а иногда и увеличения ежегодных расходов. Чтобы выбрать оптимальный вариант, необходимо сравнить все качества вариантов - как поддающиеся, так и не поддающиеся денежной оценке. К последним относятся большая надежность, улучшение какого-либо показателя работы и др. Применение проводов большего сечения, т. е. увеличение капитальных затрат, приводит к снижению потерь энергии и, следовательно, к снижению общих ежегодных расходов, что поддается оценке в денежном эквиваленте. Вместе с тем с увеличением сечения проводов облегчается защита от удаленных коротких замыканий, уменьшаются потери напряжения, вследствие чего может быть повышена скорость движения. Если увеличивается сечение контактных проводов, то улучшаются условия токосяема и т. п., что трудно поддается оценке в денежном эквиваленте. Выбор оптимального сечения контактной сети на сегодняшний день производится по критерию минимума приведенных ежегодных расходов $C_{пр}$, грн./кВт·ч [76].

$$C_{пр} = (K_{кп} + 1,7 \cdot K_{\alpha} \cdot (S_{м} - S_{кп})) \cdot \left(\frac{1}{T_{н}} + \alpha_{к} \right) + \frac{C_{э} \cdot \rho_{м} \cdot B_0}{S_{м}},$$

(3.85)

где $K_{кп}$ – капитальное вложение в контактную сеть при одной цепной подвеске, грн./км (без усиливающих проводов);

K_{α} – коэффициент, учитывающий увеличение стоимости контактной сети при усилении ее алюминиевыми проводами на 1 мм²;

$S_{кп}$ – сечение проводов основной контактной подвески, мм²;

$S_{м}$ – сечение всех проводов контактной сети (совместно с усиливающими проводами S_y);

$T_{н}$ – нормативный срок окупаемости контактной сети, лет

α_k – амортизационные отчисления в контактной сети, %

C_3 – стоимость энергии, грн./кВт·ч;

ρ_m – удельное сопротивление медных проводов, $\rho_m = 18,2 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$;

B_0 – удельные годовые потери электроэнергии в проводах фидерной зоны, кВт·ч/Ом·км

Наиболее простой путь - найти оптимальное значение площади сечения контактной сети из следующего уравнения:

$$\frac{dC_{\text{пр}}}{dS_M} = 0 \quad (3.86)$$

Поиск оптимальных сечений проводов контактной сети по уравнению (3.85) сопряжён с погрешностями. Параметры в формуле (3.85) несут немалую неопределённость, нечёткость.

Так, контактные провода имеют такую отличительную особенность по сравнению с проводами в стационарной энергетике, как непостоянство своего сечения в течение эксплуатации. Это непостоянство вызвано процессами износа контактного провода под действием токоприёмников электроподвижного состава [57, 290, 291]. На величину износа контактного провода влияет масса случайных факторов. Сечение контактного провода может меняться в течении эксплуатации в результате износа до 30% (допустимого значение).

Удельные потери электроэнергии на фидерной зоне B_0 тоже имеют неопределённость, их нельзя однозначно определить. На величину B_0 влияют и климатические факторы, и квалификация машинистов, осуществляющих управление поездами. Можно только определить оценку этой величины с определённой степенью точности. Если известна оценка годовых потерь электроэнергии в фидерной зоне $\Delta W_{\text{год}}$, то B_0 можно рассчитать как

$$B_0 = \frac{\Delta W_{\text{год}}}{lr_{\text{эк}}}, \quad (3.87)$$

где $\Delta W_{\text{год}}$ - годовые потери электроэнергии в проводах фидерной зоны,

кВт·ч;

l - длина фидерной зоны в км;

$r_{\text{эк}}$ - сопротивление тяговой сети фидерной зоны.

Отдельного внимания заслуживает вопрос цены за электроэнергию. В условиях закупки электроэнергии по оптовым ценам C_3 в формуле (3 .85) тоже можно считать случайной величиной.

Таким образом, исходя из причин, приведенных выше, при определении оптимальной площади сечения контактной сети мы имеем дело с определением экстремального значения функции (3 .85) в условиях нечёткости и неопределённости. В таких условиях нахождение оптимальной площади сечения контактной сети по формуле (3 .86) сопряжено с большими погрешностями. Выход из сложившейся ситуации может быть найден в применении методов имитационного моделирования. Удобным инструментом имитационного моделирования, который может реализовать в стандартном пакете Excel методы латинского гиперкуба и Монте-Карло, является пакет Crystal Ball [58].

Традиционные методы поиска (который используется в Excel Solver) работают хорошо, когда необходимо найти локальные экстремумы. Эти методы терпят неудачу при поиске глобальных решений, когда модели реальных проблем содержат существенную неопределённость. Подход, реализуемый в Crystal Ball, использует форму адаптивной памяти, чтобы помнить, какие получены решения, повторно комбинирует их в лучшие решения. Таким образом, процесс моделирования с неточностями - это повторяющийся процесс, который последовательно генерирует новые наборы значений переменных. Не все эти переменные улучшают целевую функцию, но в течение долгого времени этот процесс обеспечивает очень эффективную траекторию к лучшим решениям.

Процесс поиска продолжается, пока Crystal Ball не достигает некоторых критериев завершения - или предел по времени или максимальное число итераций моделирования.

На рис. 3.33 показана схема процесса поиска оптимального значения целевой функции (3.85) с помощью данного пакета. На рис. 3.34 приведена общая схема алгоритма.

Покажем в качестве примера, как с помощью Crystal Ball находится оптимальная площадь сечения контактной сети для участков постоянного тока магистральных железных дорог. Составим оптимизационную модель. В качестве целевой функции будет выступать выражение (3.85), которое мы будем минимизировать в процессе моделирования. Переменной будет выступать площадь сечения проводов контактной подвески S_m . В расчёте принимаем стоимость электроэнергии $C_3=0,1516$ грн. за 1 кВт·ч (цены 2006 г.). Будем считать, что годовые удельные потери электроэнергии в проводах фидерной зоны распределены по нормальному закону (Crystal Ball может сам подобрать нужное распределение). Среднее значение удельных потерь электроэнергии принимаем $4 \cdot 10^6$ кВт·ч/ Ом·км. Капиталовложения в контактную сеть Ккп находятся из типовых калькуляций строительно-монтажных работ в расчёте на 1 км тяговой сети. Норматив экономической эффективности принят $E_n=0,15$. Все исходные данные заносятся в соответствующие ячейки типового листа Excel. Рис. 3.34 иллюстрирует процесс поиска оптимального решения. В ячейке B5 находится наша переменная – площадь сечения контактной сети. Как изменяется значение этой ячейки во время моделирования, можно увидеть на рис. 2.

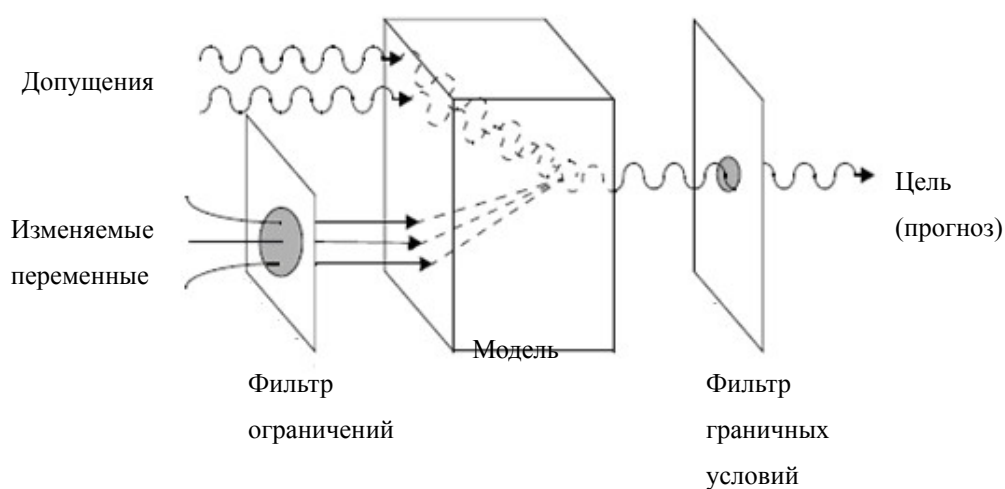


Рисунок 3.33 - Схема оптимизационной модели с неопределённостями

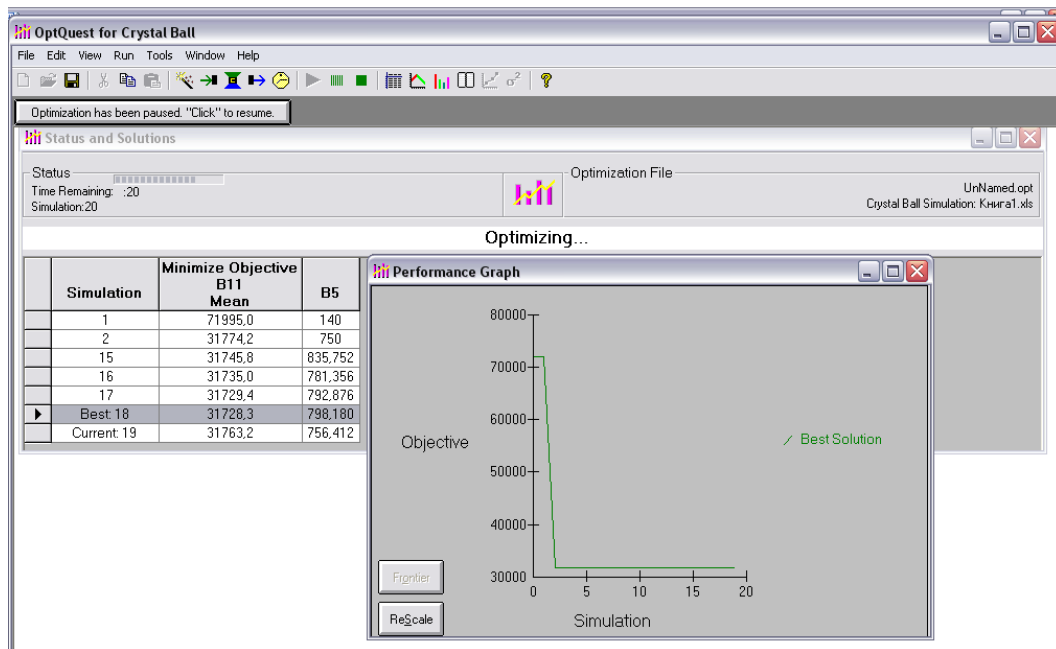


Рисунок 3.34- Процесс вычисления оптимальной площади сечения контактной сети в Crystal Ball

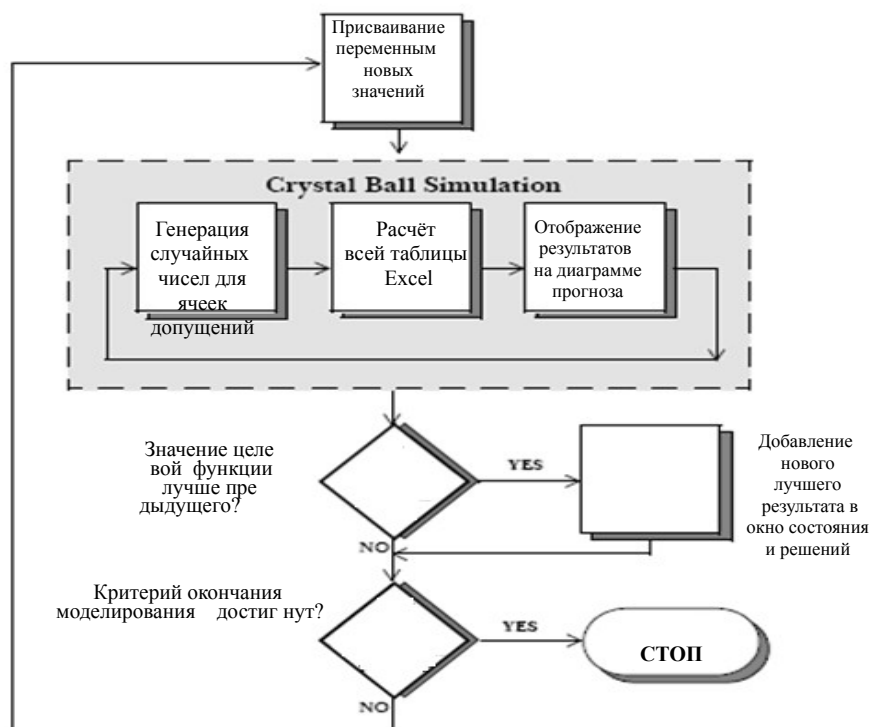


Рисунок 3.35 - Общая схема алгоритма работы с Crystal Ball

Через 50 итераций ответ был получен – оптимальная площадь сечения контактной сети для выбранных условий составляет 345 мм².

Наиболее эффективным и перспективным будет системный подход к контактной сети как к единому техническому объекту, имеющему свой жизненный цикл. Проектирование, разработка, изготовление, строительство, монтаж, эксплуатация и последующая утилизация должны рассматриваться в неразрывной цепи событий - событий единого жизненного цикла технического объекта.

Выводы к разделу 3

1. Приведены модели тарифов за потреблённую электроэнергию, которые могут быть использованы в задачах энергосбережения. Показано, что стоимость электроэнергии является одним из главных факторов, влияющих на выбор энергосберегающих мероприятий в СТЭ.

2. Для определения параметров потоков отказов силового оборудования, которое участвует в регулировании режимов СТЭ проведен анализ его надёжности, проанализированы причины отказов и физические процессы, лежащие в основе процессов старения. На основе эксплуатационных данных установлено, что в устройствах телемеханики большая часть отказов относится к модулям, в которых повреждаются полупроводниковые приборы из-за атмосферных перенапряжений, увеличения температуры окружающей среды, что часто приводит к температурному дрейфу в диодах.

3. Предложенная модель надёжности СТЭ постоянного тока на основе структурно-логического анализа для задач управления режимами позволяет определить величину суммарного параметра потока отказов. Это даёт возможность определять вероятности отказа при осуществлении операций по регулированию режимов.

4. На основе информации о суммарной величине потока отказов и типовых калькуляций работ разработана модель экономического ущерба от возможных отказов при осуществлении регулированных воздействий в СТЭ. Предложено определять величину экономического ущерба как произведение вероятности возникновения отказа на среднюю стоимость работ по восстановлению (замене) работоспособного состояния отказавшего объекта.

5. Показано, что выбор оптимального сечения контактной сети на основе приведенных ежегодных расходов носит неточности из-за случайного характера тяговой нагрузки, изменяющегося сопротивления контактной сети вследствие износа контактных проводов, случайного характера цены на электроэнергию (при закупки электроэнергии с ОПЭ). Предложена методология решения указанной задачи с помощью имитационного моделирования в прикладном пакете Crystall ball.

РАЗВИТИЕ МЕТОДА РАСЧЁТА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГИ ПОЕЗДОВ НА ОСНОВЕ ПОТОКОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Систематизация требований к методу расчёта системы электрообеспечения электрического транспорта

Для расчёта в каждый момент времени целевой функции (2.40) при осуществлении регулирования режимов СТЭ необходим такой метод расчёта, который бы:

- позволял определять потери мощности в каждом элементе СТЭ с учётом регулирования режимов;
- учитывал неравномерность потока поездов.

СТЭ представляет собой многомерную стохастическую нелинейную систему. Ее многомерность определяется наличием многих входов и выходов [158-160]. Входами системы принято считать те ее элементы, к которым прикладываются внешние воздействия - это векторы токов ЭПС i_2 и ЭДС подстанций e_1 . Выходами системы являются элементы, к которым приложены искомые величины (векторы токов ветвей i_v , векторы потенциалов узлов φ_y). Систему электрообеспечения электротранспорта можно представить в следующем виде (рис. 4.36).



Рисунок 4.36 - Условное обозначение связи между первичными и
вторичными параметрами СТЭ

СТЭ является существенно стохастической, поскольку ее параметры и структура (особенно тяговая сеть), а также входные векторы i_2 , e_1 являются

случайными. Нелинейность СТЭ определяется наличием в ней нелинейных полупроводниковых, релейных и ферромагнитных элементов.

Анализ многомерных стохастических нелинейных систем весьма сложен и базируется на методах математической статистики и теории вероятностей. В расчетах выходных параметров СТЭ используются как статистические, так и вероятностные методы. Первые позволяют получить оценки вероятностных характеристик либо входных, либо выходных параметров. Наоборот, методы теории вероятностей, с помощью которых можно вычислить вероятностные характеристики выходных параметров по вероятностным характеристикам входных, дают обычно однократные, но более сложные вычислительные алгоритмы. Их разработка требует проведения специальных теоретических исследований. На практике при расчетах СТЭ обычно используют различные комбинации методов математической статистики и теории вероятностей, что показано ниже.

При построении математической модели системы электрической тяги, адекватной реальной системе, необходимо иметь модель токопотребления, которая учитывает объективные и субъективные факторы, воздействующие на параметры движения поезда.

Регулировочные возможности в системе электроснабжения электрического транспорта весьма ограничены в отличие от электрических станций. Прежде всего можно регулировать напряжение на шинах тяговых подстанций. Регулирование напряжения на большинстве тяговых подстанций постоянного тока осуществляется при помощи переключателей ответвлений силовых трансформаторов, которые могут быть установлены в несколько фиксированных положений, определяемых конструкцией. Напряжение холостого хода подстанции при таком регулировании изменяется ступенчато с шагом, задаваемым регулировочным органом. Величина этого шага изменяется от одной ступени к другой (постоянство шага выдерживается конструктивно по отношению к первичному напряжению трансформатора). На тяговых подстанциях электрического транспорта с двойной

трансформацией регулирование можно выполнять как на преобразовательных, так и на главных понижающих трансформаторах. Нетяговые потребители накладывают ограничения на возможные положения регулирующих устройств (от понизительных трансформаторов получает питание не только тяга поездов, но и нетяговые потребители). В случае такого двойного регулирования диапазон изменения напряжения значительно увеличивается. На каждой тяговой подстанции можно установить только строго фиксированные уровни напряжения холостого хода, составляющие некоторое регулировочное множество. Кроме того, можно осуществлять включение на параллельную работу понизительных трансформаторов и преобразовательных агрегатов. Изменять режим системы электроснабжения электрического транспорта можно также, управляя работой ПСК и ППС. В последнее время появились вольтдобавочные устройства, использующие современную элементную базу [196,197]. В [188] предлагается концепция регулируемой СТЭ постоянного тока. При таких подходах возможности управления режимами системы электроснабжения расширяются.

На подстанциях, как правило, установлено различное силовое оборудование. Поэтому имеет место разброс параметров внешней системы электроснабжения, в результате установить одинаковые напряжения на всех подстанциях рассматриваемого участка практически невозможно.

Для выбора и обоснования метода расчёта системы электроснабжения для определения рациональных режимов, в 1-м разделе был выполнен анализ существующих методов расчёта.

Для определения условий обеспечения рациональных режимов СТЭ, очевидно, необходим для исследования нормальный режим со средними за определённый период размерами движения. Для задач управления режимами удобно использовать методы расчёта СТЭ, которые позволяют определять потери мощности в элементах системы электроснабжения как

функцию от координаты и времени. Впервые такой метод был предложен Почаевцем Э.С. [158].

При решении практических задач оптимизации системы электрической тяги рассматривают две самостоятельные задачи и отдельно определяют оптимальные параметры системы электроснабжения при некоторых фиксированных параметрах токопотребления и наоборот. Т.е. находят условные оптимумы. Для достижения безусловного оптимума можно воспользоваться методом итерационного приближения, решая обе задачи последовательно.

Для учёта в расчётах рациональных режимов электроподвижного состава необходимо ввести некоторый связующий параметр. Его наличие является характерной особенностью всех методов расчёта и оптимизации как систем электроснабжения, так и электроподвижного состава при их раздельном исследовании. Так, при моделировании работы электроподвижного состава связующим параметром обычно принимают функцию напряжения на токоприёмнике электровоза. В расчётах систем электроснабжения в качестве связующего параметра обычно принимают одну из трёх функций пути: ток, мощность (электрическая или механическая), удельный расход энергии.

Наилучшей из них будет такая, которая наименее чувствительна к изменению управляющих параметров оптимизации. В этом случае связь между обеими системами будет учтена наиболее полно. Функция тока хоть и является наиболее простой и удобной, но сильно зависит от уровня напряжения в тяговой сети. При его изменении машинисты электровазов будут изменять режим ведения для сохранения скорости движения. При этом будет изменяться и ток.

Функция мощности является более стабильной при изменении напряжения, но она сильно зависит от скорости движения поездов, что не позволит корректно исследовать реакцию системы электроснабжения при вариации скорости движения потока поездов.

Наиболее подходящей для данного случая является функция удельного расхода электроэнергии. Она меньше других зависит от управляющих параметров модели. Для более полного отражения реальных процессов, происходящих в системе, функцию удельного расхода энергии можно задать в зависимости не только от пути, но и от параметров математической модели (напряжение, скорость движения, масса поезда и др.).

Так как функция удельного расхода энергии представляет в настоящей модели электропотребление поездов различных типов, то она должна быть задана как нестационарная случайная функция. Причём её нельзя свести к стационарной выделением детерминированной составляющей, так как дисперсия не постоянна по длине пути.

Функцию удельного расхода электроэнергии, которая принята в качестве связующего параметра между системой электроснабжения и электроподвижным составом, можно определить традиционным способом – производством тяговых расчётов при изменяющемся напряжении на токоприёмнике электровоза.

Выбираем метод расчёта СТЭ на базе потоков восстановления. Возникает задача модернизации данного метода в части дополнения его расчётными выражениями для определения потерь мощности и электроэнергии в элементах тяговых подстанций с учётом регулировочных воздействий.

Модель потока поездов

Для совершенствования метода расчёта системы электроснабжения выявим закономерности потоков поездов, так как именно поезда являются нагрузкой для системы тягового электроснабжения. Поэтому в этом пункте проанализируем подходы к описанию потоков поездов на участках. Для современной организации движения поездов характерна значительная неравномерность в течение суток, месяца, года. Наряду с объективными причинами ярко выраженная неравномерность связана с недостаточным уровнем оперативного управления.

Причины возникновения неравномерности, исследованные в работах [9, 165, 292], могут быть сведены к следующим категориям:

- экономические, вызванные колебаниями объемов перевозок с ростом выпуска продукции, сезонностью производства, изменением связей между районами производства и потребления и т. п. ;
- технические, вызывающие колебания вагонопотоков при отправлении с пунктов зарождения или при образовании на станциях формирования из-за сложности соблюдения строгого ритма отправления вагонов как по количеству, так и по времени;
- организационные, создаваемые установившимися режимами работы предприятий, например, перерывами в выходные и праздничные дни, а также ночью, предоставление «окон» для ремонтных и реконструктивных работ, сгущение подвода поездов к пунктам сдачи перед отчетным временем (на 17 ч).

Коэффициент годовой неравномерности движения поездов [165]

$$K_{\text{нг}} = \frac{12 \cdot N_{\text{мес}}}{N_{\text{г}}}, \quad (4.88)$$

где 12 - количество месяцев в году;

$N_{\text{мес}}$ - размеры движения поездов за месяц,

$N_{\text{г}}$ - суммарные размеры движения за год,

Коэффициент суточной неравномерности

$$K_{\text{сут}} = \frac{24 \cdot N_{\text{ч}}}{N_{\text{сут}}}, \quad (4.89)$$

где 24 - количество часов в сутках.

$N_{\text{ч}}$ - интенсивность движения поездов в 1 ч,

$N_{\text{сут}}$ - размеры движения поездов за сутки,

Неравномерность движения поездов объясняется многими причинами. К объективным причинам следует отнести профиль пути, различие тяговых характеристик разных серий локомотивов и т.п. Субъективные причины вызваны различной квалификацией машинистов, разными техническими характеристиками локомотивов одной серии, погодными условиями и т.д. Наиболее существенными внешними причинами являются колебания интервалов готовности грузовых поездов на станциях, неравномерность прокладки на графике пассажирских поездов в течение суток, «окна» для выполнения ремонтно-путевых работ. Все вместе взятые причины неравномерности интенсивности движения определяют одно из свойств потока поездов - неопределенность.

Изменение положения поездов при движении по участкам является стохастическим процессом, неидентичным в пространстве и во времени. Исходя из субъективной оценки условий движения, каждый машинист выбирает режим ведения поезда. В результате поезда в потоке следуют с различными скоростями на различных расстояниях друг от друга, так что скорости поездов и временные интервалы между ними, зафиксированные в случайные моменты времени, являются случайными величинами. Поэтому движение поездов при регулярной детерминированной основе, определяемой графиком движения, по своей физической природе - процесс вероятностный. Также следует различать временной и пространственный процессы движения потока поездов [165] .

К первичным показателям потоков поездов будем относить показатели, определяемые потребностями экономики и населения в перевозках грузов и пассажиров. Все другие показатели являются вторичными или производными, так как они фактически отражают условия движения поездов. К первичным показателям относятся суммарная интенсивность движения пассажирских, грузовых и хозяйственных поездов за планируемый период времени и состав потока поездов. Для характеристики организации движения поездов целесообразно

использовать следующие показатели: интенсивность движения, плотность потока поездов, межпоездные интервалы. Под потоком поездов будем понимать число поездов за период времени.

Для определения рациональных режимов системы электроснабжения электротранспорта, технического нормирования и оперативного планирования поездной работы, для анализа закономерностей в потоках поездов будем пользоваться следующим соотношением [148]:

$$r = \lambda v, \quad (4.90)$$

где r – интенсивность движения, поездов/ч;

λ – плотность потока, поездов/км;

v – скорость движения поездов, км/ч.

Если известны две из этих трёх переменных, то третья определяется однозначно. Интенсивность является количественной характеристикой перевозочного процесса, а скорость отражает уровень технического оснащения участков и развития подвижного состава. Отсюда следует, что эти переменные можно считать независимыми переменными, а плотность – зависимой. Кроме перечисленных средних значений большое практическое и теоретическое значение имеет определение следующих величин:

$r_{\max}$ – максимальная интенсивность движения;

$v_{\text{св}}$ – скорость движения поездов в свободных условиях (в соответствии с тяговыми расчётами или графиком движения);

v_p – скорость, при которой интенсивность движения максимальна ($n = n_{\max}$);

$\lambda_{\max}$ – максимальная плотность, при которой движение поездов невозможно ($v \rightarrow 0$);

λ_p – плотность, при которой интенсивность движения максимальна ($r = r_{\max}$).

Зависимость «интенсивность-плотность» является основной диаграммой потока поездов (рис. 4.37) [148]. С ростом плотности потока поездов интенсивность увеличивается до максимального значения $n_{\max}$, соответствующего пропускной способности участка (точка В). Начиная с этой точки увеличение интенсивности на входе участка не приводит к её увеличению на выходе, о чём свидетельствует снижение интенсивности при дальнейшем увеличении плотности потока. Точка А характерна для свободных условий движения поездов без задержек. Точка С находится в зоне условий движения с задержками и показывает, что такой же интенсивности можно достигнуть при значительно меньшей плотности потока, т.е. содержание избытка рабочего парка вагонов не приводит к увеличению количественных показателей, а наоборот уменьшает их и ухудшает качественные показатели эксплуатационной работы. Для характеристики использования пропускной способности участка будем пользоваться уровнем загрузки, который представляет отношение достигнутой интенсивности движения r к максимальной $r_{\max}$ данного участка. С помощью данного показателя можно получить сопоставимые характеристики потока поездов на различных участках, т.к. данная величина безразмерная и может принимать любые значения от 0 до 1.

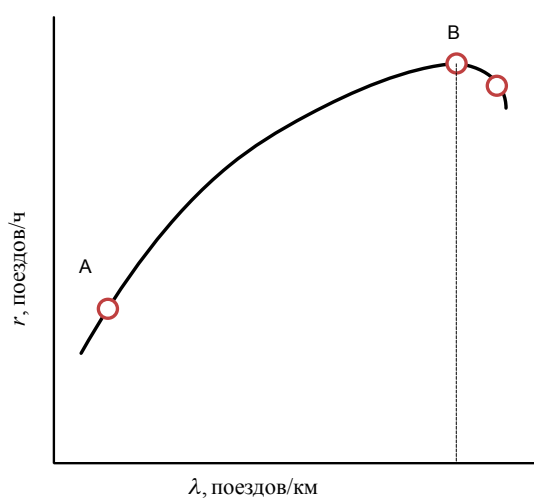


Рисунок 4.37 - Зависимость между интенсивностью и плотностью потока

поездов

Как показал статистический анализ параметров потоков поездов по выполненным графикам движения, при одностороннем движении этот поток имеет практически независимые смежные межпоездные интервалы, т. е. является потоком восстановления [151,152, 158]. В приложении А приведены результаты исследования выполненных графиков движения поездов на Приднепровской железной дороге.

Для определения рациональных режимов системы электроснабжения более удобно будет использовать интенсивность $\lambda(l)$, представляющую собой вероятность появления поезда на элементарном отрезке единичной длины, вычисленную при условии, что на расстоянии l от этого отрезка находится поезд (о характере расположения остальных поездов ничего не известно). Условимся считать элементарным отрезок, где может находиться не более одного поезда. Расположим фиксированный поезд в начале координат. В этом случае λ - характеристика в окрестности нуля описывается δ -функцией, которая «втягивает» в себя соответствующую площадь, ограничению «невозмущенной» λ -характеристикой.

Межпоездной интервал является случайной величиной, которая хорошо описывается логарифмически - нормальным распределением вероятностей [27]. Плотность вероятностей этого распределения $f(l)$ связана с интенсивностью потока $\lambda(l)$ интегральным уравнением Вольтерра 2-го рода

$$\lambda(l) = f(l) + \int_0^l \lambda(s)f(l-s)ds \quad (4.91)$$

Алгоритм решения данного уравнения сравнительно просто реализуется численными методами на ЭВМ.

Как и плотность потока поездов, форма кривой $\lambda(l)$ зависит от степени упорядоченности движения поездов и меняется от $\lambda(l) = \text{const}$ (простейший поток) до равно интервальной последовательности δ -функций (регулярный поток). При малом заполнении пропускной способности участка поток поездов близок к простейшему. С повышением интенсивности движения кривая $\lambda(l)$ приобретает аperiодический, а затем - колебательный характер вплоть до последовательности равно интервальных плотностей распределения, переходящих в δ -функции (метрополитен). λ -характеристики магистральных железных дорог обычно имеют аperiодический характер (рис. 4.38).

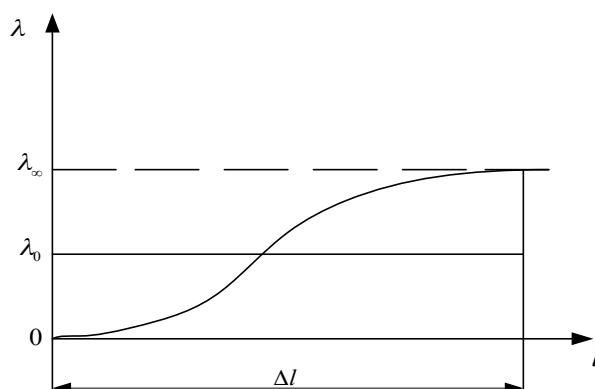


Рисунок 4.38 - Вид функции интенсивности потока поездов для магистральных железных дорог

Определим первый и второй начальные моменты количества поездов на расчетном участке. Разобьем этот участок на M элементарных отрезков Δl_i - таких, на каждом из которых возможно появление не более одного поезда. С каждым из таких отрезков свяжем случайную величину y_i , которая принимает следующие возможные значения (реализации): 0 - при отсутствии поезда; 1 - при наличии поезда.

Распределение дискретной случайной величины y_i зададим в табл. 4.18.

Таблица 4.18 - Распределение дискретной случайной величины y_i

Реализация y_i	0	1
Вероятность появления	P_{0i}	P_{1i}

Используя определение функции интенсивности, запишем равенство $P_{1i} = P(y_i = 1) = \lambda_i \cdot \Delta l_i$, из которого следует выражение для математического ожидания $\bar{y}_i = 0 \cdot P_{0i} + 1 \cdot P_{1i} = \lambda_i \cdot \Delta l_i$. Число поездов на всем расчетном участке выражается суммой

$$\eta = \sum_{i=1}^M y_i, \quad (4.92)$$

усредняя которую, находим

$$\bar{\eta} = \sum_{i=1}^M y_i = \sum_{i=1}^M \lambda_i \cdot \Delta l_i. \quad (4.93)$$

Для простейшего потока ($\lambda(l) = \text{const}$) можно записать

$$\bar{n} = \lambda(l_K - l_H); \quad \bar{n}^2 = \bar{n} + \bar{n}^2. \quad (4.94)$$

Известное свойство таких потоков - равенство математического ожидания и дисперсии. Отметим, что для таких потоков среднее число поездов на расчетном участке можно вычислить как долю суточного числа

поездов N в виде $\bar{n}^2 = \frac{N \cdot t_x}{T}$, где T - период проследования N поездов (сутки);

t_x - среднее время хода поезда по расчетному участку. Тогда, используя формулу (4.94), получим следующее выражение плотности восстановления

$\lambda = \frac{N}{T \cdot \vartheta}$, где ϑ - средняя скорость движения на расчетном участке.

Большое значение для рациональной организации движения на железнодорожных участках и наиболее эффективного использования средств, вкладываемых в развитие транспорта, имеет правильная оценка пропускной способности. В последние годы наметилась тенденция

увеличения количества поездов повышенной массы и длины, что усложняют условия работы системы электроснабжения, особенно на дорогах постоянного тока [293]. Это приводит к тому, что пропускная способность устройств электроснабжения определяет наличную пропускную способность участков.

Исследования влияния различного количества поездов в межподстанционной зоне (МЗ) и изменения межпоездного интервала на режимы работы системы тягового электроснабжения проведены в работах [9, 76, 120, 174], проблеме совершенствования расчетов наличной пропускной способности посвящена монография [165]. Железнодорожный участок представляет собой множество МЗ и для того, чтобы оценить влияние потока поездов по всему участку в целом на режимы работы системы тягового электроснабжения необходимо определить:

- 1) наличную пропускную способность участка по условиям электроснабжения с учетом длины МЗ и всего участка;
- 2) расчетные показатели потока поездов: интенсивность - r и плотность -

λ , соответствующие пропускной способности участка по условиям электроснабжения;

- 3) значение плотности потока поездов, при которой реализуется максимальная интенсивность движения на участке.

Согласно действующей методики [294] наличная суточная пропускная способность участка по устройствам электроснабжения при параллельном графике движения определяется наибольшим количеством поездов, которое может быть пропущено за сутки, учитывая ограничения по мощности оборудования тяговых подстанций, нагреванию проводов контактной подвески, напряжению на токоприемнике электроподвижного состава:

$$N_{\text{уч}} = \frac{(1440 - t_{\text{техн}}) \alpha_{\text{н}}}{J_{\text{р}}}, \quad (4.95)$$

где $t_{\text{техн}}$ - продолжительность свободного от поездов промежутка

времени, предоставляемого в графике движения для выполнения работ по текущему содержанию пути, устройств и сооружений, мин;

$\alpha_{\text{н}}$ - коэффициент надежности соответствующей группы оборудования системы тягового электроснабжения;

$I_{\text{р}}$ - расчетный межпоездной интервал, мин.

Для расчета межпоездного интервала $I_{\text{р}}$, необходимо определить число

поездов n_0 , которое может одновременно находиться в зоне питания рассматриваемой подстанции исходя из мощности каждого из расчётных элементов силового оборудования:

$$n_0 = \frac{1,1 I_{\text{эпт}}}{\sum_{f \in F} \frac{1}{\alpha_{\text{пф}}} \cdot I_{\text{ф}} C_f}, \quad (4.96)$$

где F - число перегонных фидеров данной подстанции;

$I_{\text{эпт}}$ - эффективный ток тяговой подстанции, обеспечиваемый соответствующими расчётными элементами силового оборудования при отключённых резервных агрегатах;

$\alpha_{\text{пф}}$ - коэффициент, зависящий от числа путей ($\alpha_{\text{пф}} = 0,9$ для двухпутного и $\alpha_{\text{пф}} = 0,85$ для однопутного участков);

$I_{\Phi f}$ - ток, приходящийся на фидер от средневзвешенного поезда;

C_f - коэффициент, учитывающий размеры движения по путям, питаемым фидерами подстанции:

$$C_f = \frac{N_f}{\sum_{f \in F} N_f}, \quad (4.97)$$

где N_f - число поездов в сутки на пути, питаемом фидером f (для однопутного участка в обоих направлениях).

Для двухпутного участка межпоездной интервал j_f на пути, питаемом фидером f :

$$j_f = \frac{t_{xf}}{n_{0f}}, \quad (4.98)$$

где t_{xf} - общее время хода поезда, установленной массы по пути межподстанционной зоны, питаемому фидером f .

Число поездов, которые могут находиться на МЗ, определяется по следующей формуле [9, 76]:

$$n_0 = \frac{t_x}{J_p}, \quad (4.99)$$

где t_x - время хода поезда по МЗ.

Максимальная плотность участка по условиям электроснабжения λ_{max} представляет собой максимальное количество поездов, которые могут находиться на 1 км МЗ:

$$\lambda_{\max} = \frac{n_0}{L_{\text{МЗ}}}, \quad (4.100)$$

где $L_{\text{МЗ}}$ - длина МЗ, км.

Поскольку межпоездной интервал является величиной обратной интенсивности потока поездов r , то максимальную интенсивность на МЗ по условиям электроснабжения $r_{\max}$ можно определить по формуле:

$$r_{\max} = \frac{n_0}{t_x} = \frac{1}{J_p}. \quad (4.101)$$

Преобразуя формулы (4 .100), (4 .101) находим пропускную способность МЗ $N_{\text{МЗ}}$, т.е. максимальное количество поездов, которые могут находиться на 1 км МЗ, в течении времени хода расчетного поезда по МЗ t_x :

$$N_{\text{МЗ}} = \frac{n_0}{L_{\text{МЗ}}} = \frac{t_x \cdot r_{\max}}{L_{\text{МЗ}}} \Rightarrow \lambda_{\max} = t_x r_{\max} \cdot \frac{1}{L_{\text{МЗ}}} \Rightarrow \frac{\lambda_{\max}}{t_x} = \frac{r_{\max}}{L_{\text{МЗ}}}, \quad (4.102)$$

Для того, чтобы определить наличную пропускную способность по условиям электроснабжения всего участка, необходимо определить максимальное количество поездов, которое может быть пропущено по участку, длиной $L_{\text{уч}}$ в течении времени t :

$$N_{\text{уч}} = \frac{r_{\max}}{L_{\text{уч}}} = \frac{\lambda_{\max}}{t}, \quad (4.103)$$

где $L_{\text{уч}}$ - длина участка, км.

t - время движения расчетного поезда по участку, час.

С учетом $t_{\text{техн}}$ и α_n формула (4 .103) принимает вид:

$$N_{\text{уч}} = \frac{\lambda_{\text{max}} \cdot \alpha_{\text{н}}}{t + t_{\text{тех}}} = \frac{r_{\text{max}} \cdot \alpha_{\text{н}}}{V(t + t_{\text{тех}})}, \quad (4.104)$$

где V - скорость следования расчетного поезда по участку, км/час.

В [44] ставится задача определения такого значения плотности потока поездов при котором реализуется максимальная интенсивность движения на участке. Решить данную задачу можно, выполнив преобразования выражения (4.104):

$$\lambda = \frac{r_{\text{max}} \cdot t}{L_{\text{уч}}}, \quad (4.105)$$

Выражения (4.103) - (4.105) справедливы при следующих допущениях:

- тип графика движения – параллельный;
- все типы поездов приведены к расчетному.

Поскольку фактические размеры движения не всегда соответствуют наличной пропускной способности участка, для исследования влияния потока поездов на систему электроснабжения целесообразно ввести новый пространственно-временной показатель потока поездов $\xi \left(\frac{\text{поездов}}{\text{км} \cdot \text{час}} \right)$, соответствующий фактически выполненным размерам движения на участке. Определение зависимостей данного показателя потока поездов от режимов работы системы тягового электроснабжения позволит повысить энергоэффективность перевозочного процесса за счет повышения качества управления потоком поездов.

Таким образом, фактические размеры движения для любого типа графика движения поездов можно определить из следующего выражения:

$$\xi_{\text{ф}} = \frac{r_{\text{сред}}}{L_{\text{уч}}} = \frac{\lambda_{\text{сред}}}{t_{\text{ср}}}, \quad (4.106)$$

где $r_{\text{сред}}$ - средняя интенсивность движения поездов на участке,

$$\left(\frac{\text{поездов}}{\text{час}} \right);$$

$L_{\text{уч}}$ - длина расчетного участка, км;

$\lambda_{\text{сред}}$ - средняя плотность поездов на участке, поездов/км $\left(\frac{\text{поездов}}{\text{км}} \right)$;

$t_{\text{ср}}$ - средневзвешенное время хода поезда по участку, с учетом всех типов поездов, ч.

$$t_{\text{ср}} = \frac{\sum t_i \cdot n_i}{\sum n_i}, \quad (4.107)$$

где t_i - время следования поезда i -й категории по участку, ч;

$\sum n_i$ - количество поездов i -й категории.

Для железнодорожного участка Синельниково-2 – Чаплино проведен анализ наличной пропускной способности по условиям электроснабжения, имеющего следующие расчетные данные:

- 1) длина участка – 73 км;
- 2) длинна МЗ:
 - Синельниково-2 – Раздоры (СР) – 16 км,
 - Раздоры-Письменная (РП) – 21 км,
 - Письменная-Ульяновка (ПУ) – 19 км,
- 3) Ульяновка-Чаплино (УЧ) – 17 км;
- 4) вес расчетного поезда – 4200 т, при средней скорости – 60 км/ч;
- 5) межпоездной интервал по условиям электроснабжения 8 мин.

На рис. 4.39 представлены значения ξ для каждой МЗ участка Синельниково-2 – Чаплино по условиям электроснабжения. Максимальная интенсивность потока поездов была 7,68 поездов/ч и максимальная плотность 0,128 поездов/км. Данные значения параметров потока поездов показывают лимитирующую пропускную способность данного участка по условиям электроснабжения. При данном значении плотности потока

поездов реализуется максимальная интенсивность движения на участке. По

формуле (4 .106) получено $\xi_{\Phi} = 0,105 \frac{\text{поездов}}{\text{км} \cdot \text{ч}}$, соответствующее

максимальным размерам движения на участке по условиям электроснабжения.

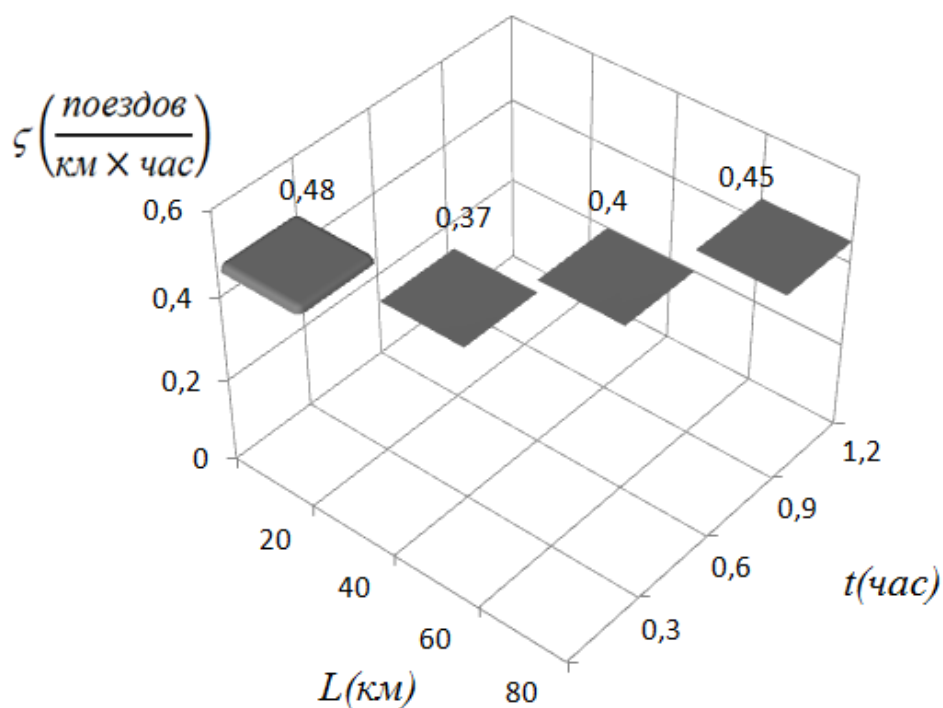


Рисунок 4.39 - Возможные размеры движения на участке по условиям электроснабжения

Таким образом, формулы (4 .91) - (4 .94), а также (4 .100) - (4 .107) представляют собой модель потока поездов для решения задач энергосбережения в СТЭ.

Модернизированный метод расчёта систем электроснабжения тяги поездов, основанный на представлении потока поездов как потока восстановления

Рассмотрим однопутный участок постоянного тока. Разобьем его на M элементарных отрезков Δl_i . Тогда мгновенное значение тока в расчетном сечении может быть представлено в виде суммы двух составляющих [158]

$$i_s = i_{\Sigma s} + i_{ns}, \quad (4.108)$$

где

$$i_{\Sigma s} = \sum_{i=1}^M \psi_{si} \cdot i_i \cdot \gamma_i; \quad i_{ns} = \sum_{j=1}^n g_{sj} \cdot e_{Kj}.$$

Первая составляющая $i_{\Sigma s}$ отражает влияние токов поездов на значение токов в расчётном сечении тяговой сети, вторая составляющая i_{ns} - влияние неравенства напряжений на шинах тяговых подстанций на распределение токов в сечениях тяговой сети; ψ_{si} - значение ФТР сечения „S” при расположении поезда на i -м отрезке Δl_i ; i_i - мгновенное значение тока поезда на этом отрезке; e_{Kj} - мгновенное значение контурной ЭДС j -го контура; g_{sj} - элементы S - строки матрицы сопротивлений R_{11}^{-1} , определяющие ток.

Применяя к выражению (4 .108) операцию математического ожидания и учитывая независимость случайных величин i_i , γ_i , получим $\bar{i}_s = \bar{i}_{\Sigma s} + \bar{i}_{ns}$,

где

$$\bar{i}_{\Sigma s} = \sum_{i=1}^M \psi_{si} \bar{i}_i \cdot \lambda_i \cdot \Delta l_i; \quad \bar{i}_{ns} = \sum_{j=1}^n g_{sj} \cdot e_{Kj}.$$

Выполняя предельный переход от суммы к интегралу, преобразуем первое слагаемое к виду

$$\bar{i}_{3s} = \int_{l_H}^{l_K} \psi_3(l) \cdot i(l) \cdot \lambda(l) dl, \quad (4.109)$$

откуда при стационарном токопотреблении ($\bar{i}(l) = \bar{i}$, $\lambda(l) = \lambda$) находим

$$i_{3s} = \bar{i} \cdot \bar{n} \cdot \bar{\psi}_s, \quad (4.110)$$

где

$$\bar{\psi}_s = \frac{1}{l_K - l_H} \cdot \int_{l_H}^{l_K} \psi_s(l) dl;$$

$$\bar{n} = \lambda(l_K - l_H).$$

Для многопутных участков, состоящих из m отрезков (секций) стационарного токопотребления, интеграл (4.110) можно представить в виде суммы

$$\bar{i}_{3s} = \sum_{v=1}^m \bar{i}_v \cdot \bar{n}_v \cdot \bar{\psi}_{sv}; \quad \bar{n}_v = \lambda_v \cdot l_v. \quad (4.111)$$

Определим коэффициенты токораспределения $\bar{\psi}_{sv}$ для фидеров изолированных зон. Каждый путь такой зоны разобьем на 4 секции стационарного токопотребления, которые пронумеруем слева направо. Тогда, вычисляя средние значения ФТР соответствующих секций типовых межподстанционных зон, получим коэффициенты, приведенные в табл. 4.19.

При стационарном токопотреблении по всей зоне коэффициенты табл. 4.19 для каждой схемы суммируются. В этом случае, учитывая равенство $\bar{n}_v = \frac{\bar{n}_3}{4}$, находим коэффициенты, приведенные в последнем столбце таблицы.

Таблица 4.19 - Коэффициенты токораспределения для фидеров
изолированных зон

№ п/ п	Схема питания	Общий множитель	$\bar{\Psi}_{lv}$ при ν								$\bar{\Psi}_1$
			1	2	3	4	5	6	7	8	
1	О	1	1	1	1	1	-	-	-	-	1
2	Д	$\frac{1}{8}$	7	5	3	1	-	-	-	-	$\frac{1}{2}$
3	У	$\frac{1}{16}$	13	7	3	1	1	3	3	1	$\frac{1}{2}$
4	Т	$\frac{1}{16}$	11	5	3	1	3	5	3	1	$\frac{1}{2}$
5	П	$\frac{1}{16}$	7	5	3	1	7	5	3	1	$\frac{1}{2}$

Примечание: О-одностороннее питание, Д-двухстороннее питание, У-узловое питание, Т-трёхузловое питание, П- параллельное питание.

Для схем двухстороннего питания однопутного и двухпутного участков эти коэффициенты одинаковы, т.е. при стационарном токопотреблении по всей зоне средний ток фидера не зависит от числа узлов тяговой сети. Возводя в квадрат выражение (4 .109) и переходя к математическому ожиданию, получим

$$\bar{i}_g^2 = \bar{i}_{gs}^2 + 2 \cdot \bar{i}_{gs} \cdot \bar{i}_{ns} + \bar{i}_{ns}^2, \quad (4.112)$$

где

$$\bar{i}_{gs}^2 = \int_{l_H}^{l_K} \psi_s^2(l) \cdot \bar{i}^2(l) \cdot \lambda(l) dl + 2 \cdot \int_{l_H}^{l_K} \psi_s(l_1) \cdot \bar{i}(l_1) \cdot \lambda(l_1) \cdot \left(\int_{l_1}^{l_K} \psi_s(l_2) \cdot \bar{i}(l_2) \cdot \lambda(l_2 - l_1) dl_2 \right) dl_1;$$

$$\bar{i}_{ns}^2 = \sum_{j=1}^n g_{sj}^2 \cdot \bar{e}_{kj}^2 + 2 \cdot \sum_{j=1}^n g_{sj} \cdot \sum_{i>j}^n g_{si} \cdot \bar{e}_{ki} \bar{e}_{kj}.$$

Средние потери мощности в тяговой сети от нагрузок поездов выразим интегралом от эпюры среднего квадрата тока на расчетном участке [158]

$$\Delta \bar{p} = \int_l \bar{i}_g^2(s) \cdot r_0(s) ds, \quad (4.113)$$

На рис. 4.40 приведена структурная схема МЗ. По ней довольно просто проследить составляющие потерь электроэнергии в подстанционном оборудовании тяговой подстанции постоянного тока. Общие потери активной мощности в оборудовании тяговой подстанции постоянного тока могут быть определены из следующего выражения [208]:

$$\Delta P_{ТП} = \Delta P_{ТПТ} + \Delta P_{ПТ} + \Delta P_{В} + \Delta P_{СФ} + \Delta P_{СН}, \quad (4.114)$$

где $\Delta P_{ТПТ}$ - потери в понизительном трансформаторе;

$\Delta P_{ПТ}$ - потери в тяговом трансформаторе;

$\Delta P_{В}$ - потери в выпрямительном агрегате;

$\Delta P_{СФ}$ - потери в сглаживающем фильтре;

$\Delta P_{СН}$ - потери на собственные нужды тяговой подстанции.

Составляющая потерь на собственные нужды тяговой подстанции $\Delta P_{СН}$ может быть определена из [295]. Принцип расчёта $\Delta P_{СН}$, применяемые при этом методы раскрыты в [60, 61]. Рассмотрим составляющую потерь $\Delta P_{ТПТ} + \Delta P_{ПТ}$. Как известно, потери в трансформаторах состоят из потерь холостого хода и потерь короткого замыкания.

$$\Delta P_{ХХ} = X_1 \cdot \Delta P_{ХХПТ} + X_2 \cdot \Delta P_{ХХТТ}, \quad (4.115)$$

где X_1 и X_2 - количество одновременно работающих ГПТ и ПТ,

$\Delta P_{ХХГПТ}$ и $\Delta P_{ХХПТ}$ - потери холостого хода ГПТ и ПТ соответственно.

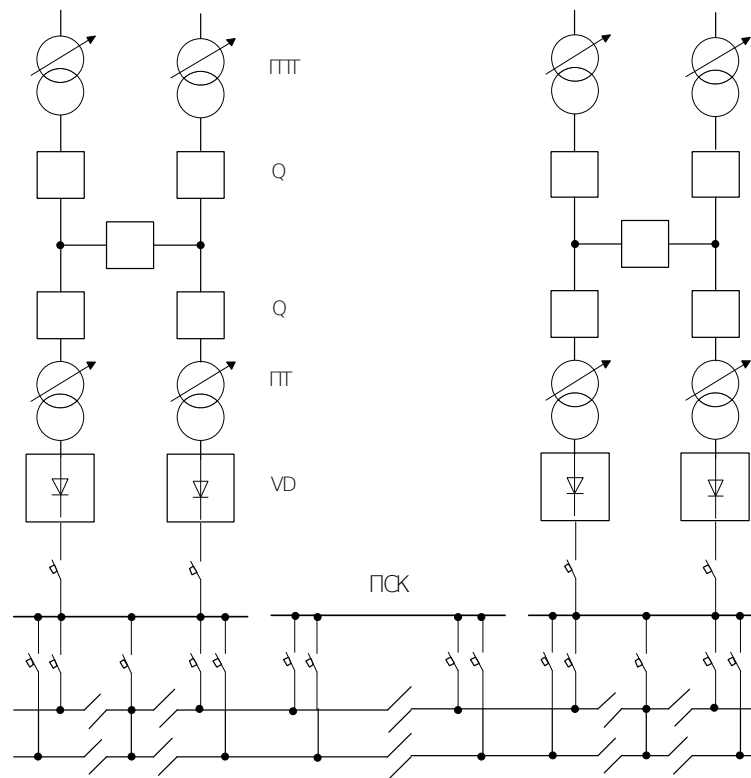


Рисунок 4.40 - Структурная схема МЗ

Потери короткого замыкания в ГПТ и ПТ могут быть определены из следующего выражения:

$$\Delta P_{\text{КЗ}} = \Delta P_{\text{КЗПТ}} + \Delta P_{\text{КЗГПТ}} \cdot \left(\frac{I_{\text{НОМ ПТ}}}{I_{\text{НОМ ГПТ}}} \right)^2, \quad (4.116)$$

где $\Delta P_{\text{КЗПТ}}$ и $\Delta P_{\text{КЗГПТ}}$ - потери короткого замыкания тягового и понижающего трансформатора соответственно;

$I_{\text{НОМ ПТ}}$ и $I_{\text{НОМ ГПТ}}$ - номинальные токи ПТ и ГПТ соответственно.

Тогда потери мощности в трансформаторах ГПТ и ПТ можно определить как:

$$\Delta P_{\text{Т}} = \Delta P_{\text{ХХ}} + X_1 \cdot \Delta P_{\text{КЗГПТ}} \cdot \left(\frac{I_{\text{НОМ ПТ}}}{I_{\text{НОМ ГПТ}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\kappa_3}{X_1} \right)^2 + X_2 \cdot \Delta P_{\text{КЗПТ}} \cdot \left(\frac{\kappa_3}{X_2} \right)^2, \quad (4.117)$$

где $\kappa_3 = \frac{I_d}{I_{d \text{ НОМ}}}$ - коэффициент загрузки преобразователя;

В (4 .117) учтён тот очевидный факт, что потери мощности в случае параллельной работы агрегатов с суммарной нагрузкой I_d равны значению

потерь в одном агрегате при нагрузке I_n / X_2 , умноженной на количество параллельно работающих агрегатов, то есть в нашем случае X_2 .

Рассмотрим составляющую потерь в преобразователях (выпрямителях) тяговой подстанции ΔP_B . В каждом плече мостовой секции m -пульсовой схемы содержится следующее число диодов:

- соединённых параллельно

$$a = \frac{I_{d \text{ ном}}}{3k_{\text{сх}} I_F}, \quad (4.118)$$

где $k_{\text{сх}}$ - коэффициент схемы;

I_F - среднее значение допустимого прямого тока.

- соединённых параллельно

$$s = \frac{2\pi k_{\text{сх}}}{m} \cdot \frac{U_{d0}}{U_{RWM}}, \quad (4.119)$$

где U_{d0} - выпрямленное напряжение на холостом ходе выпрямителя;

U_{RWM} - допустимое обратное напряжение, рекомендуемое для расчётов.

Среднее значение потерь мощности в одном диоде [208]

$$\Delta P_B = \left(U_{T0} + r_T \frac{I_d}{3k_{\text{сх}} a} \right) \cdot \frac{I_d}{3k_{\text{сх}} a}, \quad (4.120)$$

где r_T - дифференциальное сопротивление;

U_{T0} - пороговое напряжение диода.

Тогда во всех m плечах схемы выпрямления с учётом формул (4 .118) и (4 .119)

$$\Delta P_B = \frac{U_{T0} + r_{m\kappa_3} I_F}{U_{RWM}} \cdot \frac{2\pi}{3} \cdot U_{d0} \cdot I_d. \quad (4.121)$$

Первый сомножитель в (4 .121) зависит только от параметров диода. Умножив и разделив выражение (4 .121) на $I_{d \text{ ном}}$ и обозначая через постоянный коэффициент все константы, приходим к выражению

$$\Delta P_B = C_B \kappa_3, \quad (4.122)$$

$$\text{где } C_B = \frac{U_{T0} + r_m \kappa_3 I_F}{U_{RWM}} \cdot \frac{2\pi}{3} \cdot U_{d0} \cdot I_{d0}.$$

Рассмотрим составляющую потерь $\Delta P_{CФ}$:

$$\Delta P_{CФ} = C_m R_{\text{бл}} I_d^2 = C_m R_{\text{бл}} I_{d \text{ ном}} \kappa_3^2 = C_{сф} \kappa_3^2, \quad (4.123)$$

где C_m и $R_{\text{бл}}$ - количество блоков и сопротивление одного блока ректора сглаживающего фильтра.

В соответствии с нормативными документами при эксплуатации электроустановок должны осуществляться мероприятия, снижающие потребление как активной, так и реактивной мощности. Такие организационно-технические мероприятия, как правило, не требуют капитальных дополнительных затрат и поэтому целесообразны во всех случаях. На тяговых подстанциях постоянного тока снизить потребление реактивной мощности можно при более рациональной эксплуатации преобразовательных агрегатов.

Величина потребляемой реактивной мощности при электротяге постоянного тока зависит от следующих основных факторов:

- коэффициента загрузки преобразовательных агрегатов;
- разности между фактическим значением напряжения на шинах 6; 10 и 35 кВ и номинальным паспортным значением напряжения сетевых обмоток преобразовательных трансформаторов;
- типа преобразовательных трансформаторов (напряжения короткого замыкания и тока холостого хода).

В [55, 56] приведены принципы расчёта потерь электроэнергии в силовых трансформаторах тяговых подстанций переменного тока. Для тяговых подстанций постоянного тока процессы аналогичные и можно воспользоваться теми же формулами. Более того, расчёты потерь упрощаются, так как все фазы силовых понижающих трансформаторов на

тяговых подстанциях постоянного тока загружены симметрично. Отметим также, что данными формулами можно пользоваться и для расчёта потерь мощности и электроэнергии в преобразовательных трансформаторах.

Для соединенных в звезду первичной и районной обмоток расчет потерь мощности в них не вызывает затруднений, поскольку:

$$\begin{aligned}\Delta P_1 &= r_1 (I_{1A}^2 + I_{1B}^2 + I_{1C}^2), \\ \Delta P_p &= r_p (I_{pA}^2 + I_{pB}^2 + I_{pC}^2),\end{aligned}\quad (4.124)$$

где ΔP - потери мощности в первичной обмотке;

$r_1 = 0,5 U_{1H}^2 P_{кз} / S_H^2$ - активное сопротивление одной фазы первичной обмотки трансформатора, приведенное к первичному напряжению;

$r_p = \gamma U_{pH}^2 P_{кз} / S_H^2$ - активное сопротивление фазы районной обмотки (коэффициент γ принимается равным 0,5 или 0,75 в зависимости от конструктивного выполнения районной обмотки);

$I_{1A}^2, I_{1B}^2, I_{1C}^2, I_{pA}^2, I_{pB}^2, I_{pC}^2$ - фазные токи первичной и районной обмоток соответственно;

S_H - номинальная мощность тягового трансформатора;

U_{1H} и U_{pH} - линейное напряжение первичной и районной обмоток соответственно;

$P_{кз}$ - мощность короткого замыкания.

Потери мощности в тяговой обмотке будут определяться по формуле:

$$\Delta P_T(t) = r_{Tф} (I_L^2(t) + I_{II}^2(t) + I_p^2(t)), \quad (4.125)$$

где $r_{Tф}$ - сопротивление тяговой обмотки, приведенное к фазному напряжению,

$I_L(t), I_{II}(t)$ - токи левого и правого плеч питания.

С учетом (4 .124) и (4 .125) потери мощности в тяговых трансформаторах могут быть определены за формулой:

$$\Delta P(t, k) = kP_{xx} + \frac{1}{k} (r_1 (I_{1A}^2(t) + I_{1B}^2(t) + I_{1C}^2(t)) + r_p (I_{pA}^2(t) + I_{pB}^2(t) + I_{pC}^2(t)) + r_{T\Phi} (I_{л}^2(t) + I_{п}^2(t) + I_{р}^2(t))),$$

(4.126)

где запись $\Delta P(t, k)$ означает, что потери активной мощности рассматриваются в тот момент времени t , когда включены на параллельную работу k силовых трансформаторов;

P_{xx} - постоянные потери (холостого хода).

Для потерь реактивной мощности можно составить аналогичное уравнение:

$$\Delta Q(t, k) = 10^{-2} k I_0 S_H + \frac{1}{k} (x_1 (I_{1A}^2(t) + I_{1B}^2(t) + I_{1C}^2(t)) + x_p (I_{pA}^2(t) + I_{pB}^2(t) + I_{pC}^2(t)) + x_T (I_{л}^2(t) + I_{п}^2(t) + I_{р}^2(t))),$$

(4.127)

где I_0 - ток холостого хода трансформатора;

x_1, x_p, x_T - индуктивные сопротивления первичной, районной и тяговой обмоток трансформатора, выраженные через соответствующее напряжение короткого замыкания.

Интегрирование выражений (4.126), (4.127) позволяет перейти от потерь мощности к потерям активной энергии. Воспользуемся статистическими методами оценки потерь мощности и энергии в тяговых трансформаторах. Для этого представим процесс изменения тока нагрузки в виде следующей математической модели:

$$I(t) = m(t) + \varepsilon(t),$$

(4.128)

где $m(t)$ - математическое ожидание тока нагрузки, в общем случае зависимое от времени;

$\varepsilon(t)$ - центрированная случайная составляющая.

Тогда математическое ожидание квадрата тока нагрузки будет иметь вид:

$$M[I^2(t)] = M[m(t) + \varepsilon(t)]^2 = m^2(t) + \sigma^2. \quad (4.129)$$

Средние потери активной и реактивной мощности с учетом (4.126), (4.127) можно определить по формулам:

$$\begin{aligned} M[\Delta P(t, k)] = & kP_{xx} + \frac{1}{k} \{r_1[m_{1A}^2(t) + m_{1B}^2(t) + m_{1C}^2(t)] + \\ & + 3r_p m_p^2(t) + r_{T\phi}[m_l^2(t) + m_n^2(t) + m_p^2(t)] + r_1(\sigma_{1A}^2 + \sigma_{1B}^2 + \sigma_{1C}^2) + \\ & + 3r_p \sigma_p^2 + r_{T\phi}[\sigma_l^2(t) + \sigma_n^2(t) + \sigma_p^2(t)]\} = kP_{xx} + \frac{1}{k} [M_a^2(t) + \sigma_a^2], \end{aligned} \quad (4.130)$$

$$M[\Delta Q(t, k)] = 10^{-2} kI_0 S_n + \frac{1}{k} [M_p^2(t) + \sigma_p^2], \quad (4.131)$$

где M_a , M_p , σ_a^2 , σ_p^2 - математические ожидания и дисперсии сумм случайных процессов, которые стоят в правых частях выражений (4.130) и (4.131).

Если с помощью статистического моделирования на базе представления потока поездов как потока восстановления (или по данным АСКУЭ) определить числовые характеристики процессов изменения токов тяговой нагрузки, то дальнейшее интегрирование позволит рассчитать среднесуточные потери энергии в тяговых трансформаторах, что важно знать как для учета потерь в системе электроснабжения, так и для оценки эффективности управления режимами системы электроснабжения электротранспорта.

Модернизированный метод расчёта коэффициентов потерь мощности для измерения потерь электроэнергии

Лицензионная деятельность субъектов хозяйствования и реструктуризация транспортной инфраструктуры Украины обостряет нерешенный вопрос распределения потерь электрической энергии в тяговой

сети между локомотивным хозяйством и хозяйством электроснабжения. К этому времени на железных дорогах Украины не существует единого измерительного комплекса, который позволит с коммерческой точностью определить разницу электроэнергии между отпущенной от шин тяговой подстанции и потребленной электроподвижным составом. Причиной тому является главная специфика работы электрифицированного транспорта - перемещение в пространстве и изменение величины нагрузки во времени.

Одним из распространенных определения потерь электроэнергии является метод «ампер-квадрат-часов» [121, 132, 296, 297], удобный и точный для стационарной энергетики, где определяются потери для объектов с постоянными характеристиками, таких как линии, трансформаторы, преобразователи и т.п.

Известна разработка Ростовского института инженеров железнодорожного транспорта, где создан счетчик потерь электроэнергии Ф440П на базе счетчика электроэнергии Ф440 переменного тока. Метод измерения потерь энергии основан на регистрации величины ампер-квадрат-часов на фидерах тяговых подстанций. Счетчик устанавливается на питающем фидере, измеряет ампер-квадрат-часы в единицу времени и масштабирует их до потери электроэнергии постоянным коэффициентом, который физически представляет собой сопротивление тяговой сети на плече приложения эквивалентной нагрузки. Коэффициент пропорциональности определяется специальной имитационной моделью для конкретного участка, численно равный отношению двух интегральных величин - потерь электроэнергии и интегрального значения квадрата тока, и после введения в счетчик не корректируется.

Однако, как показал опыт [121], коэффициент настройки зависит от величины уравнительного тока, количества поездов на зоне и т.д., что и определяет значительную погрешность (до 7,5 %) этого способа. Погрешность можно уменьшить, заложив в механизм счетчика диапазон предварительно рассчитанных коэффициентов настройки. Погрешность

определения потерь существенно уменьшается при расчете коэффициентов настройки в режиме реального времени. Решение этой задачи возможно при функционировании автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии.

Подобный счетчик потерь электроэнергии можно реализовать и на современной элементной базе, организовав учёт потерь на базе единого устройства, например, счетчика АЛЬФА Плюс (А2) и специализированного программного пакета AlphaPlus_LS. Последняя разработка компании Эльстер Метроника - микропроцессорный счетчик электроэнергии Альфа А1800 с функцией учета потерь (в модификации счетчика присутствует буква V) и специализированный программный пакет Metercat (AlphaPlus W2.1) [127]. Однако нерешенным остается вопрос численного определения и закономерности изменения коэффициента настройки в общем виде. В данном пункте под эквивалентными сопротивлениями будем понимать коэффициенты потерь.

Для решения поставленной задачи и совершенствования косвенного способа определения потерь электрической энергии в тяговой сети предлагается несколько сузить понятие коэффициента потерь до отношения мгновенных значений потерь мощности и квадратов токов фидеров, исследовать соответствующие зависимости для различных схем питания с последующим определением эквивалентного значения.

Исходя из поставленной задачи, запишем основное соотношение, которое в каждый момент времени является сопротивлением участка тяговой сети от шин тяговой подстанции до нагрузки и определяет потери мощности от тока данного фидера контактной сети [52].

$$r(t) = \frac{\Delta P(t)}{I_{\Phi}^2(t)}, \quad (4.132)$$

где $\Delta P(t)$ – мгновенное значение потерь мощности в тяговой сети, Вт;

$I_{\Phi}^2(t)$ – квадрат действующего значения тока фидера в данный момент времени, А².

Рассмотрим простейшую консольную схему питания при проследования участком одного электроподвижного состава с постоянной нагрузкой и средней скоростью (рис. 4.41). В этом случае мгновенное значение тока фидера в каждый момент времени равна току нагрузки. Поскольку последнее не меняется, то квадрат тока фидера является постоянной величиной на промежутке времени от начала движения (0) до значения, равного времени хода поезда по подстанционной зоне.

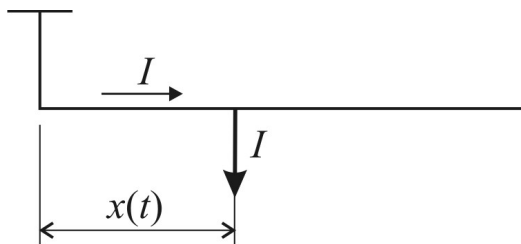


Рисунок 4.41 - Расчетная схема консольной схемы питания

Потери мощности в тяговой сети определяются произведением квадрата тока фидера и сопротивления соответствующего участка тяговой сети. В общем виде для консольной схемы

$$\Delta P(t) = r_0 \cdot x(t) \cdot I_{\Phi}^2(t) , \quad (4.133)$$

где r_0 – удельное сопротивление тяговой сети, Ом/км;

$x(t)$ – расстояние от шин тяговой подстанции до нагрузки в данный момент времени, км.

Подставляя значение $\Delta P(t)$ для консольной схемы питания в общем виде в формулу (4.132), получим значение мгновенного сопротивления при движении поезда по фидерной зоне

$$r(t) = \frac{r_0 \cdot x(t) \cdot I_{\Phi}^2(t)}{I_{\Phi}^2(t)} = r_0 \cdot x(t) . \quad (4.134)$$

В свою очередь, $x(t) = \frac{L}{T} \cdot t$, где L – длина участка, км; T – время движения поезда по участку, мин.

Преобразуя уравнения движения поезда по участку длиной L на протяжении времени T , окончательно получим

$$r(t) = \frac{r_0 L}{T} \cdot t. \quad (4.135)$$

На практике большой интерес имеет интегральное значение потерь электрической энергии на некотором интервале T . Введем определение эквивалентного значения сопротивления тяговой сети на периоде T в виде следующего выражения:

$$r_{\text{екв}} = \frac{\Delta W}{\int_0^T I_{\Phi}^2(t) dt} = \frac{\int_0^T r(t) I_{\Phi}^2(t) dt}{\int_0^T I_{\Phi}^2(t) dt}. \quad (4.136)$$

Для консольной схемы питания получим

$$r_{\text{екв}} = \frac{\int_0^T \frac{r_0 L}{T} \cdot t \cdot I_{\Phi}^2(t) dt}{\int_0^T I_{\Phi}^2(t) dt}.$$

Поскольку принято предположение о постоянстве нагрузки электроподвижного состава, значение $I_{\Phi}^2(t)$ будем считать постоянной величиной и вынесем за знак интеграла, получим

$$r_{\text{екв}} = \frac{I_{\Phi}^2 \int_0^T \frac{r_0 L}{T} t dt}{I_{\Phi}^2 \cdot T} = \frac{1}{2} r_0 L. \quad (4.137)$$

Двусторонняя схема питания (рис. 4.42) характеризуется известной зависимостью [76], где токи фидеров определяются обратно пропорционально расстояниям между электроподвижным составом и тяговыми подстанциями.

Для определения эквивалентного сопротивления двусторонней схемы питания необходимо разделить потери в тяговой сети на каждую из подстанций. Для фиксированной мгновенной схемы такими потерями будут потери между шинами тяговой подстанции и точкой токораспределения.

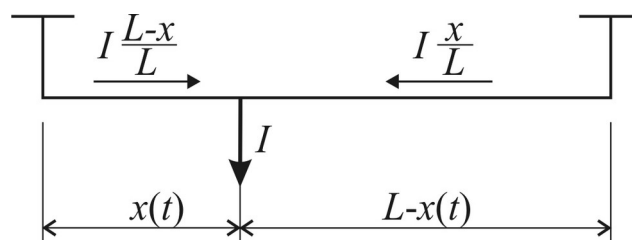


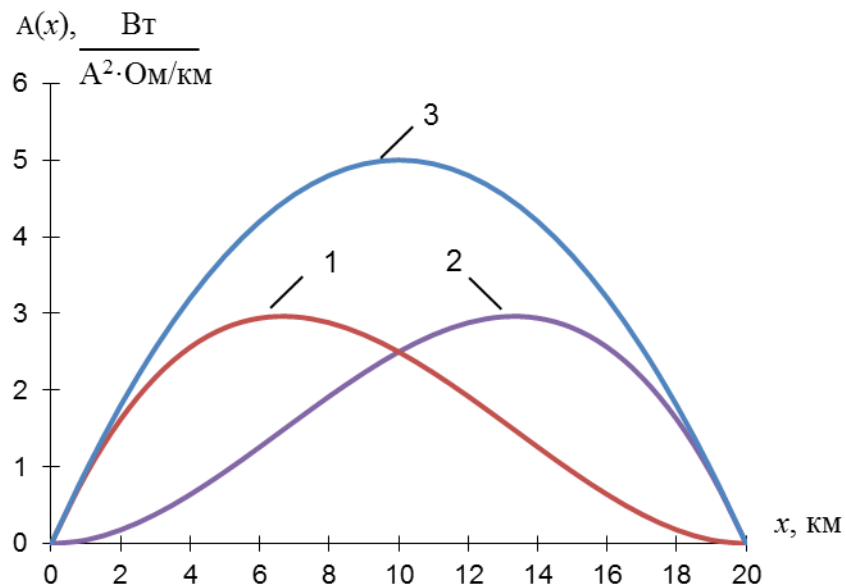
Рисунок 4.42 - Расчетная схема двусторонней схемы питания

Мгновенные потери мощности для двусторонней схемы питания в общем виде определяются суммой произведения квадратов фидеров на соответствующие сопротивления тяговой сети. Для упрощения дальнейших выкладок обозначим координату поезда $x(t)$ переменной x , помня о ее зависимости от времени.

$$\Delta P(t) = r_0 x \left(I \frac{L-x}{L} \right)^2 + r_0 (L-x) \left(I \frac{x}{L} \right)^2 = r_0 \cdot I^2 \left[x \frac{(L-x)^2}{L^2} + (L-x) \frac{x^2}{L^2} \right]. \quad (4.138)$$

$$\text{Обозначим } x \frac{(L-x)^2}{L^2} + (L-x) \frac{x^2}{L^2} = A(x).$$

Форму кривой мгновенных потерь для двусторонней схемы питания определяет выражение в скобках формулы (4.138), причем первое слагаемое - часть мгновенных потерь мощности, которая приходится на первую тяговую подстанцию, второе - на вторую подстанцию при следовании одного поезда. Графические зависимости составляющей мгновенных потерь мощности и квадрата ФТР будем представлять на примере участка длиной 20 км, по которому перемещается поезд со скоростью 60 км/час. На рис. 4.43 показано распределение общих потерь мощностей для двусторонней схемы между смежными тяговыми подстанциями.



1, 2 - потери, которые приходятся на первую и вторую тяговые подстанции, 3
- общие потери в тяговой сети

Рисунок 4.43 - Составляющие мгновенных потерь мощности в тяговой сети для двусторонней схемы питания

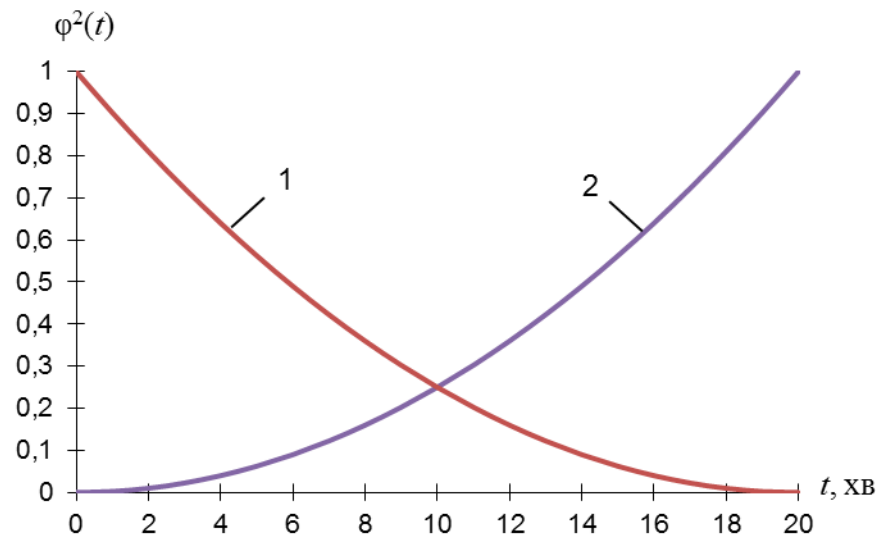
В свою очередь квадраты токов фидеров для двусторонней схемы в общем виде равны $I_{\Phi 1}^2(t) = I^2 \frac{(L-x)^2}{L^2}$, $I_{\Phi 2}^2(t) = I^2 \frac{x^2}{L^2}$. После определения координаты $x(t)$ через среднюю скорость поезда можно записать

$$I_{\Phi 1}^2(t) = I^2 \cdot \frac{\left(L - \frac{L}{T}t\right)^2}{L^2} = I^2 \left(1 - \frac{t}{T}\right)^2, \quad (4.139)$$

$$I_{\Phi 2}^2(t) = I^2 \cdot \frac{t^2 L^2 / T^2}{L^2} = I^2 \left(\frac{t}{T}\right)^2. \quad (4.140)$$

Форму полученных зависимостей при условии постоянства величины нагрузки определяют множители в скобках в формулах (4.139) и (4.140).

Обозначим $\varphi_1^2(t) = \left(1 - \frac{t}{T}\right)^2$, $\varphi_2^2(t) = \left(\frac{t}{T}\right)^2$. Графики данных зависимостей представлены на рис. 4.44.



1, 2 - фидеры первой и второй подстанции

Рисунок 4.44 - Квадраты ФТР

Пользуясь предложенным определением мгновенного сопротивления (4 .132) и принимая во внимание необходимость разделения суммарных потерь мощности на части, величины которых определяются зависимостями на рис. 4 .44, запишем формулы определения мгновенных сопротивлений для каждого фидера двусторонней схемы питания

$$r_{\Phi 1}(t) = \frac{r_0 I^2 \frac{x(L-x)^2}{L^2}}{I^2 \frac{(L-x)^2}{L^2}} = r_0 x(t), \quad (4.141)$$

$$r_{\Phi 2}(t) = \frac{r_0 I^2 \frac{(L-x)x^2}{L^2}}{I^2 \frac{x^2}{L^2}} = r_0 [L - x(t)]. \quad (4.142)$$

Применяя определения эквивалентного сопротивления (4 .137), найдём его значение в общем виде для одного из фидеров двусторонней схемы питания. Заменяя координату расположения нагрузки $x(t)$ произведением средней скорости поезда L/T и переменной времени t , можно записать

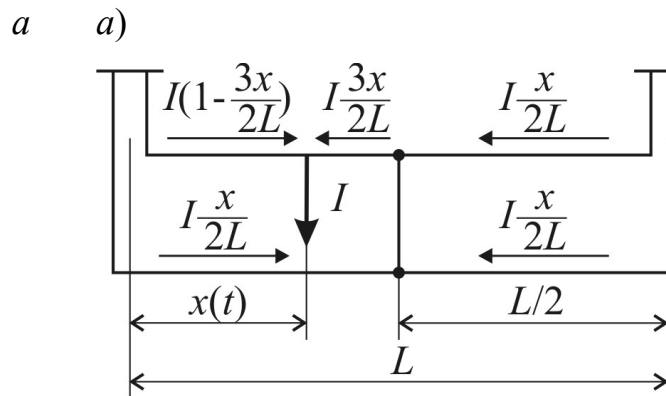
$$r_{\text{екв1}} = \frac{\int_0^T r_{\Phi 1}(t) I_{\Phi 1}^2(t) dt}{\int_0^T I_{\Phi 1}^2(t) dt} = \frac{\int_0^T r_0 \frac{L}{T} t \cdot I^2 \left(1 - \frac{t}{T}\right)^2 dt}{\int_0^T I^2 \left(1 - \frac{t}{T}\right)^2 dt}. \quad (4.143)$$

После преобразований получим

$$r_{\text{екв1}} = \frac{1}{4} r_0 L. \quad (4.144)$$

Наиболее распространенной для нормального режима работы систем тягового электроснабжения является узловая схема питания (рис. 4.45), которая имеет более сложные зависимости распределения токов между фидерами тяговых подстанций. При такой схеме питания необходимо рассматривать варианты расположения нагрузки перед постом секционирования и после него. В общем виде мгновенные потери мощности для узловой схемы питания определяются формулой

$$\Delta P(t) = r_0 I^2 \begin{cases} \left(1 - \frac{3x}{2L}\right)^2 x + \left(\frac{3x}{2L}\right)^2 \left(\frac{L}{2} - x\right) + 3 \left(\frac{x}{2L}\right)^2 \frac{L}{2}, & 0 \leq x \leq \frac{L}{2}; \\ \frac{3}{4} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 \frac{L}{2} + \frac{9}{4} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 \left(x - \frac{L}{2}\right) + \left(\frac{3x}{2L} - \frac{1}{2}\right)^2 (L - x), & \frac{L}{2} \leq x \leq L. \end{cases} \quad (4.145)$$



б)

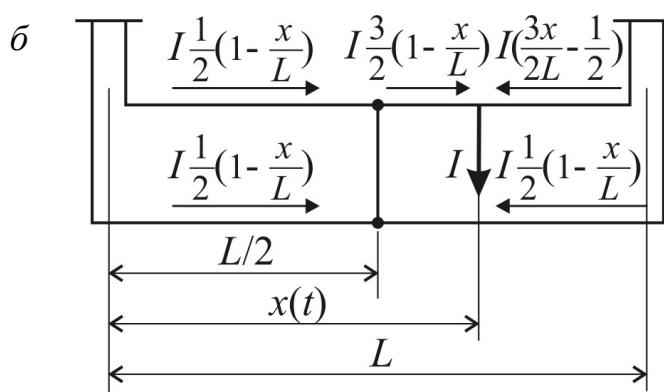
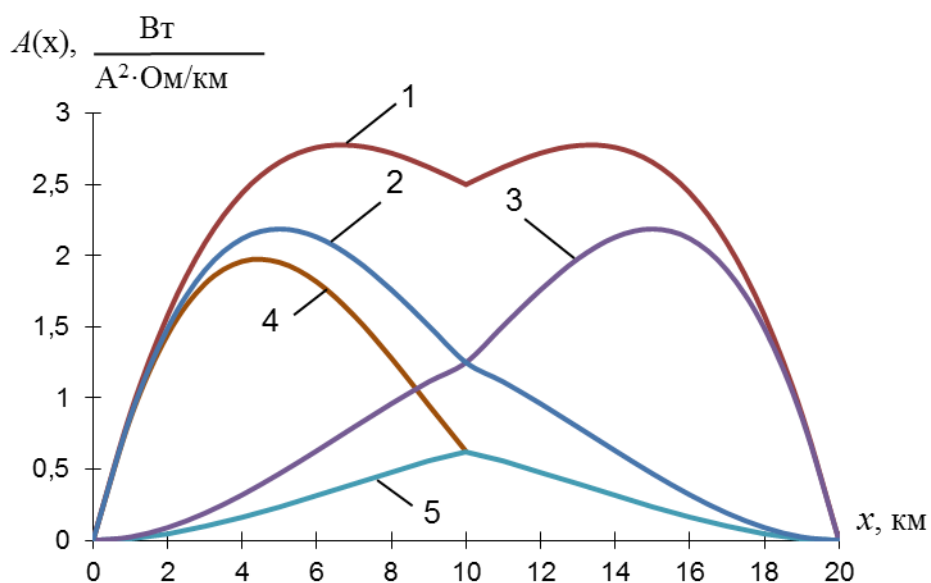


Рисунок 4.45 - Расчетные схемы узловой схемы питания для вариантов расположения нагрузки перед постом секционирования (а) и за ним (б)

Для дальнейших исследований рассмотрим только потери от токов попутного и смежного фидера одной тяговой подстанции, сумма которых определяет потери, приходящиеся на одну тяговую подстанцию (рис. 4.46); распределение составляющих мгновенных потерь мощностей между тяговыми подстанциями при принятых допущениях есть симметричным.



1 - общие, 2, 3 - составляющие потерь от токов первой и второй подстанции, 4 - составляющая потеря от тока попутного фидера, 5 - составляющая потеря от тока смежного фидера

Рисунок 4.46 - Составляющие мгновенных потерь мощности в тяговой сети для узловой схемы питания

Для попутного и смежного фидеров мгновенные потери мощности имеют вид

$$\Delta P_{\text{поп}}(t) = r_0 I^2 \begin{cases} \left(1 - \frac{3x}{2L}\right)^2 x, & 0 \leq x \leq \frac{L}{2}; \\ \frac{1}{4} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 x, & \frac{L}{2} \leq x \leq L; \end{cases} \quad (4.146)$$

$$\Delta P_{\text{сум}}(t) = r_0 I^2 \begin{cases} \left(\frac{x}{2L}\right)^2 x, & 0 \leq x \leq \frac{L}{2}; \\ \frac{1}{4} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 x, & \frac{L}{2} \leq x \leq L. \end{cases} \quad (4.147)$$

В свою очередь, квадраты токов фидеров узловой схемы питания определяются следующими формулами:

$$I_{\Phi.\text{поп}}^2(t) = I^2 \begin{cases} \left(1 - \frac{3x}{2L}\right)^2, & 0 \leq x \leq \frac{L}{2}; \\ \frac{1}{4} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2, & \frac{L}{2} \leq x \leq L; \end{cases} \quad (4.148)$$

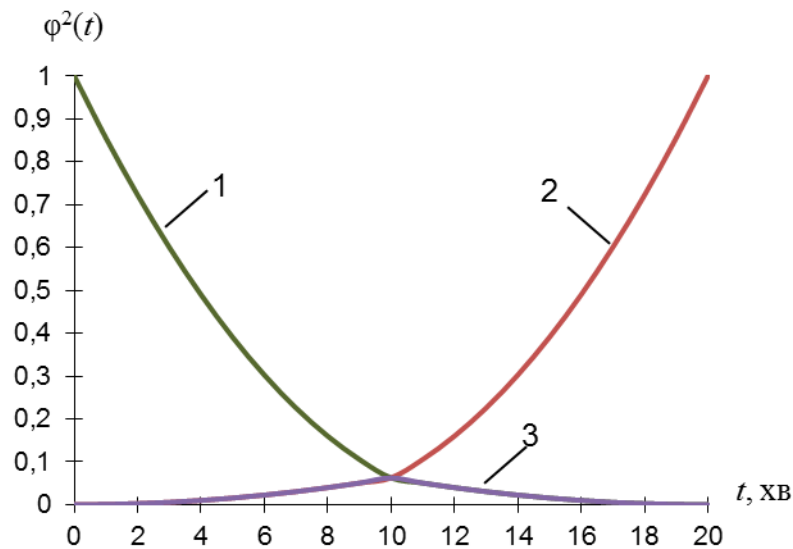
$$I_{\Phi.\text{сум}}^2(t) = I^2 \begin{cases} \left(\frac{x}{2L}\right)^2, & 0 \leq x \leq \frac{L}{2}; \\ \frac{1}{4} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2, & \frac{L}{2} \leq x \leq L. \end{cases} \quad (4.149)$$

С использованием предположения о равномерности движения поезда по участку запишем зависимости квадратов тока от времени

$$I_{\Phi.\text{поп}}^2(t) = I^2 \begin{cases} \left(1 - \frac{3L/T}{2L} t\right)^2, & 0 \leq t \leq \frac{T}{2}; \\ \frac{1}{4} \left(1 - \frac{L/T}{L} t\right)^2, & \frac{T}{2} \leq t \leq T; \end{cases} = I^2 \begin{cases} \left(1 - \frac{3}{2} \frac{t}{T}\right)^2, & 0 \leq t \leq \frac{T}{2}; \\ \frac{1}{4} \left(1 - \frac{t}{T}\right)^2, & \frac{T}{2} \leq t \leq T; \end{cases} \quad (4.150)$$

$$I_{\Phi.\text{сум}}^2(t) = I^2 \begin{cases} \left(\frac{L/T}{2L} t\right)^2, & 0 \leq t \leq \frac{T}{2}; \\ \frac{1}{4} \left(1 - \frac{L/T}{L} t\right)^2, & \frac{T}{2} \leq t \leq T. \end{cases} = I^2 \begin{cases} \left(\frac{t}{2T}\right)^2, & 0 \leq t \leq \frac{T}{2}; \\ \frac{1}{4} \left(1 - \frac{t}{T}\right)^2, & \frac{T}{2} \leq t \leq T. \end{cases} \quad (4.151)$$

Графический вид полученных зависимостей определяется формой квадратов ФТР (рис. 4.47).



1, 2 - попутные фидеры первой и второй подстанций, 3 - смежные фидеры

Рисунок 4.47 - Функции квадратов токораспределения

Пользуясь (4.132), найдем в общем виде выражение мгновенного сопротивления контактной сети относительно попутного и смежного фидеров, рассматривая отдельно варианты расположения нагрузки относительно поста секционирования

$$0 \leq x \leq \frac{L}{2}: r_{\text{поп}}(t) = \frac{\Delta P_{\text{поп}}(t)}{I_{\Phi, \text{поп}}^2(t)} = r_0 \frac{L}{T} t; \quad (4.152)$$

$$r_{\text{сум}}(t) = \frac{\Delta P_{\text{сум}}(t)}{I_{\Phi, \text{сум}}^2(t)} = r_0 \frac{L}{T} t; \quad (4.153)$$

$$\frac{L}{2} \leq x \leq L: r_{\text{поп}}(t) = r_{\text{сум}}(t) = \frac{r_0 I^2 \frac{1}{4} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 x}{I^2 \frac{1}{4} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^2} = r_0 x(t) = r_0 \frac{L}{T} t. \quad (4.154)$$

Определим эквивалентное сопротивление для попутного фидера, учитывая различные варианты расположения нагрузки относительно узла суммой интегралов соответствующих функций

$$r_{\text{екв.поп}} = \frac{\int_0^T (r_{\text{поп}}(t) I_{\Phi.\text{поп}}^2(t)) dt}{\int_0^T I_{\Phi.\text{поп}}^2(t) dt} = \frac{2}{11} r_0 L. \quad (4.155)$$

Аналогично для смежного фидера узловой схемы питания

$$r_{\text{екв.сум}} = \frac{\int_0^T r_{\text{сум}}(t) I_{\Phi.\text{сум}}^2(t) dt}{\int_0^T I_{\Phi.\text{сум}}^2(t) dt} = \frac{1}{2} r_0 L. \quad (4.156)$$

Полученные таким образом мгновенные и эквивалентные характеристики сопротивлений для каждой схемы питания занесем в табл. 4.20 [52].

Таблица 4.20 - Мгновенные и эквивалентные сопротивления (коэффициенты потерь) для различных схем питания

№ п/п	Схема питания	$r(t)$	$r_{\text{экв}}$
1	Консольная	$r_0 L \frac{t}{T}$	$\frac{1}{2} r_0 L$
2	Двусторонняя		$\frac{1}{4} r_0 L$
3	Узловая *		$\frac{2}{11} r_0 L \bigg/ \frac{1}{2} r_0 L$
*Примечание: в числителе приведено значение для попутного фидера, в знаменателе - для смежного			

Выводы к разделу 4

1. На основе статистического анализа параметров потоков поездов по выполненным графикам движения установлено, что межпоездной интервал является случайной величиной, которая хорошо описывается логарифмически - нормальным законом распределения вероятностей.

2. Модель потока поездов на основе потоков восстановления позволяет определять интенсивность потока поездов по известной плотности распределения межпоездных интервалов для решения задач энергосбережения в СТЭ. Данная модель содержит расчётные соотношения,

позволяющие определить характеристики потока поездов, соответствующие пропускной способности электрифицированного участка по условиям электроснабжения. Предложен пространственно-временной параметр, характеризующий характер изменения потока поездов как по длине участка, так и по времени.

3. Нашёл дальнейшее развитие метод расчёта СТЭ на основе потоков восстановления в части дополнения его расчётными выражениями для определения потерь мощности и энергии в элементах тяговых подстанций. Предложена методология определения потерь мощности в оборудовании тяговых подстанций постоянного тока с учётом осуществления регулировочных воздействий.

4. Предложено вычислять коэффициенты потерь как отношение мгновенных значений потерь мощности и квадратов токов фидеров. В результате расчетов установлено, что мгновенные сопротивления для различных схем питания одинаковы. В соответствии с принятыми допущениями получены выражения для определения эквивалентного значения коэффициента потерь для существующих схем питания контактной сети.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГИ ПОЕЗДОВ

Метод определения рациональных режимов систем электроснабжения тяги поездов на основе адаптированного генетического алгоритма

Регулировочные возможности систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока

В начале рассмотрим возможности тяговых подстанций по регулированию напряжения на шинах. Для системы электроснабжения электротранспорта уровень напряжения играет определяющую роль. Требования к уровням напряжения устанавливают нормативные документы [298]. Величина напряжения на токоприёмнике электровоза влияет на скорость движения поездов и на стабильность работы его вспомогательного оборудования. Такие энергетические характеристики системы электроснабжения, как потери в контактной сети, тяговых подстанциях, постах секционирования и пунктах параллельного соединения также зависят от напряжения. Характер изменения напряжения на шинах тяговых подстанций по-разному влияет на потери в элементах системы тягового электроснабжения. Если напряжение снижается, то это вызывает уменьшение потерь на намагничивание в оборудовании подстанций и электровозов, В результате снижаются удельные расходы на тягу. Однако, снижение напряжения вызовет дополнительные потери электроэнергии в контактной сети. Отсюда возникает задача по определению рациональных уровней напряжения на шинах тяговых подстанций.

В настоящее время на подавляющем большинстве тяговых подстанций регулирование напряжения может осуществляться лишь с помощью переключения ответвлений трансформаторов (с помощью устройств

регулирования под нагрузкой РПН). К сожалению, на тяговых подстанциях железных дорог постоянного тока применяют силовое оборудование разных типов. В данных условиях не представляется возможным устанавливать одинаковые уровни напряжения на шинах тяговых подстанций, при этом в тяговой сети протекают уравнивающие токи, приводящие к дополнительным потерям энергии.

Критерием оптимальности могут быть различные величины, например: потери мощности от уравнивающих токов, удельные расходы энергии на тягу поездов, приведенные затраты на перевозку грузов.

Управляющими параметрами системы электроснабжения являются величины напряжения на шинах тяговых подстанций, а точнее положения переключателей ответвлений силовых трансформаторов. Именно они при фиксированной схеме электроснабжения определяют напряжение на токоприёмниках электровазов.

На тяговых подстанциях постоянного тока ПТ и ТТ имеют регулировочные ответвления. Они необходимы для компенсации отклонения напряжения от номинального на стороне высшего напряжения напряжения. РПН имеет такую конструкцию, что регулирование может осуществляться с постоянным шагом на стороне высшего напряжения трансформатора. Однако, переключая ответвления с помощью РПН при условии постоянного по модулю напряжения на стороне высшего напряжения, можно видеть, что шаг изменения напряжения на стороне низшего напряжения будет неравномерным. При этом тенденция будет такова, что со снижением вторичного напряжения шаг будет уменьшаться. На тяговых подстанциях постоянного тока ПТ, и ТТ соединены последовательно. При такой схеме, используя регулировочные возможности и ПТ, и ТТ. Можно регулировать напряжение на шинах тяговых подстанций самым разнообразным шагом.

Комбинируя регулировочные возможности ПТ и ТТ, можно получить множество регулировочных ЭДС холостого хода:

$$E(i) = u_0 \cdot k_1(m) \cdot k_2(p), \quad (5.157)$$

где u_0 - напряжение холостого хода подстанции до осуществления регулирования;

$k_1(m), k_2(p)$ - коэффициенты регулирования, которые отражают текущее положение отпаяк ПТ и ТТ соответственно. При этом ПТ находится на ответвлении m , а ТТ на ответвлении p .

Коэффициент регулирования напряжения для ПТ может быть определён из следующего выражения:

$$k_1(m) = \frac{\frac{U_{\text{ВН max}}}{\Delta U_{\text{ВН}}} - m + 1}{\frac{U_{\text{ВН max}}}{\Delta U_{\text{ВН}}} - m_0 + 1}, \quad (5.158)$$

где $U_{\text{ВН max}}, \Delta U_{\text{ВН}}$ - максимальное возможное значение напряжения на стороне обмотки высокого напряжения и шаг регулирования соответственно;

m_0 - положение переключателя ответвлений РПН, которое соответствует напряжению холостого хода u_0 ;

m - текущее положение переключателя ответвлений.

Аналогичным образом определяется и коэффициент $k_2(p)$.

Из анализа выражения (5.158) можно сделать вывод, что множество возможных ЭДС может содержать пары одинаковых значений. Однако опыт эксплуатации тяговых подстанций показывает, что одинаковые пары встречаются редко. Поэтому принимаем, что количество уровней ЭДС, которое можно получить комбинациями положений переключателей ответвлений ПТ и ТТ, равно произведению количеств ступеней регулирования ПТ и ТТ.

Все теоретически возможные положения переключателей ПТ и ТТ на практике использовать невозможно. Так как от тяговых подстанций питаются нетяговые потребители, это накладывает ограничение на регулирование напряжения на шинах тяговых подстанций. Необходимо обеспечить

нормированные уровни напряжения для нетяговых потребителей. Кроме того, в контактной сети необходимо также обеспечить уровни напряжения в соответствии с нормативными документами.

Итак, на основании выражений (5 .157) и (5 .158), учитывая ограничения, приведенные выше, для определения рациональных уровней напряжений можно сформировать множество ЭДС для каждой тяговой подстанции .

В случае применения вольтодобавочных устройств [196,197] напряжение можно регулировать плавно в пределах 20 % от номинального.

Возможно несколько подходов к обеспечению минимума потерь электроэнергии от уравнительных токов. Так, в работах [154, 194] критерием является минимум суммарных отклонений средних напряжений подстанций друг от друга. При таком подходе не учитываются потери в оборудовании тяговой подстанции и в системе внешнего электроснабжения. Аналогичным образом выполняется плавное регулирование напряжения на шинах постоянного тока в работах [202, 299, 300]. Потери электроэнергии в системе электроснабжения при этом не будут минимальными.

Рассмотрим схему замещения системы электроснабжения постоянного тока (рис. 5 .48).

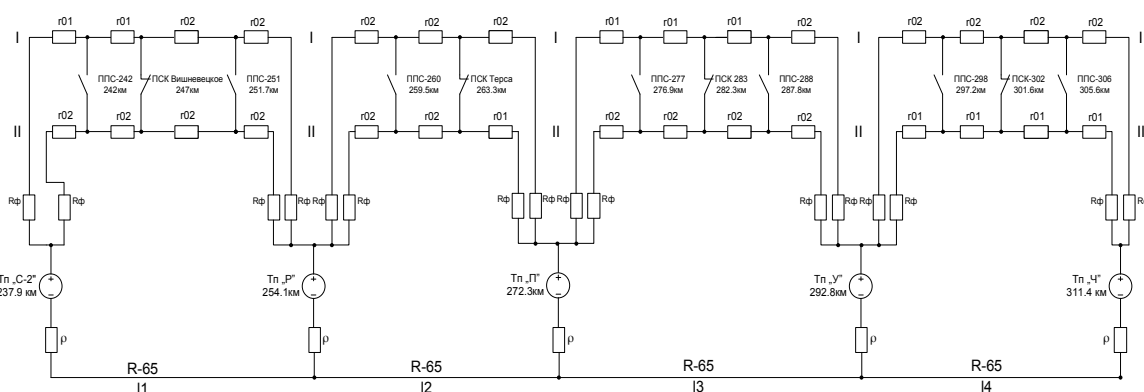


Рисунок 5.48 - Схема замещения системы электроснабжения постоянного тока (на примере Приднепровской ж.д.)

Если бы в схеме замещения источники ЭДС отсутствовали, токораспределение определялось бы лишь источниками токов,

представляющих нагрузки электровозов. Согласно методу наложения, токораспределение в системе можно представить в виде двух слагаемых

$$I = I^* + I_E, \quad (5.159)$$

где I^* - токораспределение, вызванное источниками токов;

I_E - токораспределение, вызванное неравенством ЭДС подстанций.

Потери электроэнергии в элементах системы электроснабжения будут минимальны, если токораспределение будет равно I^* . При любом другом токораспределении будут наблюдаться большие потери электроэнергии. Для этого необходимо обеспечить условие равенства всех ЭДС подстанций.

Средние напряжения на шинах тяговых подстанций даже в случае идеальной оптимизации, когда все ЭДС будут равны между собой, всегда отличаются друг от друга. Это происходит по следующим причинам:

- из-за неравенства эквивалентных внутренних сопротивлений подстанций;
- из-за неравномерности токопотребления электровозов в пределах межподстанционной зоны.

В системах электроснабжения электротранспорта, которые не оборудованы устройствами для плавного регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций или не имеют преобразовательных трансформаторов с плавным регулированием напряжения, выполнить условие минимума потерь энергии от уравнительных токов - равенство ЭДС всех подстанций - практически невозможно. Это можно объяснить изменением напряжений холостого хода подстанций во времени; дискретностью регулирования напряжения.

В таком случае потери мощности от уравнительных токов на межподстанционной зоне могут быть определены на основе следующего соотношения [301]:

$$\Delta P = \frac{(E_1 - E_2)^2}{R_3} + \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2 \cdot r \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2}{R_3}, \quad (5.160)$$

E_1, E_2 - математические ожидания ЭДС смежных подстанций;

σ_1, σ_2 - среднеквадратические отклонения ЭДС подстанций;

r - коэффициент корреляции между рассматриваемыми ЭДС;

R_3 - сопротивление в цепи уравнительного тока.

Как видно из (5 .160), потери мощности от уравнительных токов пропорциональны разности ЭДС подстанций, а также их дисперсиям. Проанализировав данное выражение, можно заключить, что условие минимума потерь электроэнергии в элементах системы электроснабжения можно достичь уменьшением разности математических ожиданий ЭДС, а также их среднеквадратических отклонений. Переключатели ответвлений силовых трансформаторов не могут часто переключать свои положения, чтобы уменьшить дисперсию напряжений холостого хода.

Как видим, снизить потери мощности от уравнительных токов при способе регулирования переключением положений устройств РПН реально можно только за счёт уменьшения разности математических ожиданий напряжений на шинах смежных подстанций.

Исследование уровней напряжений на шинах тяговых подстанций показывает, что математические ожидания напряжений на шинах тяговых подстанций довольно устойчивы, т.е. сохраняются неизменными длительное время [209, 210]. Их изменение наблюдается лишь при существенных изменениях в режимах работы внешней системы электроснабжения. Изменение режима работы системы внешнего электроснабжения на современном этапе легко идентифицируется по данным АСКУЭ по изменению сложившегося соотношения между расходами электроэнергии на тяговых подстанциях. В таком случае можно выполнить очередную оптимизацию системы электроснабжения с помощью математической модели и установить переключатели ответвлений в новые положения,

которые соответствуют новым оптимальным математическим ожиданиям ЭДС подстанций.

При регулировании напряжения на шинах тяговых подстанций изменяются величины блуждающих токов, перераспределяются потенциалы рельсов. Все это напрямую влияет на эксплуатационную надёжность железобетонных опор контактной сети, которая зависит от многих факторов [15, 205].

При эксплуатации опор контактной сети электрокоррозия арматуры наблюдается в анодных и знакопеременных зонах на железных дорогах, которые используют постоянный ток для тяги поездов. Механизм электрокоррозии достаточно широко освещён в [30, 302, 303]. Факторы, вызывающие развитие электрокоррозии можно разделить на две группы:

- 1) факторы, влияющие на надёжность электрического контакта арматуры с заземлением на рельс деталей крепления контактной сети;
- 2) факторы, влияющие на сохранение опорами своих свойств при действия блуждающего тока.

Несущая способность опоры определяется пространством состояний с большим числом фазовых координат. Основных причин большой размерности пространства состояний три:

1. Опора имеет конечные геометрические размеры и, как следствие, непостоянную по длине прочность (под длиной в общем случае понимается три измерения).
2. Механические нагрузки по длине опоры не одинаковые.
3. Степень и скорость коррозии арматуры под действием токов и бетона по длине разные.

Рассмотрим последовательно все три составляющие. Несущий момент опоры по длине неодинаковый. При принятой конусности опор величина несущего момента на уровне пяты консоли составляет 50 % от момента на уровне условного обреза фундамента. Для опоры с предварительно напряженной арматурой появляются дополнительные факторы. Во-первых,

не все стержни арматуры в зависимости от конструкции опоры доходят до торцевых частей. Во-вторых, из-за конической формы число стержней арматуры, которое приходится на единицу объема железобетона, в верхней части опоры выше, чем в нижней. Это приводит к тому, что бетон в верхней части опоры более напряжённый, чем в нижней.

Неравномерность нагрузки по длине опоры состоит из трех составляющих:

1. Неравномерный по длине опоры механический момент. При этом максимальный сгибающий момент будет находиться на глубине около 0,5 м. Практическая глубина, на которой наблюдается максимальный момент, зависит от степени промерзания грунта.

2. Неравномерная загрузка кольцевого сечения опоры при сгибающих моментах в сторону пути. По окружности сечения опоры можно выделить две зоны: с растянутой арматурой и сжатой. Понятно, что основную часть рабочей нагрузки несут пряди арматуры, расположенные с полевой стороны.

3. В поперечном срезе опоры разные по глубине залегания слои материала несут неодинаковую нагрузку.

По опыту эксплуатации известно, что наиболее часто коррозионные повреждения встречаются на глубине 0,2...0,6 м. Причин здесь несколько. Однако основополагающим фактором выступает неравномерная проводимость и увлажненность грунта, которые имеют закономерные изменения с приростом глубины. В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что потенциал грунта уменьшается по экспоненте от заземленного электрода. При незаземленной опоре потенциал грунта со стороны пути будет выше, а со стороны поля ниже, чем потенциал арматуры. Таким образом, условия для возникновения коррозии будут наиболее благоприятными со стороны поля. Степень влияния блуждающих токов будет определяться свойствами грунта..

Случайные факторы также вносят свой вклад в неравномерность прочности и коррозии по длине опоры. По данным конкретного

исследования толщина защитного пласта бетона у опор одинакового типа при норме 20 мм может быть описана распределением Гаусса с параметрами центра 21, 7 мм и рассеянием 5,49 мм. Свойства грунта, как в горизонтальной плоскости, так и по глубине залегания, могут иметь значительный разброс [30].

Результаты исследований прокорродировавших опор показывают, что крайне редко наблюдается равномерная по длине подземной части опоры коррозия. Значительно чаще степень коррозии существенным образом неравномерная. Как было сказано выше, нагрузка по длине опоры также заметно неравномерная.

Ток утечки из рельсов в землю определяется значениями потенциала рельсов и переходного сопротивления «рельс - земля». Исходя из этого могут быть установлены меры для уменьшения блуждающих токов. Потенциал рельсов зависит от падения напряжения в рельсах, которое равняется произведению тока на сопротивление, соответственно, потенциал рельсов может быть уменьшен, если будут уменьшены значения тока и сопротивления. Уменьшить ток можно, повысив напряжение в сети. Увеличить напряжение можно при его регулировании. С целью проверки эффективности электродренажной защиты газопроводов на участке между тяговыми подстанциями НД–Узел и Днепропетровск – Грузовой с участием ведущих специалистов кафедры электроснабжения ДИИТа были проведены опыты [304], результаты которых представлены в табл. 5 .21.

Из данных, приведенных в табл. 5 .21, можно сделать вывод, что при регулировании напряжения нужно учитывать не только уравнительные токи в контактной сети, но и потенциалы рельсов в месте подключения электрического дренажа. Аналитической зависимости, которая бы связывала уровни напряжения на шинах ТП и потенциалы рельсов не существует. Выполним обоснование графоаналитическим методом [35]. При разных значениях напряжений сопредельных подстанций нагрузки между ними перераспределяются. Это перераспределение можно учитывать введением в

расчетные схемы уравнильного тока, который вызван различием напряжений на шинах тяговых подстанций (рис. 5.49).

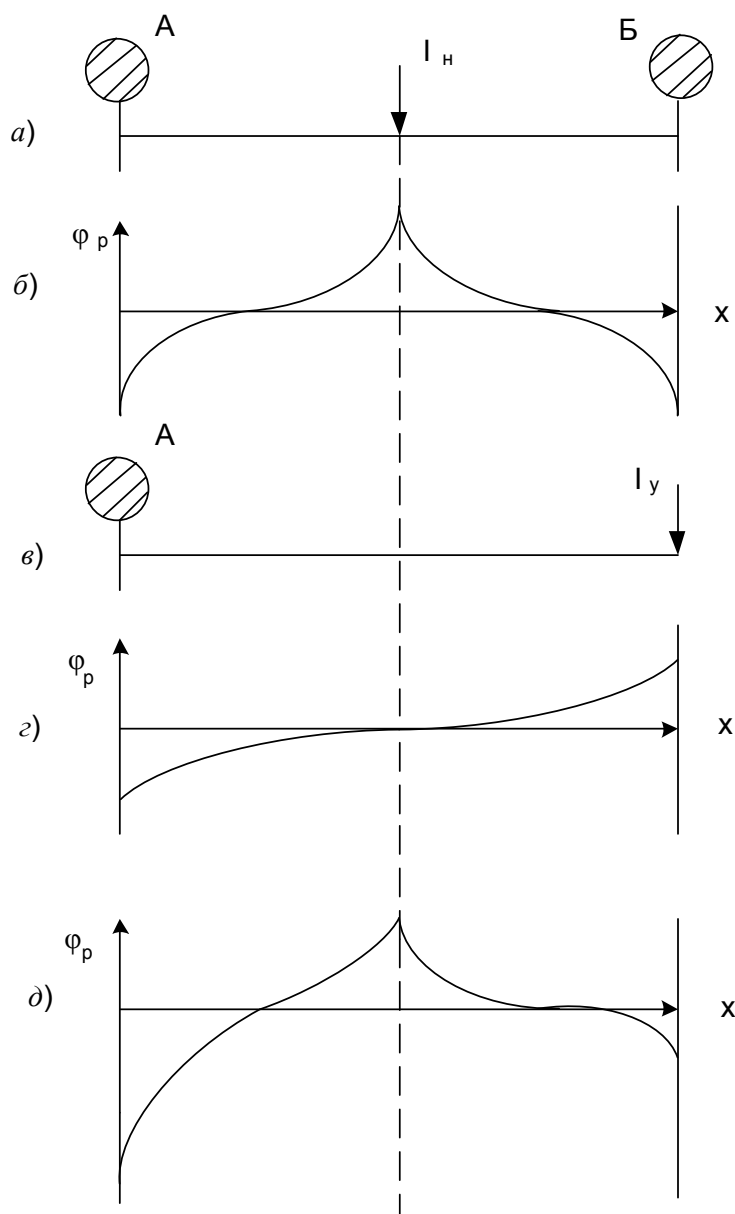
Таблица 5.21 - Результаты измерений

Тяговая подстанция	Н	Г	Д	С
Напряжение «+» шины, кВ	3,43	3,25	3,35	3,27
	3,46	3,425	3,36	3,35
Общеподстанционный ток, кА	1,84	1,1	0,456	0,341
	1,35	1,8	0,317	0,197
Потенциал «рельс - земля», В	-4,96	5,84	-3,23	7,66
	-3,18	-9,0	-1,88	7,95
Ток электрического дренажа, А	266	16	65,9	0
	174	512	35,8	0

По отношению к потенциалам рельсов схема с уравнильным током эквивалентна в расчетном отношении такому случаю, когда межподстанционную зону питает одна подстанция (подстанция с более высоким напряжением), а другая подстанция (подстанция с меньшим напряжением) выступает в роле нагрузки. При наложении диаграммы распределения потенциалов от уравнильного тока на диаграмму распределения потенциалов от всех нагрузок при равных напряжениях подстанций получаем результирующую диаграмму распределения потенциалов. При этом значение отрицательного потенциала на подстанции с большим напряжением увеличивается, а на подстанции с меньшим напряжением – уменьшается (рис. 5.49), а в некоторых случаях может даже менять знак.

Сравним потенциальные картины для случаев с одинаковыми напряжениями на шинах тяговых подстанций и при наличии уравнильного тока. Рассмотрим межподстанционную зону (рис. 5.51). В качестве примера зададим типовые для электротяги постоянного тока исходные данные

(табл. 5.22). Для данного участка построим соответствующие распределения.



а) принципиальная схема; б) кривая потенциала, вызванная нагрузкам I_H ; в) схема протекания уравнительного тока; г) кривая потенциала, вызванная уравнительным током I_y ; д) кривая суммарного потенциала

Рисунок 5.49 - Кривые распределения потенциалов в рельсах при однородной нагрузке между двумя подстанциями А и Б и разных напряжениях на шинах подстанций А и Б ($U_A > U_B$)

При движении поезда по межподстанционной зоне потенциал рельс-земля постоянно изменяется. Его величина в общем виде зависит от

расстояния точки, в которой мы определяем потенциал, до поезда, потребляющего в данный момент ток I (рис. 5.50).

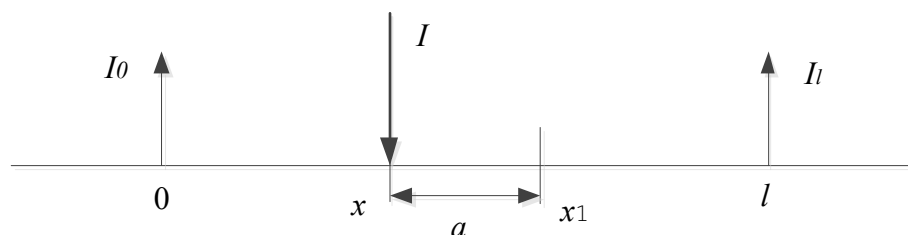


Рисунок 5.50 - Схема замещения МЗ, по которой движется поезд

При этом потенциал рельс земля в точке x_1 может быть определён по следующему соотношению [305]:

$$U_{x_1} = -I_0 \cdot R_{PB} \cdot e^{-kx_1} - I_l \cdot R_{PB} \cdot e^{-k(l-x_1)} + I \cdot R_{PB} \cdot e^{-ka}, \quad (5.161)$$

где $I_0 = I \frac{l-x}{l}$, $I_l = I \frac{x}{l}$, I - токи тяговых подстанций в точках с координатами $x=0$, $x=l$ и поезда соответственно;

R_{PB} - волновое сопротивление однородной рельсовой сети, Ом;

k - коэффициент распределения однородной рельсовой сети, 1/км;

$$k = \sqrt{\frac{r_p}{r_n}}, \quad (5.162)$$

где r_p - удельное продольное сопротивление однородной рельсовой сети, Ом;

r_n - удельное переходное сопротивление от рельсов до земли, Ом.

$$R_{PB} = \sqrt{r_p \cdot r_n}. \quad (5.163)$$

Потенциал рельс - земля от сосредоточенной нагрузки может быть определён по формуле [204]

$$U_{PX} = -\frac{1}{2} \cdot I_0 \cdot R_{PB} \cdot e^{-kx}, \quad (5.164)$$

где I_0 - среднесуточный ток тяговой подстанции, А.

Для оценки коррозионного состояния опор и подземных сооружений мгновенное значение потенциала не используют. Вместо него определяют среднее значение. В этом случае можно воспользоваться методом равномерно распределённой нагрузки.

Таблица 5.22 - Характеристики исследовательского электрифицированного участка

Режим	Расстояние между подстанциями, км	Удельное продольное сопротивление однородной рельсовой сети, Ом	Удельное переходное сопротивление от рельсов до земли, Ом	Ток ТП1, А	Ток ТП2, А
Одинаковые напряжения на шинах подстанций	20	$15,5 \times 10^{-3}$	0,4	2000	2000
Наличие уравнивающих токов	20	$15,5 \times 10^{-3}$	0,4	3000	1000

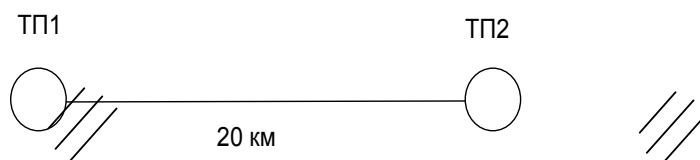


Рисунок 5.51- Схема межподстанционной зоны

Потенциал рельс – земля от равномерно распределённой нагрузки определяется по формуле [304]

$$U_{PX} = i \cdot r_n \cdot (1 - e^{-k \frac{1}{2} \cdot chk \cdot (\frac{1}{2} - x)}) , \quad (5.165)$$

где i - равномерно распределенная нагрузка, А/км.

$$i = \frac{I_0}{l} , \quad (5.166)$$

где l – длина участки с равномерной нагрузкой. Расчетная схема представлена на рис. 5.52.

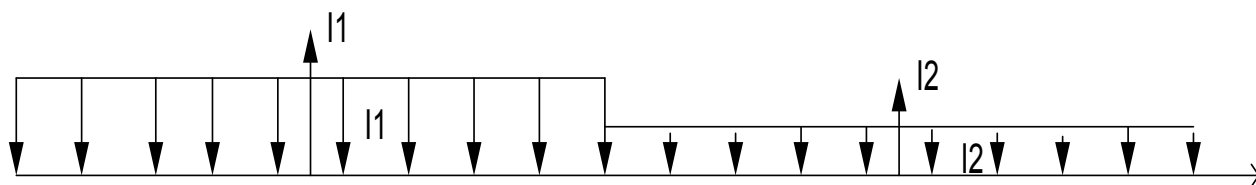


Рисунок 5.52 - Расчетная схема

Составим математическую модель, которая в общем случае описывала бы потенциал рельс – земля отдельно от равномерных и сосредоточенных нагрузок, а также результирующее распределение. Расчеты и построение проводились в среде Mathcad. Результаты приведены на рис. 5.53-рис. 5.54.

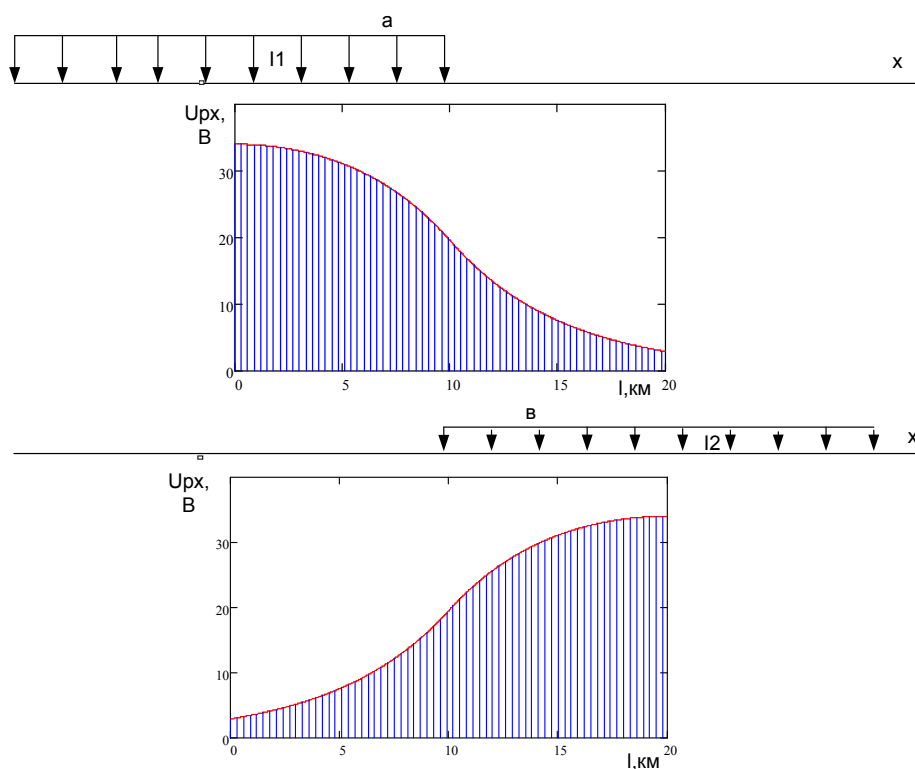


Рисунок 5.53- Распределение потенциалов от равномерной нагрузки на межподстанционной зоне

Принцип построения и аналитические выражения для случая с уравнительным током остаются такими же, как и для описанного выше случая. Различие в том, что добавляется составляющая от действия уравнительного тока. Соответствующее распределение приведено на рис. 5.56.

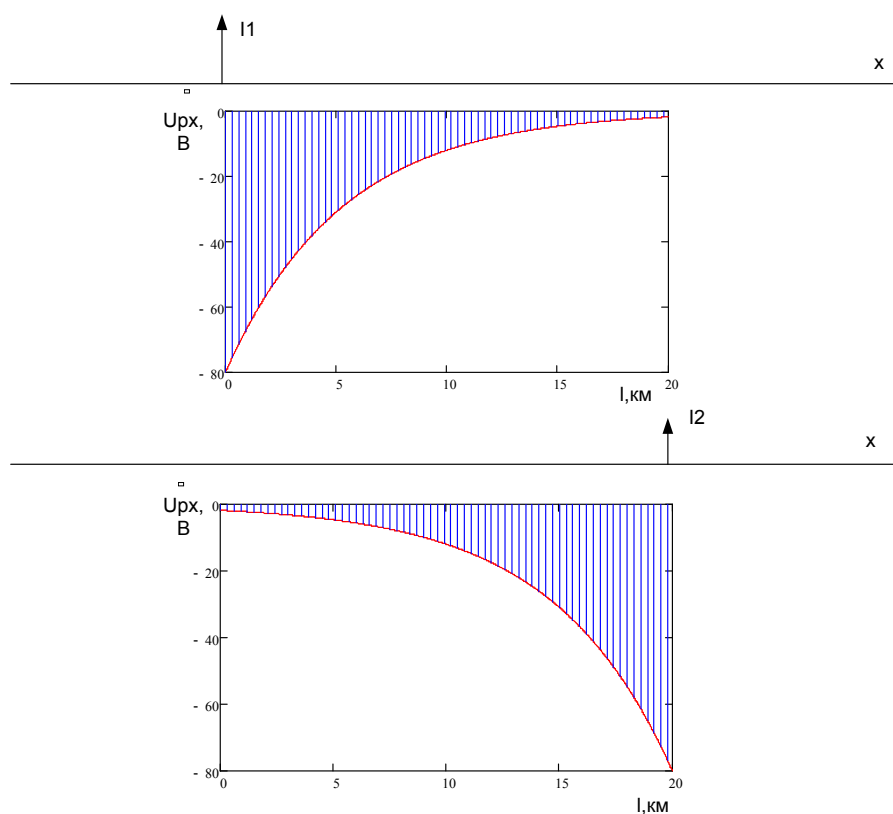


Рисунок 5.54 - Распределение потенциалов от сосредоточенной нагрузки на межподстанционной зоне

Методом суперпозиции получим результирующее распределение (рис. 5.55)

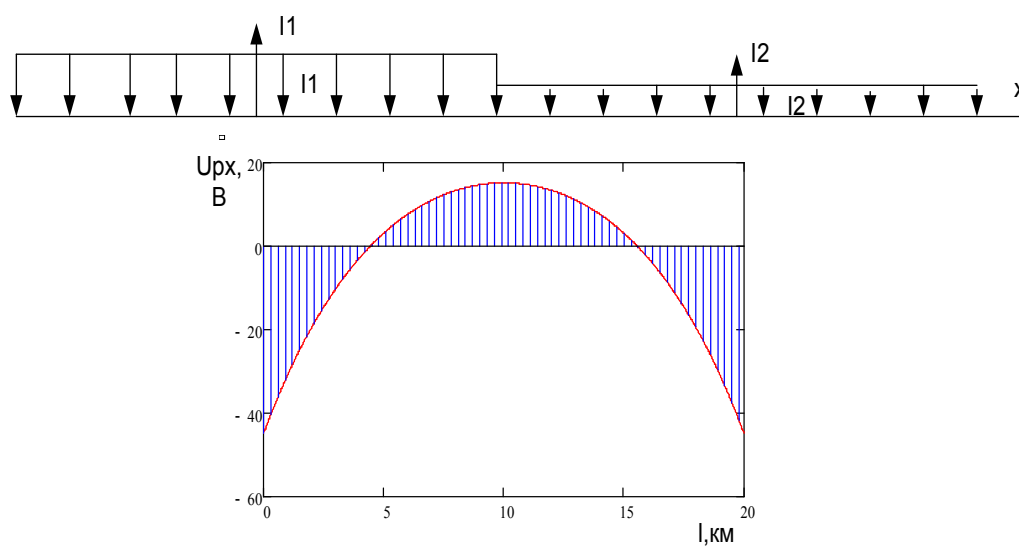


Рисунок 5.55- Результирующее распределение потенциалов при одинаковых напряжениях на шинах подстанций

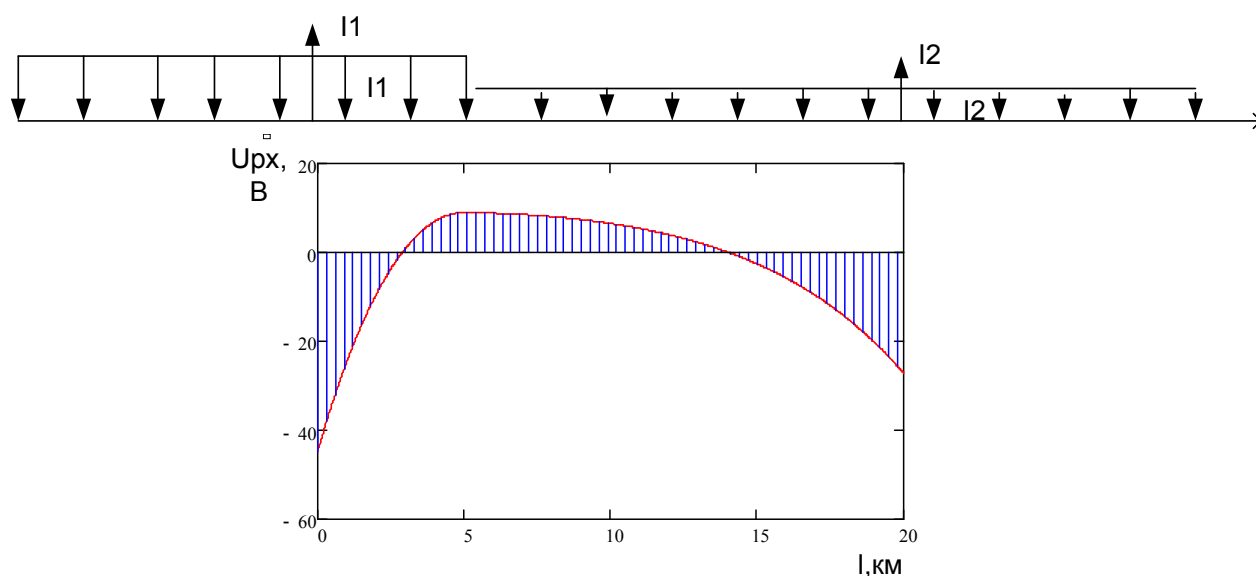


Рисунок 5.56 - Результирующее распределение потенциалов при наличии уравнивающего тока

Таким образом, регулирование уровней напряжения на шинах тяговых подстанций имеет такую особенность, что необходимо учитывать коррозионное состояние железобетонных опор контактной сети [35, 285].

Полученные картины распределения потенциалов могут быть полезными при разработке противокоррозионных мер защиты опор контактной сети постоянного тока.

В процессе эксплуатации железобетонных опор контактной сети электротранспорта постоянного тока, которые разрушаются в основном из-за протекания блуждающих токов, возникает задача быстрого определения их технического состояния, чтобы не допустить возникновения отказа. Поэтому, на наш взгляд в данном контексте задачи управления режимами системы тягового электроснабжения связаны с задачами обеспечения необходимого уровня надёжности и, в конечном итоге, с задачами ресурсосбережения.

Быстро установить техническое состояние опор контактной сети можно, например, с помощью усовершенствованного виброакустического метода [16, 207].

Далее рассмотрим регулировочные возможности тяговых подстанций по переключению силовых и преобразовательных трансформаторов на

параллельную работу. С точки зрения управления режимами тяговая подстанция постоянного тока представляет для оперативного персонала немного способов по регулированию режимов. Для тяговых подстанций с двойной трансформацией можно переключать на параллельную работу силовые и преобразовательные трансформаторы. Причём переключение на параллельную работу силовых трансформаторов осуществляется по командам энергодиспетчера, а переключение преобразовательных трансформаторов осуществляется автоматически с помощью автоматики регулирования мощности.

В этом контексте состояние системы «тяговая подстанция» в каждый момент времени будет характеризовать количество одновременно работающих силовых трансформаторов и количество одновременно работающих преобразователей. Обозначим через $X = [x_1 \ x_2]$ вектор состояния тяговой подстанции [69]. Вектор x_1 характеризует количество одновременно работающих силовых трансформаторов. И соответственно вектор x_2 характеризует количество одновременно работающих преобразователей.

В соответствии с физикой процесса данные два вектора могут принимать только целые значения из диапазона (1,2) (на тяговой подстанции может одновременно работать только 1 или 2 силовых трансформатора и только 1 или 2 преобразователя). Для того чтобы решить вопрос о необходимом количестве шагов для задачи рационального распределения мощности тяговой подстанции, необходимо выполнить некоторые рассуждения. На сегодняшний день самой прогрессивной формой расчётов за электроэнергию для магистральных железных дорог является расчёт за потреблённую электроэнергию по оптовым ценам. При данном виде расчёта необходимо один раз в час выдавать информацию о потреблённой электроэнергии на сервер оптового рынка.

Исходя из этих соображений оптимальным будет интервал в 1 час. При использовании тарифов, дифференцированных по зонам суток, дробление на

интервалы по оси времени можно выполнить по длине тарифных зон. При дроблении по оси времени через 1 час получим 24 интервала за сутки. Весь процесс управления распределением мощности тяговых подстанций представим в графическом виде (см. рис. 5.57). В результате управления в соответствии с нашим критерием эффективности (2.39), (2.40) можно получить рациональную траекторию управления распределением мощности тяговой подстанции (рис. 5.58).

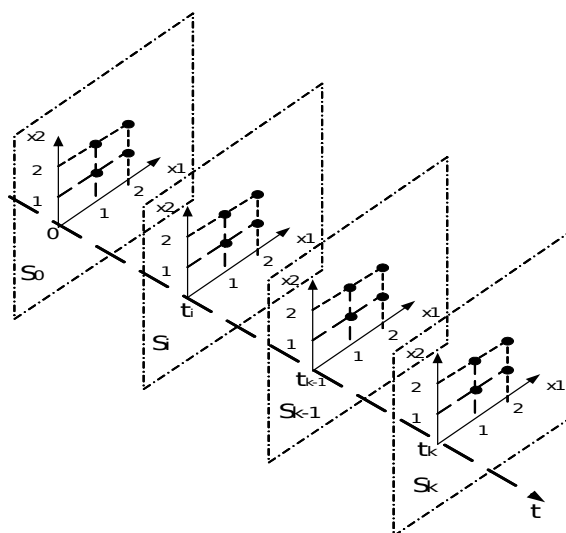


Рисунок 5.57 - Представление процесса управления распределением мощности тяговой подстанции в виде многошагового процесса

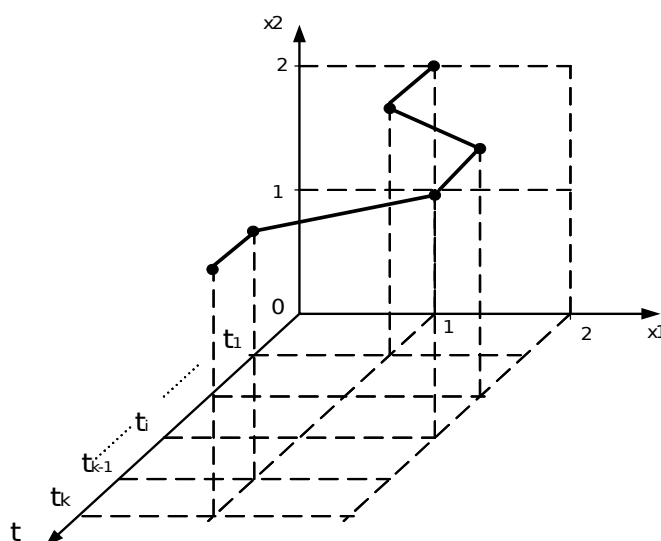


Рисунок 5.58 - Рациональная траектория управления распределением мощности тяговой подстанции

Кроме того, можно изменять схему питания контактной сети участка. При этом в эксплуатации используют узловую, параллельную, двухстороннюю и консольную схемы питания.

Генетический алгоритм для решения задачи определения рациональных режимов системы электроснабжения тяги поездов постоянного тока

Для нахождения рациональных режимов функционирования систем тягового электроснабжения постоянного тока был разработан программный комплекс, структурная схема которого приведена на рис. 5.59.

Принимается допущение, что поток поездов на железнодорожном транспорте является стационарным ординарным потоком однородных событий с ограниченным последствием [158, 159]. Стационарность потока заключается в том, что вероятность попадания того или иного числа событий на участок времени длиной t зависит только от длины участка и не зависит от того, где именно на оси времени расположен этот участок. Ординарность потока заключается в том, что вероятность попадания на элементарный участок Δt двух или более событий пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью попадания одного события.



Рисунок 5.59- Составляющие программного комплекса

График исполненного движения разбивается на межподстанционные зоны и рассматривается с разбивкой по времени (рис. 5.60.).

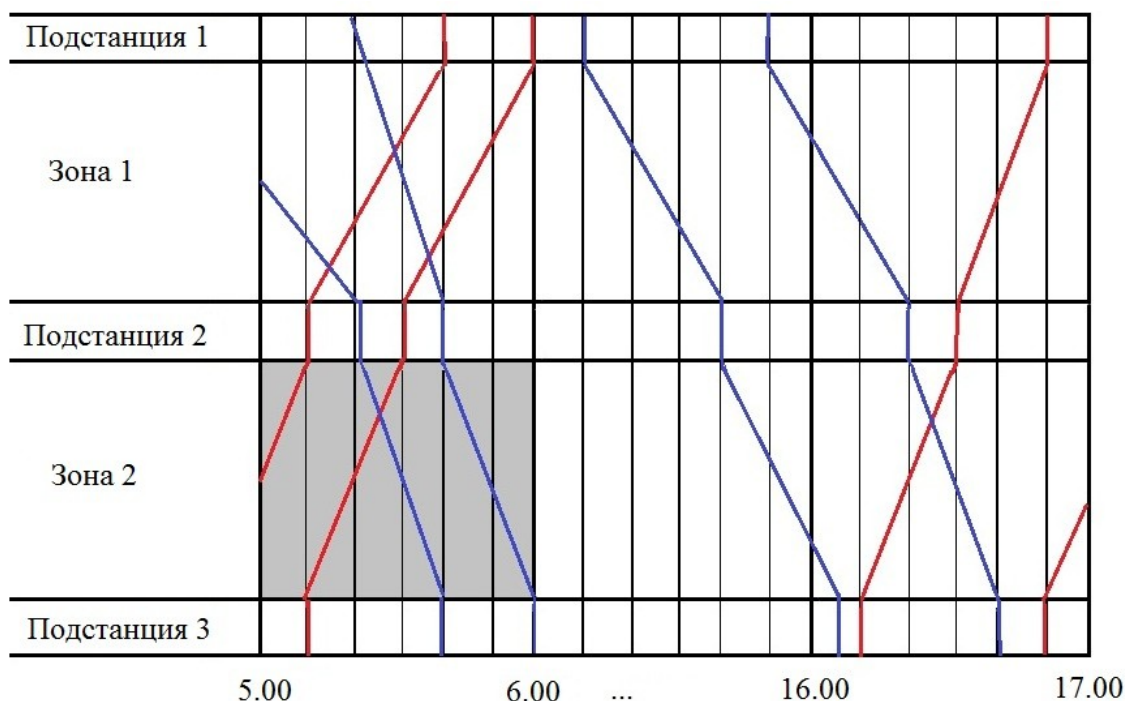


Рисунок 5.60 - Пример определения интенсивности потока поездов

Для каждой j -й зоны фиксируется время входа t_1 i -го поезда в зону и время его выхода из зоны t_2 в промежуток времени k . Тогда для j -й зоны в k -тый промежуток времени интенсивность потока поездов λ_{jk} будет иметь вид:

$$\lambda_{jk} = \sum_i (t_{2i} - t_{1i}) / 60.$$

(5.167)

В примере (рис. 5.60) для зоны 2 с 5.00 до 6.00 количество поездов в час для четного направления $\lambda = 0,5$, для нечетного – $\lambda = 0,65$.

Вид функции условной интенсивности потока поездов приведен на рис. 5.61.

Для решения задачи нахождения рациональных режимов функционирования систем тягового электроснабжения постоянного тока был выбран метод с использованием генетического алгоритма [51, 306].

Для начала перед выполнением расчетов необходимо смоделировать участок тяговой сети (вести информацию о количестве подстанций на участке, их начальные и конечные пикеты, типы оборудования на

подстанциях, число путей и узлов на зонах и схемы подключения путей к узлам) и сформировать научно-справочную информацию о поездах, электровозах, понижающих и тяговых трансформаторах, выпрямительных агрегатах, сглаживающих фильтрах.

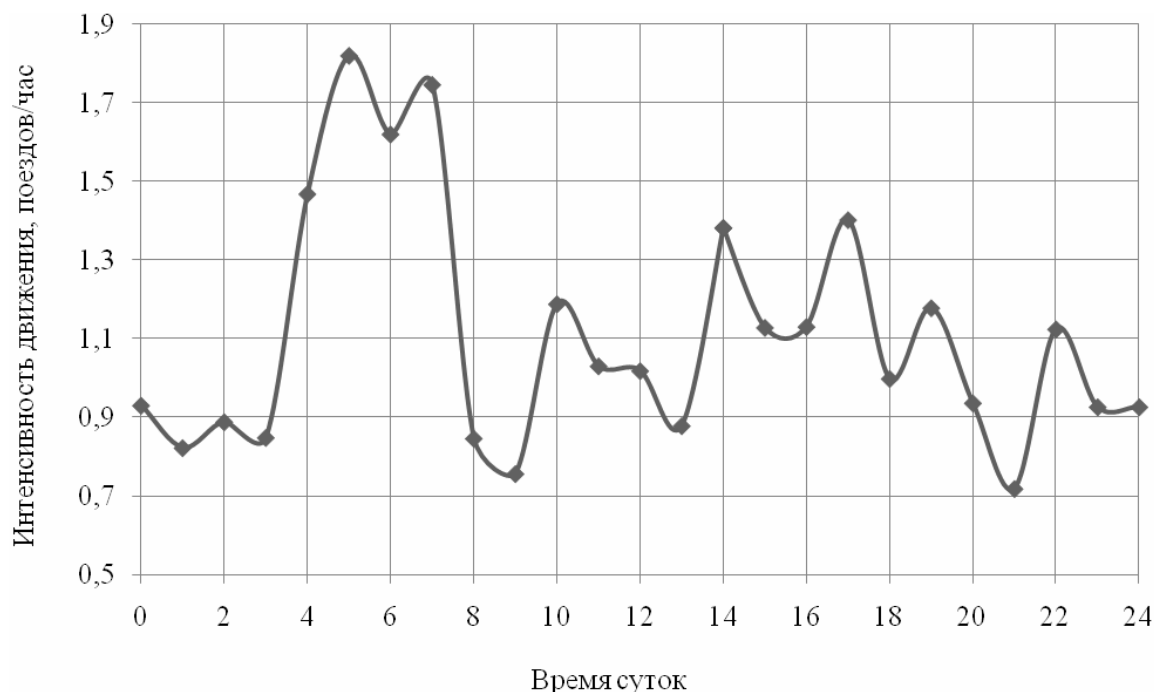


Рисунок 5.61 - Функция условной интенсивности потока поездов

Для выбранного участка определяется количество подстанций, межподстанционных зон, а также количество узлов на каждой межподстанционной зоне и возможные уровни напряжений на оборудовании подстанций. На основе полученных данных рассчитывается длина хромосом особей, с которыми работает генетический алгоритм. В хромосоме для каждой подстанции и межподстанционной зоны отводится определенное количество ген (рис. 5.62) [54].

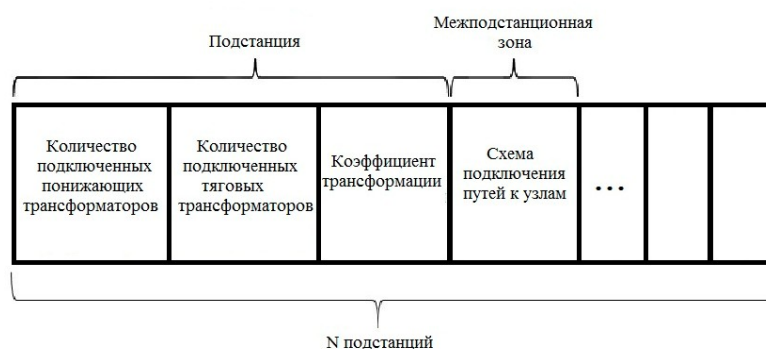


Рисунок 5.62 - Представление хромосомы

Определившись с длиной хромосом, выполняется формирование начальной популяции. Хромосомы каждой особи заполняются случайным образом. Порядок отбора, оценки и формирования хромосом для последующих поколений популяции такой.

Из существующей популяции две наиболее приспособленные особи переносятся в новую популяцию без изменений, чтобы не допустить потерю лучших решений вследствие кроссинговера или мутации. Из остальных особей отбираются родительские пары для формирования следующего поколения. К отбору допускаются особи, которые не принимали участия в процессе формирования нового поколения. Из таких особей отбираются по две особи с наилучшей приспособленностью и формируются родительские пары. Особи оцениваются мерой приспособленности (2.41).

С заданной вероятностью происходит кроссинговер - обмен генами между родительскими парами. Для разработанного генетического алгоритма был выбран многоточечный кроссинговер (рис. 5.63). Для многоточечного кроссинговера случайно выбирается N точек разреза. Каждая подстанция и межподстанционная зона представляются в хромосоме определенным количеством генов. Для каждой подстанции и межподстанционной зоны выбирается своя точка разреза и происходит обмен генами между двумя родительскими особями.

Для увеличения вариабельности популяции с некоторой вероятностью выполняется мутация (изменение одного гена в хромосоме особи). В результате многократных кроссинговеров и мутаций формируется новое поколение.

Критерием окончания процесса формирования новых поколений популяции является отсутствие улучшений в течение пяти поколений или превышения заданного количества итераций (количества формирования новых поколений).

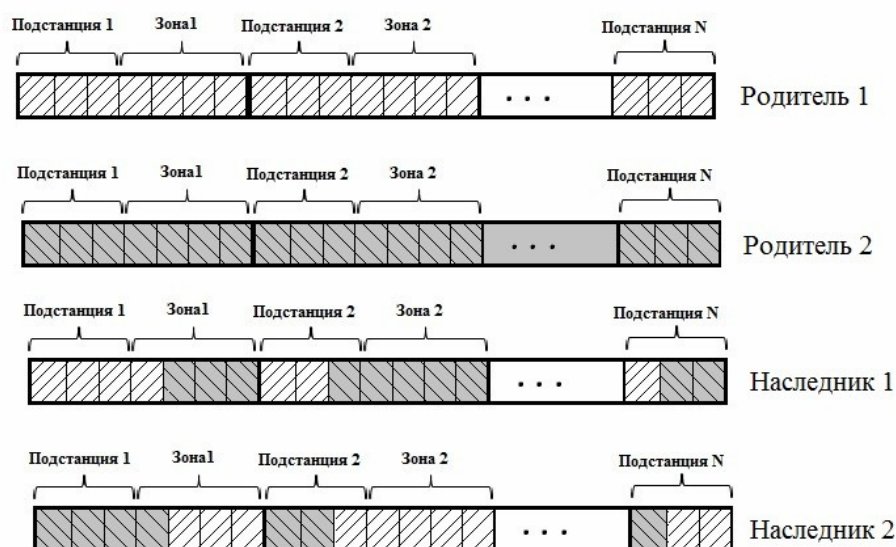


Рисунок 5.63 - Процесс кроссинговера с точками разреза 4, 2, ..., 1

В результате работы программного средства рассчитывается регламент переключения оборудования подстанций и межподстанционных зон, который обеспечит снижение затрат на потери электроэнергии на выбранном участке тяговой сети.

Выполнены исследования на тяговом участке Синельниково-Чаплино Приднепровской железной дороги. В результате расчетов было установлено, что применяемая схема подключения путей к узлам на исследуемом участке является оптимальной и ее изменение может привести к снижению уровня надежности. В качестве примера в табл. 5.23 и табл. 5.24 приведены рекомендации по переключениям тяговых и понижающих трансформаторов, а также напряжений на шинах подстанций на промежутке времени 14.00-15.00.

Таблица 5.23 -Расчетные подключения тяговых и понижающих трансформаторов

Подстанция	Действующее количество подключенных трансформаторов		Рекомендуемое количество подключенных трансформаторов	
	тяговых	понижающих	тяговых	понижающих
1	1	2	2	1
2	1	1	1	2
3	1	2	2	1
4	1	1	2	2
5	1	1	2	1

Изменение регламента переключений оборудования подстанций позволяет снизить расходы на электроэнергию на 2,5 %, как видно на рис. 5.64.

Таблица 5.24 - Уровни напряжений подстанций

Подстанция	Рекомендуемый уровень напряжения подстанций (кВ)
1	3,7
2	3,6
3	3,7
4	3,4
5	3,4

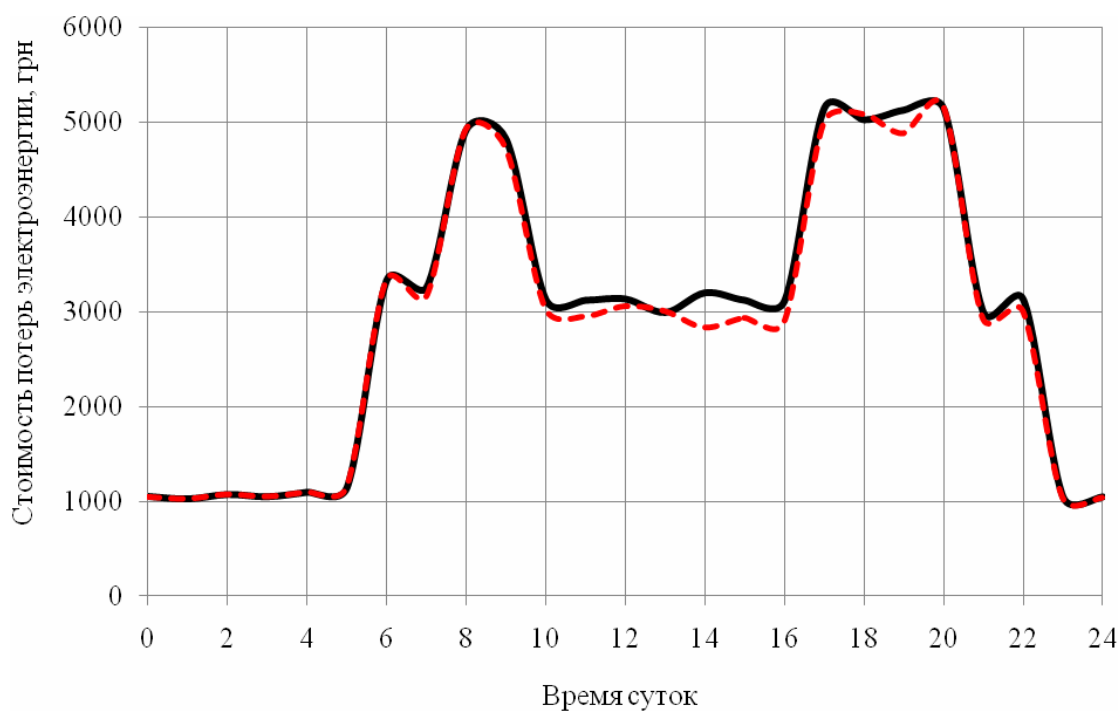


Рисунок 5.64 - Стоимости потерь электроэнергии на участке
Синельниково-Чаплино

В приложении Д представлен алгоритм, текст программы, реализующей ГА, а также пример результатов работы программного комплекса.

Определение условий рациональной работы силовых трансформаторов тяговых подстанций

Тяговая нагрузка в отличие от стационарной является резко динамичной, для её описания целесообразно применять аппарат теории случайных процессов. Экономически целесообразный режим работы трансформаторов в [307,308] предложено определять в зависимости от суммарной нагрузки и числа параллельно включенных трансформаторов, обеспечивающих минимум приведенных потерь электроэнергии в этих трансформаторах $\Delta P_x, \Delta Q_x$

$$\Delta P_{\Sigma}' = n(\Delta P_x + \kappa_{\text{ип}} \Delta Q_x) + \frac{1}{n}(\Delta P_k + \kappa_{\text{ип}} \Delta Q_k) \kappa_3^2, \quad (5.168)$$

где $\Delta P_{\Sigma}'$ - приведенные активные потери в параллельно работающих трансформаторах с учётом потерь, создаваемых ими во внешней системе электроснабжения;

n - количество параллельно работающих трансформаторов;

$\Delta P_x, \Delta Q_x$ - потери активной и реактивной мощности на холостом ходе;

$\kappa_{\text{ип}}$ - коэффициент изменения потерь;

$\Delta P_k, \Delta Q_k$ - потери активной и реактивной мощности в режиме короткого замыкания;

κ_3 - коэффициент загрузки трансформаторов.

В отличие от нетяговых потребителей нагрузка тяговых подстанций железных дорог имеет нестационарный характер. Определим критическое значение математического ожидания тока нагрузки, при котором переход от k параллельно включенных трансформаторов к $k+1$ уменьшает активные потери в них [55, 62].

Запишем математическое ожидание активных потерь при включенных k и $(k+1)$ -м трансформаторе, а затем приравняем их:

$$kP_{XX} + \frac{1}{k}(M_{\text{акр}} + \sigma_a^2) = (k+1)P_{XX} + \frac{1}{k+1}(M_{\text{акр}} + \sigma_a^2), \quad (5.169)$$

где P_{XX} - потери холостого хода, а $M_{акр}$ и σ_a - математическое ожидание и дисперсия суммы активных потерь в первичной, районной и тяговой обмотках трансформатора.

Решение уравнения (5 .169) относительно критического значения $M_{акр}$ имеет вид:

$$M_{акр} = k(k+1)P_{XX} - \sigma_a^2. \quad (5.170)$$

Для перехода от одного к двум параллельно работающим трансформаторам критическое значение определяется по формуле

$$M_{акр} = 2P_{XX} - \sigma_a^2.$$

Если в качестве критерия выбрать минимум реактивных потерь, можно аналогично (5 .169) составить уравнение:

$$k \frac{I_0 \cdot S_H}{100} + \frac{1}{k} (M_{ркр} + \sigma_p^2) = (k+1) \frac{I_0 \cdot S_H}{100} + \frac{1}{k+1} (M_{ркр} + \sigma_p^2), \quad (5.171)$$

где I_0 - ток холостого тока трансформатора;

S_H - его номинальная мощность;

$M_{ркр}$ и σ_p^2 - математическое ожидание и дисперсия суммы реактивных потерь в первичной, районной и тяговой обмотках трансформатора.

Решение этого уравнения имеет вид

$$M_{ркр} = k(k+1) \frac{I_0 S_H}{100} - \sigma_p^2, \quad (5.172)$$

что для перехода на параллельную работу двух трансформаторов дает

$$M_{ркр} = 2 \frac{I_0 S_H}{100} - \sigma_p^2. \quad (5.173)$$

Выбор числа параллельно работающих трансформаторов по критериям (5 .169) и (5 .171) дает возможность минимизировать средние активные или

реактивные потери для практически важного случая ограниченного числа переключений коммутирующих аппаратов. При минимизации реактивных потерь средний эффект будет положительным независимо от распределения загрузки фаз, так как включение второго трансформатора приведет к уменьшению суммарной реактивной мощности, потребляемой трансформаторами из системы внешнего электроснабжения. Такое уменьшение ведет к снижению уровня обменной реактивной мощности между системой и тяговой подстанцией, что, в свою очередь, снижает потери напряжения в системе и в тяговых трансформаторах, увеличивая средний уровень напряжения на тяговых шинах и снижая разброс напряжения относительно среднего.

Рассмотрим эффективность выбора числа трансформаторов по критериям (5.169) или (5.171) при отсутствии районной нагрузки или ее пренебрежимой малости по сравнению с тяговой.

Активные потери в этом случае выражаются формулой

$$\begin{aligned}\Delta P(t/k) &= kP_{XX} + \frac{1}{3k} r_{TP} (m_L^2 + m_{II}^2 + m_P^2 + \sigma_L^2 + \sigma_{II}^2 + \sigma_P^2) = \\ &= kP_{XX} + \frac{1}{3k} r_{TP} (M + \sigma^2),\end{aligned}\tag{5.174}$$

где $r_{TP} = 3U_H^2 R_{K3} / S_H^2$ - активное сопротивление обмоток трансформатора;

$m_L, m_{II}, m_P, \sigma_L^2, \sigma_{II}^2, \sigma_P^2$ - математические ожидания и дисперсии токов нагрузки плеч питания и цепи отсоса. Аналогично для реактивных потерь можно записать

$$\Delta Q(t/k) = k \frac{I_0 S_H}{100} + \frac{1}{3k} x_{TP} (M + \sigma^2),\tag{5.175}$$

где $x_{TP} = 3u_K U_H^2 / (S_H \cdot 100)$ - индуктивное сопротивление фазы трансформатора;

u_K - напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Формулы (5 .170) и (5 .173) с учетом выражений (5 .174) и (5 .175) принимают вид:

$$M_{акр} = \frac{6P_{XX}}{r_{TP}} - \sigma^2, M_{ркр} = \frac{6I_0 S_H}{100x_{TP}} - \sigma^2. \quad (5.176)$$

Зная числовые характеристики токов в плечах питания и цепи отсоса тяговой подстанции, можно определить значения суммы квадратов математических ожиданий M . При $M > M_{ркр}$ параллельная работа тяговых трансформаторов гарантирует снижение реактивных потерь и улучшение качества напряжения на тяговых шинах; при $M > M_{акр}$ обеспечивается снижение активных потерь при улучшении качества напряжения.

Рассмотрим возможные подходы к определению рациональных коэффициентов загрузок силовых трансформаторов [68].

Для подсчета потерь электроэнергии в 3-х обмоточном силовом трансформаторе необходимы следующие данные [261]:

а) паспортные или каталожные:

- номинальная мощность трансформатора S_H , кВ · А;
- мощность обмоток ВН, СН, НН $S_{ВН}$, $S_{СН}$, $S_{НН}$, кВ · А (в паспорте или каталоге данная в процентах к номинальной мощности);
- потери мощности в меди обмоток ВН, СН, НН при полной их загрузке $\Delta P_{ВН}$, $\Delta P_{СН}$, $\Delta P_{НН}$, кВт;
- ток холостого хода трансформатора $I_{х.х.}$, %;
- потери реактивной мощности трансформатора при холостом ходе, квар

$$\Delta Q_{х.х.} = S_H \cdot I_{хх} / 100$$

- напряжение короткого замыкания каждой из обмоток трансформатора, %

$$U_{БК} = 0,5 \cdot (U_{ВН-СН} + U_{ВН-НН} - U_{СН-НН}), \quad (5.177)$$

$$U_{\text{СК}} = 0,5 \cdot (U_{\text{ВН-СН}} + U_{\text{СН-НН}} - U_{\text{ВН-НН}}),$$

$$(5.178)$$

$$U_{\text{НК}} = 0,5 \cdot (U_{\text{ВН-НН}} + U_{\text{СН-НН}} - U_{\text{ВН-СН}}), \quad (5.179)$$

где $U_{\text{ВН-СН}}$, $U_{\text{СН-НН}}$, $U_{\text{ВН-НН}}$ берутся из паспорта или каталога;

- реактивная мощность, которая потребляется обмотками ВН, СН, НН трансформатора при полной нагрузке, квар

$$\Delta Q_{\text{ВН}} = S_{\text{ВН}} \cdot U_{\text{ВК}} / 100, \quad (5.180)$$

$$\Delta Q_{\text{ВН}} = S_{\text{СН}} \cdot U_{\text{СК}} / 100, \quad (5.181)$$

$$\Delta Q_{\text{НН}} = S_{\text{НН}} \cdot U_{\text{НК}} / 100; \quad (5.182)$$

б) потребление активной ($WP_{\text{ВН}}$, $WP_{\text{СН}}$, $WP_{\text{НН}}$), кВт·ч и реактивной ($WQ_{\text{ВН}}$, $WQ_{\text{СН}}$, $WQ_{\text{НН}}$), кВАр·ч электроэнергии, которая прошла за расчётное время через обмотки соответственно высокого, среднего и низкого напряжения трансформатора:

$$WP_{\text{ВН}} = WP_{\text{СН}} + WP_{\text{НН}},$$

$$WQ_{\text{ВН}} = WQ_{\text{СН}} + WQ_{\text{НН}};$$

в) количество часов работы трансформатора в расчетный период (календарное число часов) $T_{\text{п}}$;

г) количество часов работы трансформатора под нагрузкой в расчетный период $T_{\text{р}}$.

При вычислении потерь электроэнергии в трансформаторе последовательно определяют:

а) фактическую мощность каждой обмотки трансформатора по данным фактического потребления активной и реактивной электроэнергии за расчетный период, кВт · А

$$S_{\text{фВН}} = \sqrt{P_{\text{фВН}}^2 + Q_{\text{фВН}}^2}, \quad (5.183)$$

$$S_{\text{фСН}} = \sqrt{P_{\text{фСН}}^2 + Q_{\text{фСН}}^2}, \quad (5.184)$$

$$S_{\phi_{HH}} = \sqrt{P_{\phi_{HH}}^2 + Q_{\phi_{HH}}^2}, \quad (5.185)$$

$$\text{где } P_{\phi_{BH}} = WP_{\phi_{BH}} / T_p = (WP_{\phi_{CH}} + WP_{\phi_{HH}}) / T_p, \quad (5.186)$$

$$Q_{\phi_{BH}} = WQ_{\phi_{BH}} / T_p = (WQ_{\phi_{CH}} + WQ_{\phi_{HH}}) / T_p, \quad (5.187)$$

$$P_{\phi_{CH}} = WP_{\phi_{CH}} / T_p, \quad (5.188)$$

$$Q_{\phi_{CH}} = WQ_{\phi_{CH}} / T_p, \quad (5.189)$$

$$P_{\phi_{HH}} = WP_{\phi_{HH}} / T_p, \quad (5.190)$$

$$Q_{\phi_{HH}} = WQ_{\phi_{HH}} / T_p; \quad (5.191)$$

б) коэффициент загрузки каждой из обмоток трансформатора

$$k_{з\ BH} = S_{\phi\ BH} / S_{H\ BH}, \quad (5.192)$$

$$k_{з\ CH} = S_{\phi\ CH} / S_{H\ CH}, \quad (5.193)$$

$$k_{з\ HH} = S_{\phi\ HH} / S_{H\ HH}, \quad (5.194)$$

где S_{BH} , S_{CH} , S_{HH} - номинальная мощность обмоток высокого, среднего и низкого напряжения трансформатора, кВа;

в) потери активной электроэнергии, кВт.ч.

$$\Delta WP = \Delta P_{XX} \cdot T_{II} + (\Delta P_{BH} \cdot k_{з\ BH}^2 + \Delta P_{CH} \cdot k_{з\ CH}^2 + \Delta P_{HH} \cdot k_{з\ HH}^2) \cdot T_p; \quad (5.195)$$

г) потери реактивной электроэнергии, квар.ч

$$\Delta WQ = \Delta Q_{XX} \cdot T_{II} + (\Delta Q_{BH} \cdot k_{з\ BH}^2 + Q_{CH} \cdot k_{з\ CH}^2 + \Delta Q_{HH} \cdot k_{з\ HH}^2) \cdot T_p. \quad (5.196)$$

Потери активной электроэнергии как в самом трансформаторе, так и в элементах системы электроснабжения (от генераторов электростанций к данному трансформатору) в зависимости от реактивной мощности, потребляемой трансформатором, можно определить по выражению [76]:

$$\Delta WP' = \Delta P'_{XX} \cdot T_{II} + (\Delta P'_{ВН} \cdot k_{з\text{ВН}}^2 + \Delta P'_{СН} \cdot k_{з\text{СН}}^2 + \Delta P'_{НН} \cdot k_{з\text{НН}}^2) \cdot T_p, \quad (5.197)$$

где $\Delta P'_{XX} = \Delta P_{XX} + k_{зВ} \cdot \Delta Q_{XX}$ приведенные активные потери мощности холостого хода;

$k_{зВ}$ коэффициент изменения потерь или экономический эквивалент реактивной мощности, который характеризует активные потери от источника питания к трансформатору, которые приходятся на 1 квар реактивной мощности, кВт/квар (значение коэффициента $k_{зВ}$ приведены в [308] (табл. 5.25);

$$\Delta P'_{ВН} = \Delta P_{ВН} + k_{зВ} \cdot \Delta Q_{ВН}, \quad \Delta P'_{СН} = \Delta P_{СН} + k_{зВ} \cdot \Delta Q_{СН}, \quad \Delta P'_{НН} = \Delta P_{НН} + k_{зВ} \cdot \Delta Q_{НН} -$$

приведенные активные потери мощности при полной загрузке трансформатора для обмоток ВН, СН, НН соответственно;

Таблица 5.25 Коэффициент изменения потерь $k_{зВ}$ в трансформаторах

Характеристика трансформатора и системы электроснабжения	$k_{зВ}$, кВт/квар	
	в часы максимума энергосистемы	в часы минимума энергосистемы
Трансформаторы, которые питаются непосредственно от шин электростанций	0,02	0,02
Сетевые трансформаторы, которые питаются от электростанций на генераторном напряжении	0,07	0,04
Понижающие трансформаторы 110/35/10 кВ, которые питаются от районных сетей	0,1	0,06
Понижающие трансформаторы 6 — 10/0,4 кВ, которые питаются от районных сетей	0,15	0,1

В условиях эксплуатации оптимальным коэффициентом загрузки считают такой, который обеспечивает максимальный приведенный КПД. Для двухобмоточных трансформаторов это выражение будет следующим

$$k_{з\text{опт}} = \sqrt{\frac{\Delta P'_X}{\Delta P'_K}}. \quad (5.198)$$

Однако, в условиях эксплуатации не всегда возможно регулировать нагрузку трансформатора для получения оптимального коэффициента загрузки, поскольку нагрузка зависит от условий технологического процесса

предприятий железнодорожного транспорта. Расчеты, проведенные на кафедре "Электроснабжение железных дорог", показали, что коэффициенты загрузки трансформаторов, рассчитанные по максимуму КПД, имеют низкое значение. Так, для трансформаторов типа ТМ мощностью 630 - 16000 кВ·А при $k_{3\phi} = 0,07$ кВт/квар коэффициент загрузки равняется 0,4 ... 0,5. В данном случае целесообразнее было бы использовать экономический критерий, а именно минимум приведенных годовых расходов. Именно такой критерий будет содержать в себе информацию и о стоимости трансформатора, и о стоимости электроэнергии. Применение этого критерия позволяет, учитывая эффективность капиталовложений в трансформаторы, с одной стороны, избежать лишних потерь электроэнергии, а с другой стороны перерасходов материальных ценностей и трудовых расходов.

Приведенные расходы на один силовой трансформатор тяговой подстанции в зависимости от нагрузки могут быть получены по выражению

$$Z_{1T} = k_n \cdot K + (\Delta P'_x + k_{3BH}^2 \cdot \Delta P'_{BH} + k_{3CH}^2 \cdot \Delta P'_{CH} + k_{3HH}^2 \cdot \Delta P'_{HH}) \cdot T_{II} \cdot c_e, \quad (5.199)$$

где $k_n = k_e + k_a$ нормативный коэффициент; k_e - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; $k_e = 0,15$; k_a - нормативный коэффициент амортизационных отчислений; $k_a = 0,06$; K - одноразовые капитальные вложения в один трансформатор; c_e - стоимость (тариф) 1 кВт·ч электроэнергии.

Методика технико-экономических расчетов, по оценкам специалистов, должна быть пересмотрена. С целью сопоставления трансформаторов разной мощности, в расчетах кафедры «Электроснабжения железных дорог» применили удельные приведенные расходы, отнесенные к переданной мощности S :

$$p_{1T} = \frac{Z_{1T}}{S}. \quad (5.200)$$

Произведём математические операции с последним выражением (рассматриваем двухобмоточный трансформатор).

$$Z_{1T} = k_H K + (\Delta P'_{xx} + \Delta P'_{k3} k_3^2) \cdot T_{\Pi} c_e, \quad (5.201)$$

Имея в виду, что $S = S_H \cdot k_3$ получим следующее выражение для приведенных расходов

$$p_{1T} = \frac{k_H K + (\Delta P'_{xx} + \Delta P'_{k3} k_3^2) \cdot T_{\Pi} c_e}{S_H k_3}. \quad (5.202)$$

Ввиду того, что при использовании тарифов на электроэнергию, дифференцированных во времени, применяются тарифные коэффициенты (см. табл. 3.12) целесообразно переписать выражение (5.202)

$$p_{1T} = \frac{k_H K + (\Delta P'_{xx} + \Delta P'_{k3} k_3^2) \cdot T_{\Pi} k_{\text{тар}} c_e}{S_H k_3}, \quad (5.203)$$

где $k_{\text{тар}}$ – тарифный коэффициент, принимаемый в соответствии с [309].

Определим оптимальное значение коэффициента загрузки трансформатора $k_{\text{зопт}}$, которое минимизирует выражение (5.202).

Анализ зависимостей удельных приведенных расходов от коэффициентов загрузки трансформаторов типа ТМ мощностью 25 – 25 000 кВ·А показал, что удельные приведенные расходы резко возрастают при коэффициентах загрузки, меньших 0,6. При $k_3 > 0,6$ удельные приведенные расходы увеличиваются незначительно. На основании последнего выражения можно получить оптимальный коэффициент загрузки, который отвечает минимуму приведенных расходов:

$$k_{3.\text{опт}} = \sqrt{\frac{\Delta P'_x}{\Delta P'_K} + \frac{k_H \cdot K}{c_e \cdot T_{\Pi} \cdot k_{\text{тар}} \cdot \Delta P'_K}}. \quad (5.204)$$

Коэффициент загрузки, рассчитанный по последнему выражению, больше, чем коэффициент загрузки, рассчитанный по минимуму расходов. С увеличением номинальной мощности трансформатора оптимальный коэффициент загрузки при одной и той же стоимости электроэнергии уменьшается. В табл. 5.26 в качестве примера приведены рассчитанные по оптимальные коэффициенты загрузки понизительных трансформаторов, которые находятся в эксплуатации на железных дорогах Украины. Проанализируем, как влияет изменение тарифа на электроэнергию на величину оптимального коэффициента загрузки понизительного трансформатора. Для этого в выражении (5.202) будем изменять тариф на электроэнергию.

Таблица 5.26. - Оптимальные коэффициенты загрузки понизительных трансформаторов

Тип	Стоимость трансформатора, грн	Потери, кВт		$k_{\text{зопт}}$		$k_{\text{зопт}}$ при трёхзонных дифференцированных тарифах		
		$\Delta P_{\text{х.л.}}$	$\Delta P_{\text{к.л.}}$	По max КПД	По $P_{1\text{т}}$	Ночной тариф	Полупик	Пик
ТМ-25/10	15 360	0,13	0,6	0,465	0,957	1,736	0,950	0,778
ТМ-40/10	15 480	0,19	0,88	0,465	0,834	1,462	0,829	0,695
ТМ-63/10	16 560	0,265	1,28	0,455	0,749	1,273	0,744	0,635
ТМ- 100/35	22 200	0,465	1,97	0,486	0,737	1,211	0,733	0,638
ТМ-250/10	38 400	0,82	3,7	0,471	0,711	1,164	0,707	0,616
ТМ-400/10	58 800	1,05	5,5	0,437	0,695	1,166	0,691	0,594
ТМ-630/10	78 000	1,56	7,6	0,453	0,697	1,152	0,693	0,601
ТМ-1000/10	106 800	2,4	12,2	0,444	0,660	1,074	0,657	0,574
ТМ-2500/35	350 000	5,1	25	0,452	0,766	1,316	0,761	0,645
ТМ-4000/10	420 000	6,4	33	0,440	0,736	1,259	0,731	0,622
ТМ-6300/35	1 200 000	9,4	46,5	0,450	0,952	1,738	0,945	0,770
ТДТН-16000/110	2 000 000	32	105	0,552	0,908	1,544	0,903	0,771
ТДТНЭ-25000/110	3 000 000	45	145	0,557	0,936	1,603	0,930	0,790
ТДТНЭ-40000/110	4 000 000	63	200	0,561	0,928	1,581	0,922	0,786
ТРДП-12500/10ЖУ 1	1 600 000	18,7	84	0,472	0,862	1,518	0,856	0,715

Для простоты рассмотрим понижительный двухобмоточный трансформатор ТДТН 16000/110/10. Зависимость оптимального коэффициента загрузки данного трансформатора от тарифа на электроэнергию приведена на рис. 5.65.

Применим рассмотренный подход к определению оптимальных коэффициентов загрузки силовых трансформаторов на трёхобмоточные трансформаторы. В отличие от тяговых подстанций переменного тока, на тяговых подстанциях постоянного тока обмотки понижительных трансформаторов загружены одинаково. Поэтому для тяговых подстанций постоянного тока методика определения оптимальных коэффициентов загрузки понижительных трансформаторов аналогична вышеизложенной для двухобмоточных трансформаторов.

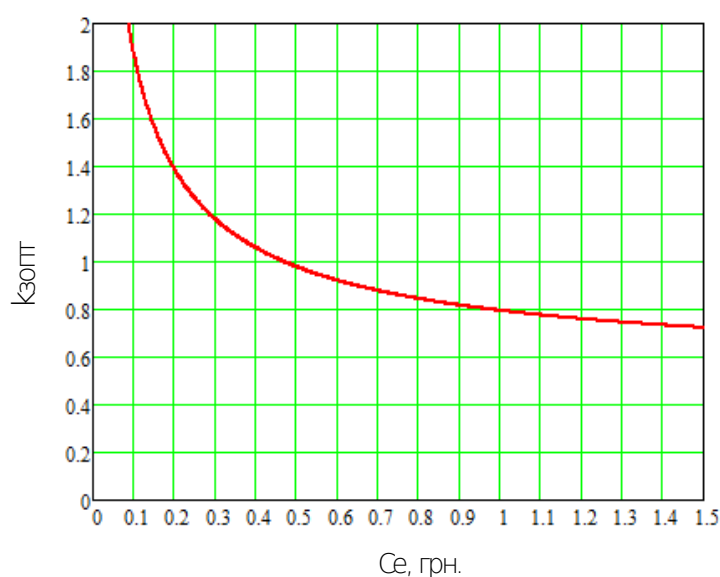


Рисунок 5.65 - График зависимости оптимального коэффициента загрузки трансформатора ТДТН 16000/110/10 от тарифа на электроэнергию

Итак, для выбора оптимальной мощности трансформатора, рационального коэффициента загрузки можно пользоваться критерием минимума приведенных годовых расходов. При этом оптимальный коэффициент загрузки обратно пропорционально зависит от стоимости 1 кВт·ч электроэнергии и от номинальной мощности трансформатора.

Научные основы энергооптимальной организации движения поездов

Особенности составления графиков поездов на электрифицированных линиях

Перевозочный процесс представляет собой сложную систему большого порядка, которая характеризуется наличием множества элементов; связей между отдельными элементами; необходимостью учёта взаимодействия с окружающей средой в условиях неопределённости. Максимальные показатели потока поездов ограничиваются наличной пропускной способностью участка n_n . Согласно [310] наличной пропускной способностью железнодорожного участка на перегонах называется максимальное количество грузовых поездов (пар поездов) установленной массы и длины, которое может быть пропущено через данный участок за единицу времени (сутки, час) согласно его технической оснащённости и принятого способа организации движения поездов. Если к участку подводят больше поездов, чем наличная пропускная способность, то движение поездов будет находиться в условиях перенасыщения, в которых невозможно выполнить нормативы графика и достигнуть максимальных размеров движения. Необходимо соблюдать условие, чтобы фактическая суточная интенсивность поездопотока была ниже пропускной способности, т. е. $N_D < N$, а разность ΔN представляла бы некоторый резерв пропускной способности для обеспечения надежного, беспрепятственного пропуска поездов. Наличие резервов - решающее условие успешной работы транспортных систем.

Задача энергооптимального управления показателями потоков поездов состоит в формировании «регулирующего» графика движения. Управляющим параметром выступает межпоездной интервал в четном и нечетном направлениях. Его можно изменять в пределах от I до ∞ , что даёт

возможность регулировать и управлять плотностью и интенсивностью потока поездов.

Особенностью работы тяговых систем энергоснабжения является, как известно, непрерывное изменение тяговых нагрузок как по величине, так и по месту их расположения. Тяговыми нагрузками являются токи, потребляемые движущимися электровозами. Изменение тяговых нагрузок зависит от режима работы электровоза, характеристик двигателей, веса поезда, профиля пути, графика движения. Суммарная величина тяговых нагрузок определяется нагрузками отдельных поездов, количеством и расположением поездов, которые одновременно находятся на участке.

Изменение режима работы и места расположения электровоза одного поезда оказывает влияние на режим работы электровозов других поездов, находящихся на линии в зоне питания смежных подстанций, и отражается на величине напряжения в контактной сети.

Ряд вопросов, связанных с режимом напряжения на электрических железных дорогах и имеющих большое практическое значение, до последнего времени оставался нерассмотренным. Например, решение практических задач организации движения тяжеловесных поездов с точки зрения наиболее целесообразного по условиям работы системы энергоснабжения расположения между тяговыми подстанциями поездов тех или иных категорий в разном их сочетании и с разными интервалами времени попутного следования. Эти вопросы приобретают особую актуальность, когда параметры системы энергоснабжения были установлены для условий движения поездов нормального веса, предусмотренного в графике движения, а фактически на линии организовано движение поездов повышенного веса.

Особую важность приобретает эта задача для электрифицированных участков в период резкого роста на них размеров перевозок и значительного заполнения пропускной способности участков. В этих условиях для обеспечения пропуска резко возросшего грузопотока применяются методы

форсированного использования провозной способности электрифицированных линий. К их числу относится организация движения части поездов удвоенного или повышенного веса. В то же время на графике имеются поезда как нормального, так и более легкого веса.

Пачковое движение тяжеловесных поездов на электрифицированных линиях может привести к снижению скорости движения поездов на отдельных участках, вследствие длительного понижения напряжения. Подобные режимы работы системы энергоснабжения в отдельных случаях могут вызывать даже затруднения в эксплуатационной работе. Это связано с тем, что времена хода поездов, закладываемые в графики движения, устанавливаются исходя из неизменной расчетной величины напряжения вдоль пути следования электровоза за период работы его по автоматической характеристике. Между тем при длительном понижении напряжения скорость движения поездов уменьшается, а значит, время хода их увеличивается по сравнению с расчетным, что может привести даже к снижению пропускной способности участка.

Анализ работы электрифицированных линий, оборудованных автоблокировкой, показал, что при существующей методике расчета времени хода поездов, когда принимается неизменная расчетная величина напряжения на токоприемнике, фактическое изменение величины и месторасположения нагрузок поездов может привести к нарушениям нормального режима движения поездов. Это крайне нежелательно на участках с трудным профилем. При отправлении на такой участок поездов с распорядительной станции, где расположена тяговая подстанция, могут возникнуть условия, нарушающие нормальное движение поездов.

Как показали наблюдения, на Приднепровской железной дороге среднее напряжение на токоприемнике составных поездов уменьшается до 2 560 В и ниже [31].

С целью исследования изменения некоторых параметров системы тягового электроснабжения постоянного тока (напряжения и токов в

контактной сети) в зависимости от графика пропуска тяжеловесных поездов были произведены замеры уровней напряжения на действующем участке Приднепровской железной дороги, где организовано движение сдвоенных поездов. Характеристики участка приведены в табл. 5.27.

Таблица 5.27 - Характеристики исследуемых перегонов

Перегон	Характеристики			
	ПСК	Длина перегона, км	Контактная подвеска	Профиль пути
Н-С	на 56 км	27	М-120+2МФ-100+А-185	равнинный
Р-К	на 12 км	24	М-120+2МФ-100+2А-185	постоянный подъём в сторону К

Для замеров уровней напряжения были установлены самописцы на ПСК Б и ПСК 12. В табл. 5.28, 5.29 приведены фрагменты графика движения поездов и уровни напряжений на соответствующем перегоне.

Таблица 5.28 Фрагмент графика движения поездов

№	№ поезда	Вес поезда, т	ПСК - Б	ПСК-12 км
1	2	3	4	5
28.09.09				
1	2	5 370	12:20	-
2	4	5384	13:00	-
3	6/8 (сдвоен)	10 628	14.16	15:10
4	10	5501	15:30	16:20
5	12	5107	15:45	16:35
6	14	5186	20:40	21:20
7	16	5431	21:10	21:45
8	18	5095	23:20	23:45
9	20	4647	23:30	00:10
13.10.09				
1	22	4269	12:42	13:00
2	24	3911	12:55	13:12
3	26/28 (сдвоен)	5423/5417=10840	17:58	18:15

Окончание табл. 5.28

1	2	3	4	5
14.10.09				
4	30/32 (сдвоен)	10883	3:14	3:40
5	34	3981	8:42	8:48
6	36	3783	9:00	9:18
7	38	4909	9:12	9:40
8	40/42	10973	16:15	16:25
9	44	5392	16:22	16:40
15.10.09				
10	46/48	10640	06:50	07:00
11	50	5014	07:42	08:12
	52	5542	10:18	10:38

Таблица 5.29 - Фрагмент замера уровней напряжений на перегоне Н - С

Дата и время включения	Время час, мин	U, кВ	Продолжительность, мин
28.09.2009г. 12 ⁰⁷	12 ¹⁰	2,7	4
	12 ¹⁴	3,2	6
	12 ³²	2,56	2
	12 ³⁸	2,9	3
	12 ⁴⁰	3,2	25
	13 ¹²	2,7	4
	13 ¹⁸	3,1-3,2	45
	14 ¹⁴	2,4	7
	14 ¹⁶	2,24	7
	14 ²⁰	2,9	1
	14 ³⁰	3,2	50
	15 ¹⁸	2,56	15
	15 ³⁹	2,53	4
	15 ⁴⁰	2,9	10
	15 ⁵⁰	3,2	18
	16 ¹⁰	2,9-3,1	2 часа 28 мин.
	18 ³⁸	2,9	8
	19 ¹³	2,7	2
	19 ⁵⁶	3,1-3,3	10
	20 ⁰²	3,3	5
	20 ⁰⁷	3,5	1 часа 14 мин.
	21 ⁵⁷	2,9	5
	22 ⁰²	2,65	5
	22 ¹⁰	3,0	2
	22 ¹²	3,2-3,45	1 час 48 мин.
	0 ⁰⁰	3,55	10

При наложении данных замеров уровней напряжений с расшифрованных лент на исполненный график движения грузовых поездов было отмечено:

Перегон Н – С, ПСК – Б.

1. При следовании сдвоенных грузовых поездов весом 10 000÷12 000т напряжение в контактной сети в середине фидерной зоны понижается до 2,2-2,4 кВ, что ниже норм ПТЭ (См. 28.09.09, поезд №1904/34, весом 10628т, время-14¹⁴-14¹⁶).

2. При следовании грузовых поездов весом 5 000т и более с интервалом движения 15 мин напряжение в контактной сети, в середине фидерной зоны, понижается до 2,5кВ, что также ниже норм ПТЭ [311] (см. 28.09.09, поезд №2370, весом 5 501т, время-15³⁰, поезд № 3072, весом 5 107 т, время 15⁴⁵).

Перегон Р – К, ПСК – 12.

1. При следовании сдвоенных грузовых поездов весом 10 000÷12 000т напряжение в контактной сети в середине фидерной зоны понижается до 2,5-2,6кВ, что ниже норм ПТЭ (см. 28.09.09, поезд № 1904/34, весом 10 628 т, время 15¹⁰-15⁵⁷).

2. При следовании грузовых поездов весом 5 000т и более с интервалом движения 15 мин (интервал движения грузовых поездов по тяговым расчетам ДН-1 должен быть не менее 18 мин) напряжение в контактной сети в середине фидерной зоны понижается до 2,6 кВ, что также ниже норм ПТЭ (см. 28.09.09, поезд № 2 370, весом 5 501т, время-16²⁰; поезд № 3072, весом 5 107т, время 15³⁵).

Для замеров тяговых токов были установлены самописцы на фидерах ФА-1 и ФА-3. Фрагменты таких замеров представлены в табл. 5.10 и табл. 5.11.

Фидер ФА-3. При следовании сдвоенных грузовых поездов весом 10000÷12000 т тяговый ток фидера ФА-3 на тяговой подстанции ЭЧЭ-48 достигает 2,5÷3,3 кА, продолжительностью от 10 до 16 минут, что превышает допустимые длительные токи (норма допустимых длительных токов, согласно ПСУ контактной сети постоянного тока при 15 % её износе, для подвески М-120+2МФ-100+А-185 должна быть не более 2 120 А). Допускается перегруз в 1,3 раза в течение не более 3 мин ($2120 \times 1,3 = 2756$ А). В данном случае время перегрузки значительно больше (16-3=на 13 мин.). (см. 14.10.09, поезд № 1912/42, весом 10 883т., время 3¹⁴÷3³⁰, поезд

№1906/36 весом 10 677т, время $16^{15} \div 16^{25}$, 15.10.09, поезд № 1902/32, весом 10 640т, время $6^{50} \div 7^{00}$)

Таблица 5.30 Фрагмент замера тяговых токов фидера ФА-3

Дата и время включения	Время, час, мин	$\pm I$, А	Продолжительность, мин
14.10.2009	$16^{07}-16^{10}$	$-1200 \div -400$	3
	$16^{10}-16^{15}$	$-400 \div -80$	5
	$16^{15}-16^{25}$	$-80 \div -3300$	10
	$16^{20}-16^{30}$	$-3300 \div -500$	2
15.10.2009	$6^{40}-6^{50}$	$0 \div -400$	10
	$6^{50}-7^{00}$	$-400 \div -2640$	10
	$7^{00}-7^{02}$	$-2640 \div +120$	2

Таблица 5.31 Фрагмент замера тяговых токов фидера ФА-1

Дата и время включения	Время, час, мин.	$\pm I$, А	Продолжительность, мин.
13.10.2009г., 13 ²⁵	1558-1600	$0 \div +160$	2
	1600-1603	$+160 \div +1600$	3
	1603-1608	$+1600 \div +2990$	5
	1608-1627	$+2990 \div +50$	19
	1627-1714	$+50 \div +480$	47
14.10.2009	1605-1610	$-200 \div +2100$	5
	1610-1618	$+2100 \div +1760$	8
	1618-1620	$+1760 \div +2660$	8
	1620-1630	$+2660 \div +80$	10
15.10.2009	640-650	$+680 \div -160$	10
	650-654	$-160 \div +2480$	4
	654-717	$-2480 \div +300$	23
	717-815	$+300 \div 0$	58

Фидер ФА-1. При следовании сдвоенных грузовых поездов весом 10 000÷12 000т тяговый ток фидера ФА-1 на тяговой подстанции ЭЧЭ-48 достигает 2,6÷2,9 кА, продолжительностью от 5 до 8 мин, что превышает допустимые длительные токи (норма допустимых длительных токов, согласно ПСУ контактной сети постоянного тока при 15 %-м её износе, для подвески М-120+2МФ-100+2А-185 должна быть не более 2 710 А). Допускается перегруз в 1,3 раза в течение не более 3 мин. ($2\,710 \times 1,3 = 2523$ А). В данном случае - время перегрузки больше (8-3=на 5 мин.) (см. 13.10.09, поезд №1906/36, весом 10 840т., время $16^{03} \div 16^{08}$, 14.10.09 поезд №1906/36

весом 10 973т, время $16^{15\div}16^{25}$, 15.10.09, поезд № 1902/32, весом 10 640т, время $6^{50\div}7^{00}$).

Из приведенного примера можно сделать такие выводы:

1. При следовании сдвоенных грузовых поездов весом 10 000 т и более, а также весом 5 000 т и более с интервалом движения между поездами менее 18 мин, в четном направлении, по участкам: Н - С, Р - К напряжение в контактной сети понижается до 2,2-2,4 кВ (по ПТЭ - не менее 2,7 кВ), что ставит в затруднительное положение машинистов грузовых поездов.

2. Тяговые токи, при этом, достигают величин 2,7-3,3 кА, что превышает значения допустимых длительных токов контактной подвески и медные провода подвергаются отжигу.

В качестве рекомендаций на перспективу можно предложить для поднятия напряжения в середине фидерной зоны Н - С, планировать на ст. Б установку комплектной одноагрегатной тяговой подстанции. Для частичного поднятия напряжения в середине фидерной зоны Н - С, учитывая расход активной электроэнергии на тягу поездов за июнь, июль и август 2009 г., необходимо переключить анцапфы тяговых трансформаторов на ЭЧЭ-С из первого положения во второе. Для предотвращения отжига контактных проводов на участке Р - К необходимо откорректировать интервалы движения поездов в соответствии с ограничениями системы тягового электроснабжения.

При расчете мощности устройств энергоснабжения проектировщики для периода интенсивного движения учитывают условия длительного падения напряжения в контактной сети и производят корректировку времени хода поездов с учетом потерь напряжения. При составлении же графика движения эти корректировки совершенно не учитываются и в график закладываются времена хода, полученные в результате расчетов при неизменной расчетной величине напряжения ($U_H=3000$ В), предусмотренной правилами производства тяговых расчетов. В результате на

электрифицированных линиях происходят нагоны одних поездов другими и в ряде случаев – остановка их перед красным сигналом.

Приведенные данные указывают на настоятельную необходимость правильного учета действительных условий движения поездов на электрифицированных участках.

Современное состояние науки в области электрической тяги позволяет установить требования к составлению графиков движения, определяемые работой системы энергоснабжения. Учет этих требований улучшит условия нормальной организации движения на электрифицированных линиях.

До сих пор известны только общие требования к организации движения поездов на электрифицированных линиях, учитывающие режимы работы систем электроснабжения [24,25], которые формулируются следующим образом:

1. Обеспечение равномерной прокладки поездов в графике движения, т. е. пропуск поездов с равными интервалами между ними.

2. Обеспечение равномерной загрузки энергоснабжающих устройств за счет чередования тяжеловесных поездов с поездами нормального веса и легковесными.

3. При необходимости скрещения поездов с ходу следует пропускать поезд, следующий в сторону подъема, а поезд, идущий в сторону спуска, останавливать.

До составления графика движения для каждого направления и конкретного участка необходимо установить условия наиболее целесообразного взаимного расположения поездов по условиям энергоснабжения. Надо отметить, что на электрифицированных однопутных линиях сравнительно редко наблюдаются длительные падения напряжения. Это объясняется тем, что на них устройства энергоснабжения рассчитываются со значительным резервом. Расчетный режим для однопутных линий принимается для условий пакетного движения при двух поездах в пакете в каждом направлении.

Иное положение на двухпутных участках, оборудованных автоблокировкой, где между смежными подстанциями может быть сосредоточено одновременно большое количество поездов. От взаимного расположения их на графике движения во многом зависит нормальная работа энергоснабжающих устройств, а значит, успешное выполнение этого графика. Известное значение имеет при этом и схема питания участка.

Проанализируем как влияет на энергетические характеристики контактной сети неравномерность потока поездов. Энергетическую эффективность контактной сети будем характеризовать процентом потерь в контактной сети, а неравномерность потока поездов - коэффициентом вариации межпоездного интервала.

При токосъёме по каждому пути и при отсутствии уравнивающих по выражению рассчитаем потери электроэнергии в тяговой сети участка постоянного тока С2-Ч Приднепровской ж.д., схема замещения которого представлена на рис. 5.48 [47].

Исходные данные:

- пикеты тяговых подстанций, а также ППС и ПСК;
- нормальное положение выключателей на ППС и ПСК показано на рис. 5.48;
- тип контактной подвески на участке М-120+2МФ-100+2А-185, М-120+2МФ-100+А-185.

Неравномерность потока поездов будем характеризовать

коэффициентом вариации межпоездного интервала $k_v = \frac{\sigma}{m}$. Расчёты были

выполнены в пакете Mathcad. На основе многовариантных расчётов с

различными значениями k_v , получен процент потерь в тяговой сети.

Зависимость процента потерь мощности от коэффициента вариации межпоездного интервала на фидерной зоне показана на рис. 5.66.

Регрессионный анализ процента потерь в тяговой сети позволил построить следующую зависимость:

$$\frac{\Delta P}{P} = 3,57 + 8,47 \cdot k_v. \quad (5.205)$$

Эта зависимость действительная для нашего отдельно взятого участка.

Таким образом, на энергетические характеристики электроснабжения влияет неравномерность потока поездов. Получена регрессионная зависимость процента потерь в тяговой сети от коэффициента вариации межпоездного интервала, который может характеризовать неравномерность транспортного потока.

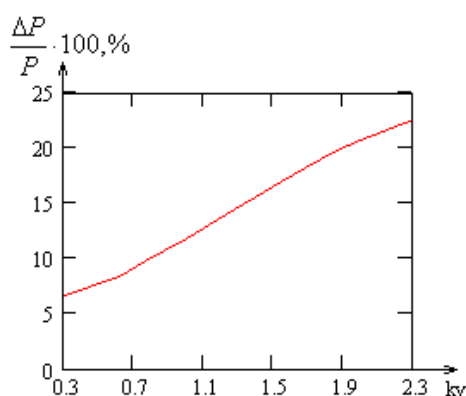


Рисунок 5.66 - Зависимость коэффициента потерь мощности от коэффициента вариации межпоездного интервала на фидерной зоне.

Влияние дислокации поездов на потери мощности в контактной сети

Для нормальной работы системы электроснабжения фактические показатели $\lambda_{\text{ф}}$ и $r_{\text{ф}}$ не должны превышать расчетные λ_{max} и r_{max} , которые соответствуют результирующей пропускной способности участка по условиям электроснабжения.

Изучение зависимости данного показателя от режимов работы системы тягового электроснабжения позволит повысить энергоэффективность перевозочного процесса за счет повышения качества управления потоком поездов.

Для выполнения требований по организации перевозочного процесса и улучшения показателей эксплуатационной работы железных дорог пропуск поездов необходимо осуществлять как можно быстрее, при этом должны учитываться ограничения по скорости движения, возможности тяговых подстанций и затраты энергии на перемещение поездов по выбранному участку [148].

В общем случае уравнение движения поезда имеет вид [169]:

$$\frac{ds}{dt} = v; \quad (5.206)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\xi}{1+\gamma} (u(s) - w_0 - i(s)), \quad (5.207)$$

где t – время;

V – скорость движения;

ξ – размерный коэффициент, представляющий собой ускорение поезда, когда на каждую единицу его массы действует единичная ускоряющая сила;

γ – коэффициент инерции вращающихся масс;

w_0 – основное удельное сопротивление движению поезда;

i – сопротивление от плана и профиля пути;

$u(s)$ – режим работы (позиция контроллера машиниста);

$$u(s) = \begin{cases} f_k(v) & \text{- режим тяги;} \\ 0 & \text{- режим выбега;} \\ -b_k(v) & \text{- режим торможения,} \end{cases} \quad (5.208)$$

где $f_k(v)$ – удельная касательная сила тяги;

$-b_k(v)$ – удельная тормозная сила.

Значение управляющего параметра должно удовлетворять ограничениям:

- в режиме тяги:

$$0 < u \leq f_{km}(v), \quad (5.209)$$

где $f_{km}(v)$ – максимальное значение удельной силы тяги, определяемое

ограничением тяговой характеристики при скорости движения v ;

– в режиме торможения:

$$-b_{km} \leq u(s) < 0, \quad (5.210)$$

где b_{km} – максимальное значение удельной тормозной силы, которая может быть реализована при скорости движения v .

Следовательно, приходим к задаче оптимизации при заданных условиях:

- профиль пути $i(s)$;
- тип электровоза;
- масса состава;
- тип вагонов и нагрузки от оси на рельс.

При этом необходимо найти такое $u(s)$, которое удовлетворяет (5.209), (5.210). Решение системы (5.208) $v(s)$ должно удовлетворять ограничениям

$$\underline{v}(s) \leq v(s) \leq \bar{v}(s), \quad (5.211)$$

где $\underline{v}(s)$ и $\bar{v}(s)$ – соответственно допустимые минимальное и максимальное значение скорости движения $v(s)$.

Чтобы задача имела замкнутый характер, необходимо добавить граничные условия:

$$\underline{v}(s)|_{S=S_H} \in V_H; \quad v(s)|_{S=S_K} \in V_K, \quad (5.212)$$

где V_H и V_K – некоторые интервалы, из которых должны выбираться скорости в начале пути $S=S_H$ и в конце пути $S=S_K$.

Критерием оптимальности является минимальное значение времени движения поезда на отрезке пути $[S_H, S_K]$.

Время движения поезда определяется из условия

$$t = \int_{S_H}^{S_K} \frac{ds}{v(s)}, \quad (5.213)$$

откуда следует, что $v(s)$ должна быть максимальной при оговоренных ограничениях. В настоящее время данная задача достаточно полно исследована и имеются программные реализации ее решения [312]. Влияние параметров эксплуатации на величину потерь мощности в тяговой сети с учетом характеристик системы электроснабжения изучено в работах [9, 76, 313]. Тяговые расчеты, выполненные для любого железнодорожного участка, позволяют получить две зависимости (рис. 5.67):

- потребляемые токи: $I(S)$, $S \in [S_H, S_K]$;
- скорость движения поезда: $V(S)$, $S \in [S_H, S_K]$,

где S - длина МЗ, км;

S_H, S_K - начальная и конечная координаты МЗ.

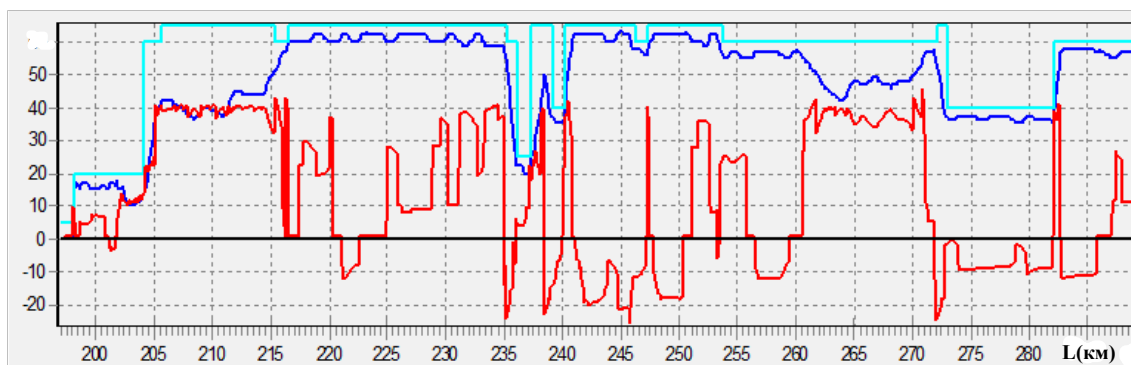


Рисунок 5.67 - Зависимости потребляемых токов и скорости движения поезда от длины участка

Эти зависимости объективно характеризуют влияние технических данных тягового подвижного состава и параметров пути на характер изменения нагрузки. Однако в указанных работах не проводились

исследования зависимости величины потерь мощности в тяговой сети от дислокации поездов и расстояния между поездами на участке.

Исследованы зависимости величины потерь мощности в тяговой сети от дислокации поездов и расстояния между поездами на электрифицированной линии Приднепровской ж.д. Н.Д.-Узел-Чаплино (рис. 5.68) с учетом следующих расчетных данных [46, 314]:

- 1) длина участка $L_0 = 110$ км;
- 2) место расположения поездов $X = [x_1 x_2 \dots x_N]$;
- 3) токи, потребляемые поездами $I(S)$, $S \in [S_H, S_K]$;
- 4) скорости движения поездов $V(S)$, $S \in [S_H, S_K]$;
- 5) удельное сопротивление контактной сети $R = 0,07$ Ом/км;
- 6) схема питания – двухсторонняя.

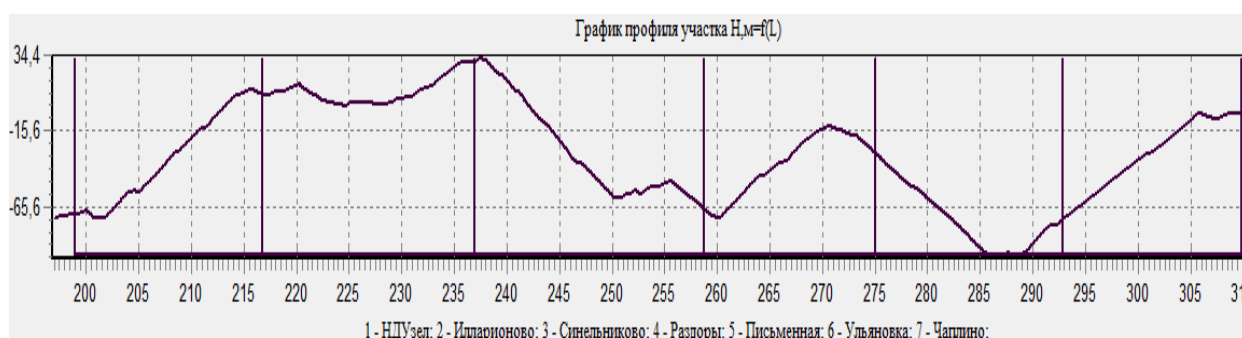


Рисунок 5.68 - График профиля участка Н.Д.-Узел-Чаплино

Потери мощности в контактной сети определялись по формуле:

$$\Delta P = \sum_i \Delta U(x_i) \cdot I(x_i), \quad (5.214)$$

$$\text{где } \Delta U(x) = \begin{cases} \Delta U_A(x) & \text{при } 0 \leq x \leq x_m \\ \Delta U_B(x) & \text{при } x_m \leq x \leq L_0. \end{cases}$$

Расчет потерь мощности в тяговой сети проводился в четном направлении для МЗ Н.Д.-Узел-Илларионов, в нечетном - для МЗ «Письменная-Раздоры», где имеет место подъем профиля пути, и данные МЗ можно рассматривать как «узкое место» всего направления (лимитирующего пропускную способность участка Н.Д.-Узел-Чаплино по условиям

электрооборудования). Расчетные данные для МЗ Н.Д.-Узел-Илларионово представлены в табл. 5.32, 5.33, а для МЗ Письменная-Раздоры в табл. 5.34, 5.35.

Таблица 5.32 - Потери мощности в тяговой сети для двух поездов на МЗ Н.Д.-Узел-Илларионово

Расстояние между поездами, км	Дислокация поездов, км		Мгновенное значение тока поезда, А		Мгновенные суммарные потери мощности в тяговой сети при данном расположении поездов, кВт
	1-й поезд	2-й поезд	1-й поезд	2-й поезд	
3	0,1	3,1	964	1 744	818
	2,1	5,1	1 751	1 657	1 712
	4,1	7,1	1 776	1 746	2 694
	6,1	9,1	1 708	1 645	2 862
	8,1	11,1	1 516	0	717
5	0,1	5,1	964	1 657	725
	2,1	7,1	1 751	1 746	1 860
	4,1	9,1	1 776	1 645	2 381
	6,1	11,1	1 708	0	824
7	0,1	7,1	964	1 746	938
	2,1	9,1	1 751	1 645	1 669
	4,1	11,1	1 776	0	699

Таблица 5.33 - Потери мощности в тяговой сети для трех поездов на МЗ Н.Д.-Узел-Илларионово

Расстояние между поездами, км	Дислокация поездов, км			Мгновенное значение тока поезда, А			Мгновенные суммарные потери мощности в тяговой сети при данном расположении поездов, кВт
	1-й поезд	2-й поезд	3-й поезд	1-й поезд	2-й поезд	3-й поезд	
3	0,1	3,1	6,1	964	1 744	1 708	2 266
	1,1	4,1	7,1	1 717	1 776	1 746	3 550
	2,1	5,1	8,1	1 751	1 657	1 516	3 844
	3,1	6,1	9,1	1 744	1 708	1 645	4 879
	4,1	7,1	10,1	1 776	1 746	1 701	5 649
	5,1	8,1	11,1	1 657	1 516	0	2 406
3,5	0,1	3,6	7,1	964	1 763	1 746	2 490
	1,1	4,6	8,1	1 717	1 779	1 516	3 214
	2,1	5,6	9,1	1 751	1 627	1 645	3 998
	3,1	6,6	10,1	1 744	1 756	1 701	4 965
	4,1	7,6	11,1	1 776	1 555	0	2 358
4	0,1	4,1	8,1	964	1 776	1 516	2 302
	1,1	5,1	9,1	1 717	1 657	1 645	3 259
	2,1	6,1	10,1	1 751	1 708	1 701	4 174

	3,1	7,1	11,1	1 744	1 746	0	2 264

Таблица 5.34 - Потери мощности в тяговой сети для двух поездов на МЗ
Письменная-Раздоры

Расстояние между поездами, км	Дислокация поездов, км		Мгновенное значение тока поезда, А		Мгновенные суммарные потери мощности в тяговой сети при данном расположении поездов, кВт
	1-й поезд	2-й поезд	1-й поезд	2-й поезд	
3	0,1	3,1	39	513	374
	2,1	5,1	423	1 768	976
	4,1	7,1	1 769	1 724	2 632
	6,1	9,1	1 565	1 921	3 091
	8,1	11,1	1 880	1 775	3 438
	10,1	13,1	1 635	1 524	2 310
	12,1	15,1	1 706	39	807
5	0,1	5,1	39	1 768	797
	2,1	7,1	423	1 724	1 040
	4,1	9,1	1 769	1 921	2 794
	6,1	11,1	1 565	1 775	2 502
	8,1	13,1	1 880	1 524	2 512
	10,1	15,1	1 635	39	832
	12,1	17,1	1 706	39	794
7	0,1	7,1	39	1 724	889
	2,1	9,1	423	1 921	1 289
	4,1	11,1	1 769	1 775	2 291
	6,1	13,1	1 565	1 524	1 788
	8,1	15,1	1 880	39	1 105
	10,1	17,1	1 635	39	821

По приведенным данным установлено, что минимальные потери для двух поездов на МЗ Н.Д.-Узел-Илларионово составляют 818 кВт, а максимальные 2 864 кВт, на МЗ «Письменная-Раздоры» минимальные потери для двух поездов 374 кВт, максимальные 3438 кВт.

Таблица 5.35 - Потери мощности в тяговой сети для трех поездов на МЗ
«Письменная-Раздоры»

Расстояние между поездами, км	Дислокация поездов, км			Мгновенное значение тока поезда, А			Мгновенные суммарные потери мощности в тяговой сети при данном расположении поездов, кВт
	1-й поезд	2-й поезд	3-й поезд	1-й поезд	2-й поезд	3-й поезд	
1	2	3	4	5	6	7	8
3	0,1	3,1	6,1	39	513	1565	964
	2,1	5,1	8,1	423	1768	1880	3 489
	4,1	7,1	10,1	1769	1724	1635	5 379
	6,1	9,1	12,1	1565	1921	1706	5 948

	8,1	11,1	14,1	1880	1775	0	3 438

Окончание табл.5.15

1	2	3	4	5	6	7	8
4	0,1	4,1	8,1	39	1769	1880	2 825
	2,1	6,1	10,1	423	1565	1635	2 689
	4,1	8,1	12,1	1769	1880	1706	5 332
	6,1	10,1	14,1	1565	1635	0	2 450
	8,1	12,1	16,1	1880	1706	0	3 046
5	0,1	5,1	10,1	39	1768	1635	2 508
	2,1	7,1	12,1	423	1724	1706	2 834
	4,1	9,1	14,1	1769	1921	0	2 794
	6,1	11,1	16,1	1565	1775	0	2 502

В приведенном примере вариация потерь мощности в зависимости от дислокации и расстояния между поездами составила - 3,5 раза на МЗ Н.Д.-Узел-Илларионово и почти 10 раз на МЗ Письменная-Раздоры.

Выводы к разделу 5

1. Анализ существующих регулировочных возможностей ТП показал, что используя регулировочные возможности и ПТ и ТТ, можно регулировать напряжение на шинах тяговых подстанций самым разнообразным шагом. Установлено, что количество уровней ЭДС, которое можно получить комбинациями положений переключателей ответвлений ПТ и ТТ, равно произведению количеств ступеней регулирования ПТ и ТТ.

2. Показано, что оптимальные коэффициенты трансформаторов, полученные по критерию удельных расходов, больше оптимальных коэффициентов трансформаторов, полученных по критерию КПД. Установлено, что оптимальный коэффициент загрузки трансформаторов обратно пропорционально зависит от стоимости 1 кВт·ч электроэнергии и от номинальной мощности трансформатора.

3. Впервые определены рациональные режимы системы электроснабжения тяги поездов постоянного тока на основе адаптированного генетического алгоритма. На его основе сформирован регламент переключений оборудования фидерного участка, в котором учитываются

возможности оплаты за электроэнергию по переменным во времени тарифам и надёжность силового оборудования.

4. Как показали исследования режимов напряжения на Приднепровской ж.д., при следовании сдвоенных грузовых поездов весом 10 000÷12 000 т напряжение в контактной сети в середине фидерной зоны понижалось до 2,2-2,4 кВ, что ниже норм ПТЭ. При следовании грузовых поездов на этой фидерной зоне весом 5 000 т и более с интервалом движения 15 мин. напряжение в контактной сети, в середине фидерной зоны, понижалось до 2,5 кВ, что также ниже норм ПТЭ. Для данного режима СТЭ предложено установить комплектную одноагрегатную тяговую подстанцию. Для частичного поднятия напряжения в середине фидерной зоны рекомендовано переключить анцапфы тяговых трансформаторов из первого положения во второе и откорректировать интервалы движения поездов в соответствии с ограничениями системы тягового электроснабжения.

5. Исследования зависимости величины потерь мощности в тяговой сети от дислокации поездов и расстояния между ними на участке показали, что имеется существенный резерв снижения потерь мощности в контактной сети за счёт выбора рациональной дислокации поездов. Установлено, что вариация потерь мощности в зависимости от дислокации и расстояния между поездами достигает 3,5 раза на МЗ Н.Д.-Узел-Илларионово и почти 10 раз на МЗ Письменная-Раздоры.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ

Повышение эффективности работы системы электроснабжения тяги поездов за счёт выбора энергосберегающих мероприятий на базе инвариантно-согласованного метода анализа иерархий (на примере Донецкой ж.д.)

С июня 2008 г. Донецкая железная дорога осуществляет поставку электрической энергии потребителям по регулируванному тарифу. Это стало возможным только после завершения первого этапа создания на железной дороге системы коммерческого учета электроэнергии. Для внедрения регулируемого тарифа была проведена метрологическая проверка цепей учета на границах балансового размежевания локальных сетей железных дорог с областными энергоснабжающими компаниями, подписаны акты балансового размежевания, создан центральный энергодиспетчерский аппарат.

Донецкая железная дорога, как поставщик электроэнергии, получила следующие преимущества:

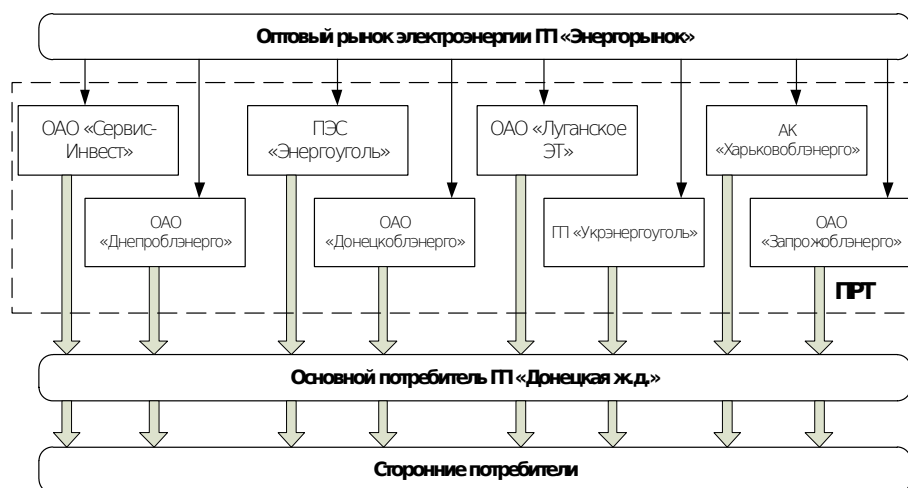
- 1) закупка электроэнергии по тарифам ОРЭ;
- 2) работа в четко определенном нормативно-правовом поле;
- 3) возможность осуществлять прибыльную лицензионную деятельность;
- 4) первоочередной пересмотр тарифов на передачу и поставку электроэнергии;
- 5) отсутствие платы за переток реактивной энергии;
- 6) получение компенсации за поставку электроэнергии населению;
- 7) эффективное нормативно-правовое стимулирование энергосбережения;
- 8) возможность применения разных тарифных моделей для закупки электроэнергии в зависимости от сформированной конъюнктуры рынка;

9) существенное улучшение состояния коммерческого учета электроэнергии.

До 01.06.2008 года Донецкая железная дорога являлась основным потребителем электроэнергии и закупала ее для себя и посторонних субпотребителей по розничным тарифам у восьми поставщиков (рис. 6.69). Начиная с указанной даты Донецкая железная дорога является поставщиком электрической энергии по регулированному тарифу [33]. Предприятие закупает электроэнергию на оптовом рынке и реализует ее по розничному тарифу железнодорожным и сторонним потребителям (рис. 6.70). В условиях ОРЭ перспективными являются такие комбинации внешнего и тягового электроснабжения, которые обеспечивают экономичную работу электрифицированных линий железных дорог на базе двусторонних договоров с элементами балансирующего рынка. Интегрированные системы управления электротяговыми системами должны обеспечивать передачу в центральный диспетчерский пункт данных о нагрузке и мощностях питающих сетей и тяговых подстанций, с помощью которых в реальном масштабе времени формируются получасовые (минутные) графики мощности.

Постановлением КМУ от 16.10.2008 года № 937 для Донецкой железной дороги определена задача реконструкции существующего вокзала Донецк. Подготовка хозяйства Донецкой железной дороги к проведению чемпионата ЕВРО-2012 проводилась по нескольким направлениям:

- а) реконструкция вокзального комплекса станции Донецк;
- б) модернизация тяговой подстанции Донецк;
- в) модернизация инфраструктуры железнодорожного участка Донецк – Лозовая с целью дальнейшей организации на нём скоростного движения пассажирских поездов;
- г) комплексная реконструкция инфраструктуры железнодорожного транспорта с переоборудованием станций, вокзалов, железнодорожных участков, технологий обслуживания пассажиров.



Область лицензированной деятельности поставщиков электроэнергии по регулирующему тарифу (ПРТ)

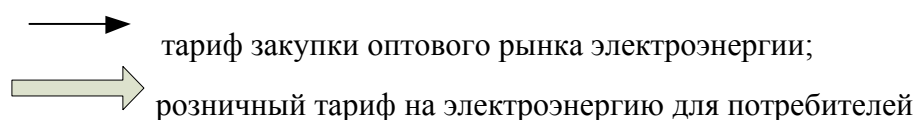
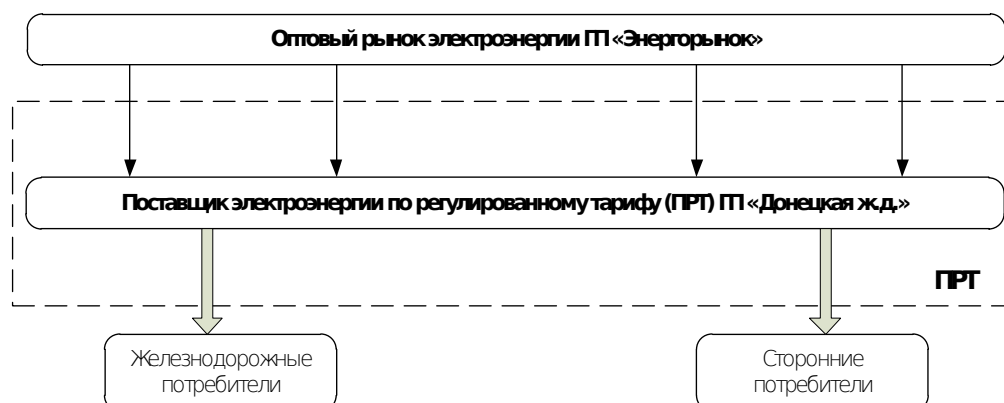


Рисунок 6.69 - Бывшая схема закупки электроэнергии Донецкой железной дороги как основного потребителя (до 01.06.2008 г.)



Территория лицензированной деятельности Донецкой железной дороги как поставщика электроэнергии по регулирующему тарифу

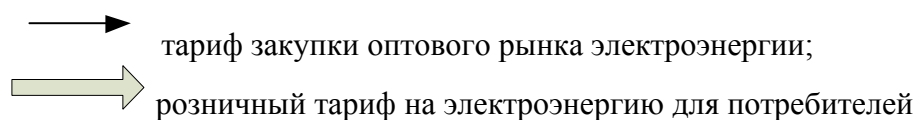


Рисунок 6.70 - Действующая схема закупки электроэнергии Донецкой железной дороги как основного потребителя (с 01.06.2008 г.)

В качестве одного из приоритетных направлений по подготовке к ЕВРО-2012 была определена модернизация тяговой подстанции Донецк постоянного тока. Поскольку реконструкция вокзала станции Донецк представляет собой создание целого вокзального комплекса с развитой

инфраструктурой торговли и социально-культурных объектов с непосредственным примыканием метро, которое создает дополнительные нетяговые нагрузки, то основной задачей при модернизации тяговой подстанции было увеличение её мощности. Целью как реконструкции вокзала, так и модернизации тяговой подстанции Донецк есть увеличение пропускной способности вокзала и перерабатывающей способности станции, оптимизация пассажирского и грузового движения, повышение качества обслуживания пассажиров, разделение пассажирских и пригородных пассажиропотоков, а также переход на закупку электроэнергии на тягу поездов со 2-го класса на 1-й [33, 315].

Тяговая подстанция Донецк является промежуточной подстанцией на отпайках 35/6/3,3 кВ. В эксплуатацию она была введена в 1963 году. Основное силовое оборудование находилось на этапе интенсивного износа.

Для решения поставленной задачи существовали следующие альтернативы:

1) A_1 - применение старой схемы трансформации 35/6/3,3 кВ на тягу поездов с увеличением мощности понижающих трансформаторов 35/6 кВ. Трансформатор ТД-16000/35/6 кВ заменяется на трансформатор ТД-25000/35/6 кВ;

2) A_2 - переход на новую схему трансформации 35/3,3 кВ. Такой переход будет осуществлен благодаря созданию перемычки между вводами № 1 и № 2 35 кВ. От перемычки через разъединитель РВ-35/1000 У1 и вакуумный выключатель ВР-35-20/630 У2 питание будет получать новый преобразовательный трансформатор типа ТРДП мощностью 12 500 кВА, который будет установлено вместо старого трансформатора типа ТМРУ мощностью 6200 кВА. Далее питание будут получать новые полупроводниковые выпрямители В-ТПЕД-3,15к-12П с двенадцатипульсовой схемой выпрямления, которые будут установлены вместо выпрямителей типа ПВА с шестипульсовой схемой выпрямления.

3) A_3 - замена ПВА с шестипульсовой схемой выпрямления на ПВА с двенадцатипульсовой схемой выпрямления с сохранением старой схемы трансформации;

4) A_4 - замена ПВА с шестипульсовой схемой выпрямления на ПВА с двенадцатипульсовой схемой выпрямления с переходом на новую схему трансформации;

5) A_5 - замена преобразовательного трансформатора с сохранением старой схемы трансформации;

6) A_6 - замена масляных выключателей на вакуумные (выключатели типа С-35 - на ВР-35, ВМПЕ-10 – на ВР-2, ВМГ-10 – на ВВ/ТЕЛ);

7) A_7 - замена быстродействующих выключателей постоянного тока (выключатели АБ 2/4 - на выключатели ВАБ-206);

8) A_8 - установка вольтодобавочного устройства;

9) A_9 - замена счётчиков электроэнергии на микропроцессорные;

10) A_{10} - замена ламп на светодиоды;

11) A_{11} - восстановление изоляционных свойств кабелей;

12) A_{12} - замена фильтро-компенсирующих устройств.

Анализ, проведенный с помощью ИС МАИ показал, что альтернативы A_1 и A_2 имеют самый высокий приоритет.

В зависимости от схем внешнего электроснабжения и конструктивных особенностей тяговых подстанций на Донецкой железной дороге существует несколько схем преобразования электроэнергии:

1) 110/10/3,3 кВ;

2) 35/6(10)/3,3 кВ;

3) 35/3,3 кВ;

4) 10(6)/3,3 кВ.

Поскольку границей реализации электроэнергии на тягу поездов выступают тяговые трансформаторы, то при схеме преобразования 35/3,3 кВ электроэнергия реализуется по тарифу 1-го класса, а при всех других схемах

– по 2-му классу. Приобретение электроэнергии по 1-му классу позволяет экономить значительную сумму средств. Таким образом, из двух возможных вариантов модернизации подстанции предлагается именно второй.

В табл. 6.36 приведен расчеты экономии средств при переходе на снабжение электроэнергией 1 класса для потребностей электротяги [315].

Таблица 6.36 - Расчеты экономии средств при переходе на снабжение электроэнергией 1-го класса для потребностей электротяги поездов на ТП-Донецк по розничным тарифам и объемами электроэнергии за 2009 г.

Месяц	Объем реализации, кВт·ч	Тариф 2-го класса, грн./кВт·ч	Стоимость 2-го класса, тыс. грн	Тариф 1-го класса, грн./кВт·ч	Стоимость 1-го класса тыс. грн	Разность, тыс. грн
январь	1206453	0,5846	705,292	0,4359	525,893	179,400
февраль	1221600	0,5846	714,147	0,4359	532,495	181,652
март	1453680	0,5846	849,821	0,4359	633,659	216,162
апрель	1419720	0,5846	829,968	0,4359	618,856	211,112
май	1923720	0,5846	1124,607	0,4359	838,550	286,057
июнь	1828800	0,5846	1069,116	0,4359	797,174	271,943
июль	1831920	0,5846	1070,940	0,4359	798,534	272,407
август	2110440	0,5846	1233,763	0,4359	919,941	313,822
сентябрь	2136720	0,5846	1249,127	0,4359	931,396	317,730
октябрь	1951601	0,5846	1140,906	0,4359	850,703	290,203
ноябрь	1531879	0,6068	929,544	0,4572	700,375	229,169
декабрь	1787400	0,6130	1095,676	0,4617	825,243	270,434
Всего	20403933		12012,909		8972,818	3040,091

Более детальные расчёты приведены в приложении В.

Технология определения норм расхода электроэнергии для стационарных потребителей железных дорог

Общее количество электроэнергии, которое перерабатывается устройствами электроснабжения железных дорог, содержит в себе:

- электроэнергию, которая расходуется на тягу поездов;
- электроэнергию, которая отпускается сторонним потребителям (не связанным с железнодорожным транспортом);
- электроэнергию, которая потребляется стационарными объектами железнодорожного транспорта.

Потребление электроэнергии стационарными объектами содержит в себе электроэнергию на эксплуатационные нужды железных дорог. Сюда относятся расходы электроэнергии на основные и вспомогательные

технологические процессы, а также вспомогательные нужды производства (общепроизводственное цеховое и деповское потребление на освещение, вентиляцию, отопление и др.), а также технологические потери энергии в электросетях. Суммарное потребление электроэнергии на эксплуатацию железных дорог представляет собой общее потребление электроэнергии по сети железных дорог на основную работу. Плановые объёмы электроэнергии, необходимые для обеспечения работы стационарных потребителей в целом по сети железных дорог, определяют по формуле, кВт·ч

$$W_c = \omega_c n_{cp} = \sum_{i=1}^{n_d} W_{di}, \quad (6.215)$$

где ω_c - норма расхода электроэнергии для стационарных потребителей на основную работу железных дорог, кВт · ч/10⁴ тк·м брутто;

n_{cp} - годовой объём основной работы железных дорог, 10⁴ тк·м брутто;

n_d - количество железных дорог;

W_{di} - расход электроэнергии по норме для стационарных потребителей на основную работу i -й железной дороги, кВт · ч/год.

По аналогичным формулам выполняют расчёты плановых объёмов электроэнергии для стационарных потребителей для железных дорог, для отдельных служб.

До недавнего времени удельные нормы расходов электроэнергии для стационарных потребителей определялись по устаревшим инструкциям. Это отмечалось в первом разделе диссертации. Старые инструкции не учитывали много структурных и технических изменений в стационарных потребителях. Так, при нормировании расходов электроэнергии для пассажирской службы учитывались лишь вокзалы и не принимались во внимание пассажирские вагонные депо, пункты технического обслуживания. При нормировании расходов электроэнергии для службы пути учитывались лишь дистанции пути. В нормативных документах, которые использовались во время СССР,

при планировании расходов электроэнергии на эксплуатационные нужды использовались эмпирические формулы, учитывающие географическую широту. Для железных дорог Украины в этом нет необходимости, т.к. все железные дороги Украины расположены от 48° до 52° географической широты (табл. 6.37). Также за годы независимости коренным образом изменился характер сезонности работы железных дорог в целом.

Таблица 6.37 - Географическое положение железных дорог Украины

Железная дорога	Географическая широта, градусы	Средняя температура за отапливаемый период, градусы
Донецкая	48-49	-0,7...-1,7
Львовская	48-50	+0,5...-0,6
Одесская	46-50	+1,5...-1,1
Приднепровская	44-49	+1,2...-1,2
Юго-Западная	48-52	-0,3...-2,1
Южная	49-51	-2,1...-2,5

Поэтому, на наш взгляд, принципами, на которых должна строиться система нормирования расходов электроэнергии для стационарных потребителей, могут быть следующие:

- расчёт норм расхода электроэнергии по укрупненным показателям;
- учёт характера сезонности работы стационарных потребителей;
- учёт климатических условий работы железных дорог;
- учёт энергетической оснащённости предприятий железнодорожного транспорта;
- учёт объёмов перевозочной работы железными дорогами;
- учёт потенциального уровня научно-технического прогресса.

В соответствии с вышеизложенным введём коэффициент сезонности k_c , который будет характеризовать сезонность работы различных стационарных потребителей железнодорожного транспорта, железные дороги и Укрзализницю в целом. Численное значение коэффициента сезонности определим по следующей формуле:

$$k_c = \frac{W_i}{W_{cp}}, \quad (6.216)$$

где W_i - объём потребления электроэнергии на нужды стационарных потребителей в i -м месяце,

$W_{\text{ср}}$ - среднегодовой объём потребления электроэнергии стационарными потребителями.

Воздействие уровня технической оснащённости стационарных потребителей на изменение удельного расхода электроэнергии будем учитывать коэффициентом технической оснащённости k_m . Данный коэффициент на железнодорожном транспорте обычно рассчитывают по эмпирическим формулам. В общем случае

$$k_m = f(E_x, m_x), \quad (6.217)$$

где E_x и m_x - соответственно средняя электрооснащённость работы, кВт · ч / чел · ч, и удельные затраты труда, чел · ч / 10^4 т · км брутто, при рассматриваемом уровне технической оснащённости объектов железной дороги.

Среднюю электрооснащённость работы потребителей железной дороги при уровне технической оснащённости, которая рассматривается, можно определить по следующей формуле кВт · ч / чел · ч,

$$E_x = \frac{\sum_{j=1}^{n_c} W_{c j}}{n_{1d} n_2}, \quad (6.218)$$

где n_c - количество потребителей железной дороги - участников выполнения основной (перевозочной) работы железной дороги;

$W_{c j}$ - годовой расход электроэнергии по норме для j -го потребителя железной дороги, который принимал участие в выполнении основной работы, кВт · ч;

n_{1d} - количество работников, которые заняты основной производственной деятельностью железной дороги без учета работников локомотивных бригад, проводников; работников тяговых подстанций,

лечебных и санитарно-врачебных учреждений, учебных заведений, общеобразовательных школ, детских заведений и предприятий, которые относятся к другим производственным потребителям;

n_2 - количество рабочих часов в году, ч.

Если расчеты расходов электроэнергии по норме для каждой службы на год, который планируется, вызывает определенные трудности, то коэффициент электрооснащенности (E_x) и удельные затраты труда (m_x) можно определить методом экстраполяции данных.

Учёт климатических условий работы различных железных дорог производится с помощью температурного коэффициента k_{zd} .

Для построения регрессионных зависимостей для расчёта норм расхода электроэнергии для стационарных потребителей железных дорог Украины в рамках выполнения научно-исследовательской работы [86] были проанализированы данные отчётных форм ЭО-1 за 2000-2006 гг., исследован характер сезонности потребления электроэнергии стационарными потребителями, определены коэффициенты сезонности, коэффициенты регрессий по каждой службе, по железным дорогам и в целом по Укрзализныце. Ниже приведен анализ потребления электроэнергии стационарными потребителями железных дорог Украины за 2006 г. (рис. 6.71-рис. 6.79 и табл. 6.38-табл. 6.55).

Таблица 6.38 - Расход электроэнергии потребителями служб перевозок W , тыс. кВт·ч

Железная дорога	Месяц													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	За год	W _{ср}
Приднеп- ровская	5308,8	5063	4964,7	3376,9	2369,1	1893,1	1973,6	2162,1	2363,8	3333,8	4365,9	5367,9	42542,7	3545,23
Донецкая	5713	5173	4388	3659	2785	2280	2352	2520	2912	3806	4786	5284	45658	3804,83
Южная	4941	4432	4158,5	2967,1	2225	1897,2	1794,2	1915,1	2427,4	3289,4	4310,1	5169,7	39526,7	3293,89
Юго – Западная	4690,9	4628,8	4215,5	3264,7	2242,4	1785,6	1723,7	1981,1	2147,4	2854,2	3998,9	4627,1	38160,3	3180,03
Одесская	3478,6	3438,7	2981,3	2450,2	1656,4	1362,5	1337,1	1504,5	1619,6	1979,8	2800	3230,9	27839,6	2319,97
Львовская	3028,5	2978,1	2765,1	2137,5	1484,2	1222,8	1144	1121	1220,5	1668,3	2496,8	3093,4	24360,2	2030,02

Таблица 6.39 - Коэффициенты сезонности потребителей служб перевозок K_c

Железная дорога	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Приднепро вская	1,50	1,43	1,40	0,95	0,67	0,53	0,56	0,61	0,67	0,94	1,23	1,51
Донецкая	1,50	1,36	1,15	0,96	0,73	0,60	0,62	0,66	0,77	1,00	1,26	1,39
Южная	1,50	1,35	1,26	0,90	0,68	0,58	0,54	0,58	0,74	1,00	1,31	1,57
Юго – Западная	1,48	1,46	1,33	1,03	0,71	0,56	0,54	0,62	0,68	0,90	1,26	1,46
Одесская	1,50	1,48	1,29	1,06	0,71	0,59	0,58	0,65	0,70	0,85	1,21	1,39
Львовская	1,49	1,47	1,36	1,05	0,73	0,60	0,56	0,55	0,60	0,82	1,23	1,52

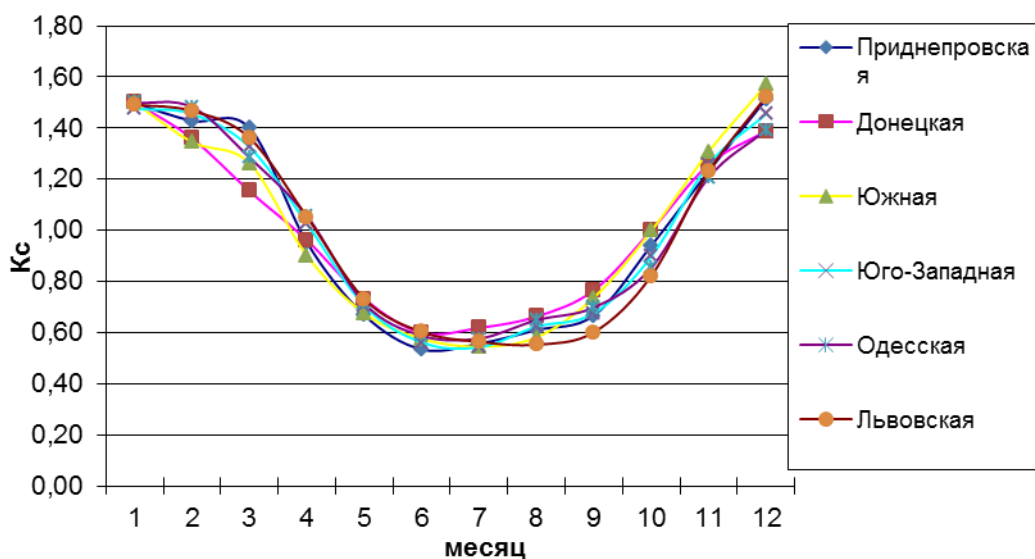


Рисунок 6.71 - Коэффициенты сезонности для служб перевозок железных дорог Украины

Таблица 6.40 - Расход электроэнергии потребителями локомотивных служб W , тыс. кВт·ч

Железная дорога	Месяц												всего	W_{cp}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Приднепро вская	1726,9	1779,3	1773,4	1299,4	936,7	778,5	798,7	799,2	854,5	1236,3	1652	1793,9	15428,8	1285,73
Донецкая	2157	2303	1896	1617	1633	882	808	843	849	1306	1840	2177	18311	1525,92
Южная	1218,8	1468,8	1261,4	1049,5	886	816,9	786,2	773,1	814,8	939,5	1236,9	1363,2	12615,1	1051,26
Юго – Западная	1716	1765	1519,2	1392,5	972,7	1073,8	898,6	949,5	910	1204,9	1728,6	1687,3	15818,1	1318,18
Одесская	1281	1352,2	1290,6	1056,1	731,5	600,5	628,4	613,5	664,9	759,4	1157,6	1306,6	11442,3	953,53
Львовская	699,6	737,5	674,1	559,9	482,5	401,9	357,8	360,8	330,6	444,3	565,8	682,8	6297,6	524,80

Таблица 6.41 - Коэффициенты сезонности для служб локомотивных хозяйств K_c

Железная дорога	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Приднепровская	1,34	1,38	1,38	1,01	0,73	0,61	0,62	0,62	0,66	0,96	1,28	1,40
Донецкая	1,41	1,51	1,24	1,06	1,07	0,58	0,53	0,55	0,56	0,86	1,21	1,43
Южная	1,16	1,40	1,20	1,00	0,84	0,78	0,75	0,74	0,78	0,89	1,18	1,30
Юго – Западная	1,30	1,34	1,15	1,06	0,74	0,81	0,68	0,72	0,69	0,91	1,31	1,28
Одесская	1,34	1,42	1,35	1,11	0,77	0,63	0,66	0,64	0,70	0,80	1,21	1,37
Львовская	1,33	1,41	1,28	1,07	0,92	0,77	0,68	0,69	0,63	0,85	1,08	1,30

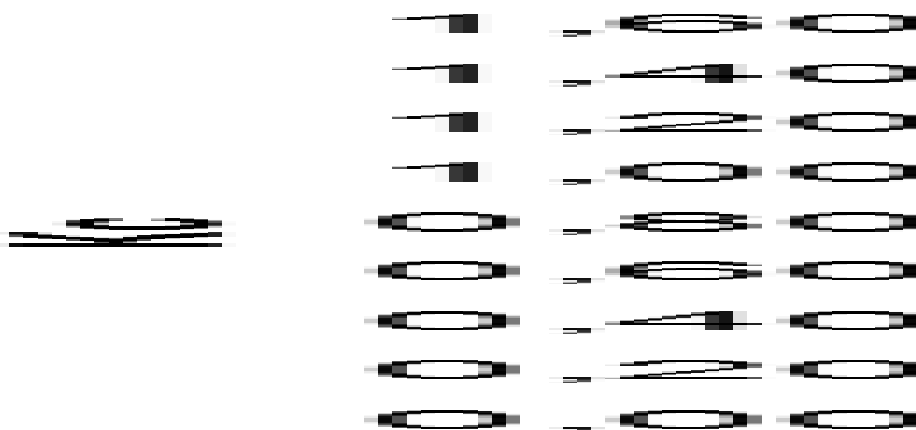


Рисунок 6.72 - Коэффициенты сезонности для служб локомотивного хозяйства

Таблица 6.42 - Расход электроэнергии потребителями служб вагонов и вагонного хозяйства W , тыс. кВт·ч

Железная дорога	Месяц													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	всего	W _{ср}
Приднепро вская	2166,7	2521,3	2408,1	1839,7	1457,2	1376,4	1373,6	1369,7	1348,5	1730,3	2351,4	2354,2	22297,1	1858,09
Донецкая	3102	2746	2601	2256	1856	1665	1672	1558	1743	2167	2707	2973	27046	2253,83
Южная	1109,3	1164,8	1164,8	1050,3	884,3	874,7	691	779	731,8	737	1126,2	1300,5	11613,7	967,81
Юго – Западная	892,4	1019,2	867,8	757,2	632,6	541,6	527,4	542,4	530,3	694	894,4	1001,7	8901	741,75
Одесская	680,2	802,6	695	661,6	495,6	499,8	456,1	444,5	463,8	511,5	654,7	700,6	7066	588,83
Львовская	369	411,8	435,1	409,8	349,1	325,9	330,5	327,1	300,1	324,1	350,3	356,1	4288,9	357,41

Таблица 6.43 - Коэффициенты сезонности для служб вагонов и вагонного хозяйства K_c

Железная дорога	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Приднепровская	1,17	1,36	1,30	0,99	0,78	0,74	0,74	0,74	0,73	0,93	1,27	1,27
Донецкая	1,38	1,22	1,15	1,00	0,82	0,74	0,74	0,69	0,77	0,96	1,20	1,32
Южная	1,15	1,20	1,20	1,09	0,91	0,90	0,71	0,80	0,76	0,76	1,16	1,34
Юго – Западная	1,20	1,37	1,17	1,02	0,85	0,73	0,71	0,73	0,71	0,94	1,21	1,35
Одесская	1,16	1,36	1,18	1,12	0,84	0,85	0,77	0,75	0,79	0,87	1,11	1,19
Львовская	1,03	1,15	1,22	1,15	0,98	0,91	0,92	0,92	0,84	0,91	0,98	1,00

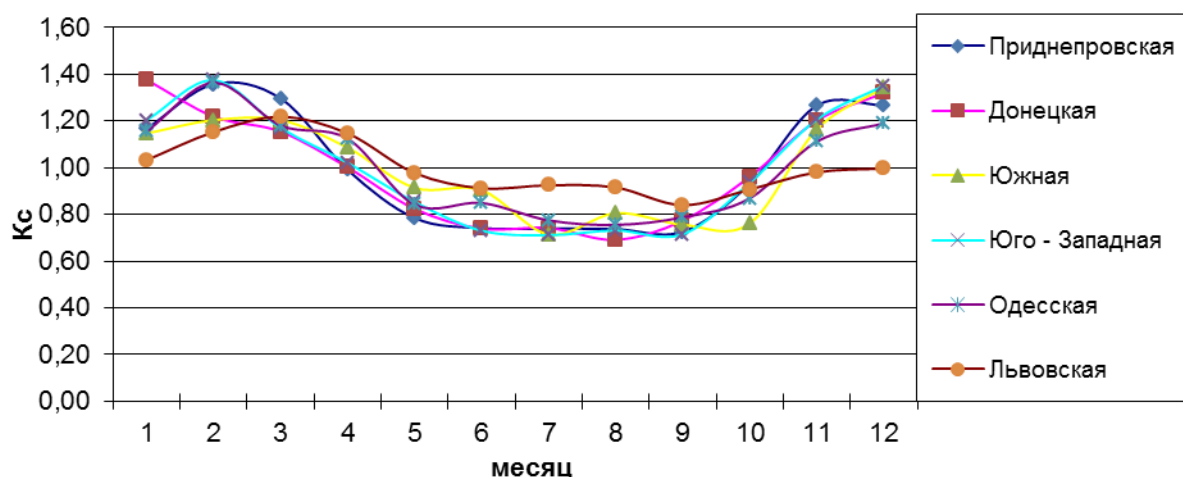


Рисунок 6.73 - Коэффициенты сезонности для служб вагонов и вагонного хозяйства

Таблица 6.44 - Расход электроэнергии потребителями служб пути и путевого хозяйства W , тыс. кВт·ч

Железная дорога	Месяц												всего	W_{cp}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Приднепровская	2060,3	2213,3	1997,3	1442,3	1027	859,3	905,7	963,6	1007,7	1377,3	1739,6	2063	17656,4	1471,37
Донецкая	2320	2183	1899	1555	1093	880	981	962	1093	1582	1820	2168	18536	1544,67
Южная	607,3	645,8	557,7	402	538,4	254,1	324,5	265,5	90,3	482,3	520,5	730,4	5418,8	451,57
Юго – Западная	1818,1	1992,5	2019	1441,1	1076,3	979,9	865,1	924,6	962,5	1272,4	1725,5	2387,5	17464,5	1455,38
Одесская	1876,3	1924,9	1802,3	1578,2	1235,4	1126,9	1099,6	1180,7	1217,9	1469,7	1856,2	1954,7	18322,8	1526,90
Львовская	1729,6	1805,2	1688,8	1481,5	1213	1276	1147,4	1255,2	1311,7	1414,1	1701,5	1881,6	17905,6	1492,13

Таблица 6.45 - Коэффициенты сезонности служб пути и путевого хозяйства K_c

Железная дорога	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Приднепро- вская	1,40	1,50	1,36	0,98	0,70	0,58	0,62	0,65	0,68	0,94	1,18	1,40
Донецкая	1,50	1,41	1,23	1,01	0,71	0,57	0,64	0,62	0,71	1,02	1,18	1,40
Южная	1,34	1,43	1,24	0,89	1,19	0,56	0,72	0,59	0,20	1,07	1,15	1,62
Юго – Западная	1,25	1,37	1,39	0,99	0,74	0,67	0,59	0,64	0,66	0,87	1,19	1,64
Одесская	1,23	1,26	1,18	1,03	0,81	0,74	0,72	0,77	0,80	0,96	1,22	1,28
Львовская	1,16	1,21	1,13	0,99	0,81	0,86	0,77	0,84	0,88	0,95	1,14	1,26

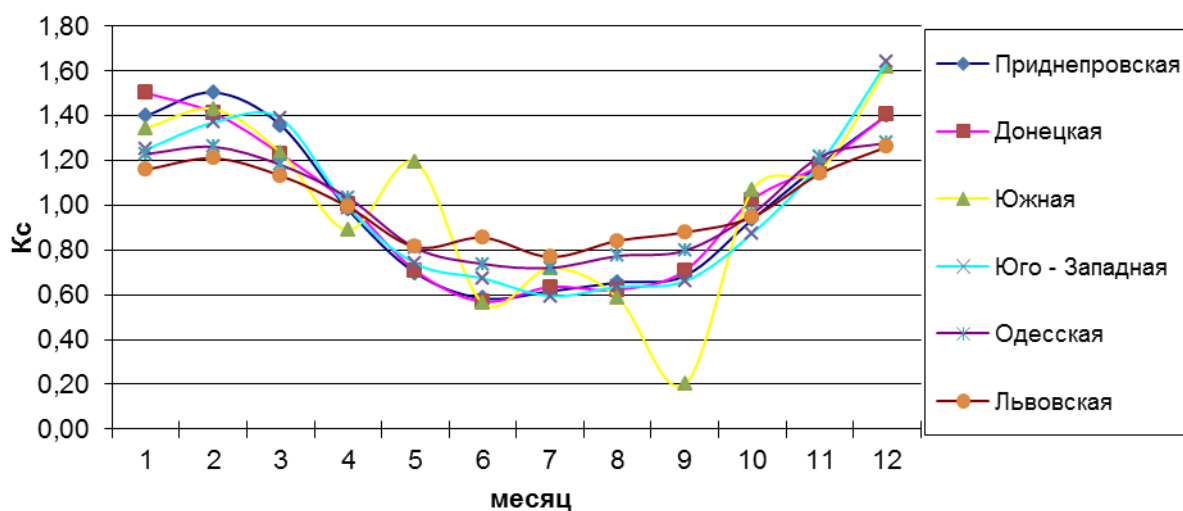


Рисунок 6.74 - Коэффициенты сезонности служб пути и путевого хозяйства

Таблица 6.46 - Расход электроэнергии стационарными потребителями служб электроснабжения W , тыс. кВт·ч

Железная дорога	Месяц												всего	W_{cp}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Приднепро- вская	3047,4	2990	2965,7	1692,6	1150,6	984,3	1213,5	1133,5	1084,7	1522	2466,4	2878	23128,7	1927,39
Донецкая	4814	4532	3978	2336	1386	1058	1174	1389	1508	3333	3999	5644	35151	2929,25
Южная	2720	393,7	311,3	1054,8	1123	1327,4	1473,5	1521,7	1559,3	2098,2	3132,6	3808,2	20523,7	1710,31
Юго – Западная	905,4	941,5	831,8	581	301,3	252,7	268,7	247,5	263,4	545,5	654,1	898,8	6691,7	557,64
Одесская	1631,5	1538,5	1211,3	676,3	348,7	290,7	293,5	306,1	364,5	562,6	995,6	1427,1	9646,4	803,87
Львовская	1878,4	1838,1	1562,2	1102,2	700,9	679,2	577,8	610,5	617,9	1017	1547,7	1604,3	13736,2	1144,68

Таблица 6.47 - Коэффициенты сезонности для стационарных потребителей служб электроснабжения K_c

Железная дорога	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Приднепровская	1,58	1,55	1,54	0,88	0,60	0,51	0,63	0,59	0,56	0,79	1,28	1,49
Донецкая	1,64	1,55	1,36	0,80	0,47	0,36	0,40	0,47	0,51	1,14	1,37	1,93
Южная	1,59	0,23	0,18	0,62	0,66	0,78	0,86	0,89	0,91	1,23	1,83	2,23
Юго – Западная	1,62	1,69	1,49	1,04	0,54	0,45	0,48	0,44	0,47	0,98	1,17	1,61
Одесская	2,03	1,91	1,51	0,84	0,43	0,36	0,37	0,38	0,45	0,70	1,24	1,78
Львовская	1,64	1,61	1,36	0,96	0,61	0,59	0,50	0,53	0,54	0,89	1,35	1,40

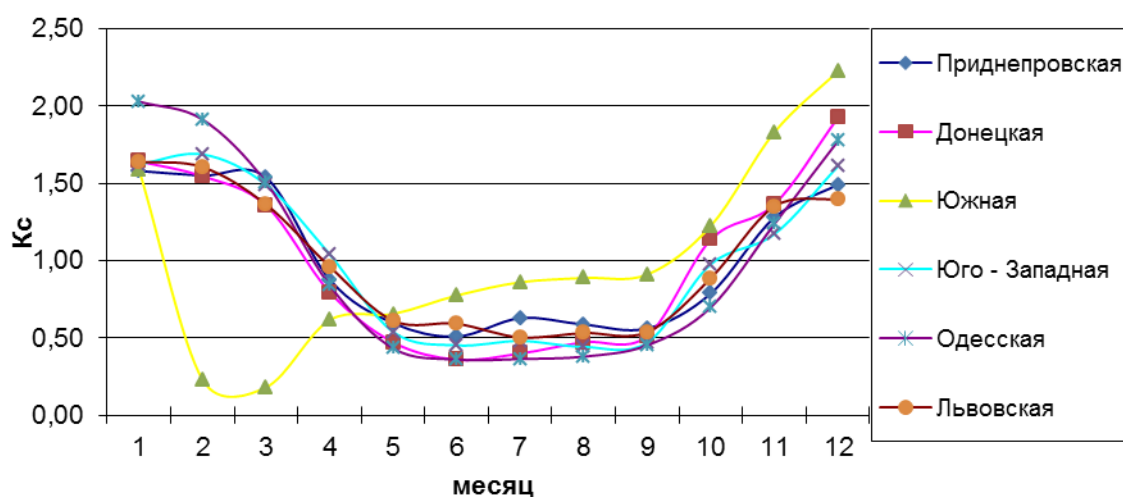


Рисунок 6.75 - Коэффициенты сезонности для служб электроснабжения

Таблица 6.48 - Расход электроэнергии потребителями службы сигнализации и связи W , тыс. кВт·ч

Железная дорога	Месяц												всего	W_{cp}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Приднепровская	2666	2598,2	2698,2	2153,4	1888,5	1734,3	1752,5	1772,2	1805,6	2071,4	2491,4	2625,1	26256,8	2188,07
Донецкая	3798	3768	3294	3197	3023	2896	2902	2936	2877	3210	3598	3795	39294	3274,50
Южная	1614,8	1503,2	1488,8	1236,9	1242,8	1185,1	1112,5	1103,8	1132	1283,2	1421,3	1593,6	15918	1326,50
Юго – Западная	2499,3	2716,7	2443,6	2108,7	1817,2	1816	1732,5	1755,8	1787,8	1872,2	2405	2552,8	25507,6	2125,63
Одесская	2597,2	2638,7	2470,1	2274,9	1955,5	1907,5	1886,8	1898,9	1948,3	2009,2	2320	2462,1	26369,2	2197,43
Львовская	1633,5	1559,5	1538,3	1515,8	1356,3	1294,5	1317,8	1297,6	1260,7	1353,1	1493,2	1567,3	17187,6	1432,30

Таблица 6.49 - Коэффициенты сезонности для служб сигнализации и связи K_c

Железная дорога	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Приднепровская	1,22	1,19	1,23	0,98	0,86	0,79	0,80	0,81	0,83	0,95	1,14	1,20
Донецкая	1,16	1,15	1,01	0,98	0,92	0,88	0,89	0,90	0,88	0,98	1,10	1,16
Южная	1,22	1,13	1,12	0,93	0,94	0,89	0,84	0,83	0,85	0,97	1,07	1,20
Юго – Западная	1,18	1,28	1,15	0,99	0,85	0,85	0,82	0,83	0,84	0,88	1,13	1,20
Одесская	2,03	1,91	1,51	0,84	0,43	0,36	0,37	0,38	0,45	0,70	1,24	1,78
Львовская	1,64	1,61	1,36	0,96	0,61	0,59	0,50	0,53	0,54	0,89	1,35	1,40

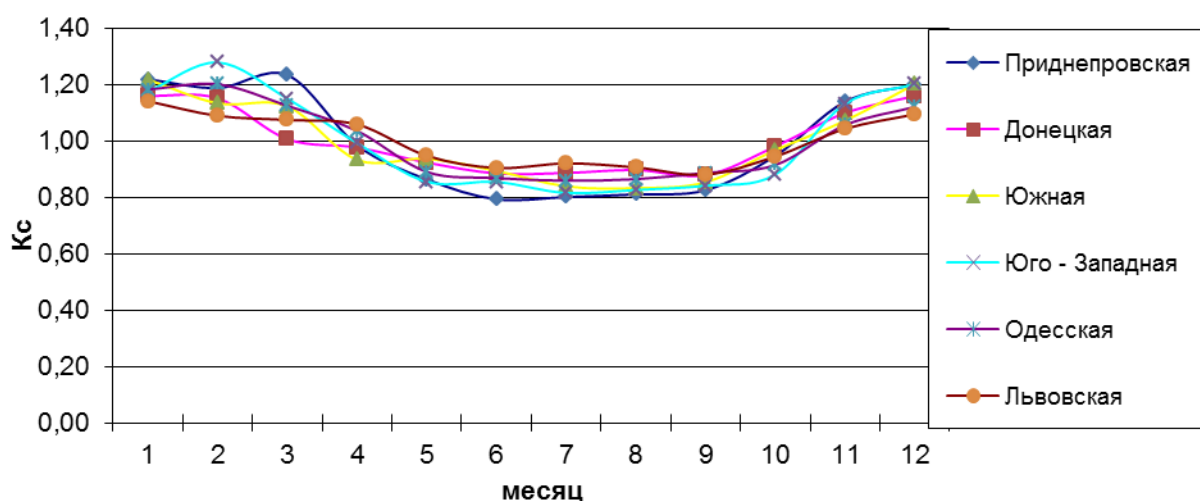


Рисунок 6.76 - Коэффициенты сезонности для служб сигнализации и связи

Таблица 6.50 - Расход электроэнергии потребителей пассажирских служб W , тыс. кВт·ч

Железная дорога	Месяц												всего	W_{cp}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Приднепровская	5252,1	5548,2	5377,8	2926,1	1712,1	1554	1698,4	1821,2	1813	2939,6	4527,8	5271,2	40441,5	3370,13
Донецкая	1608	1712	1535	936	569	524	484	546	515	757	1178	1540	11904	992,00
Южная	2009,6	2037	2095	1004,9	350,7	317,9	344,3	310	800,3	638,7	593,9	2660,8	13163,1	1096,93
Юго – Западная	4845,9	4295,8	4036,2	2157,3	846,2	878,4	1130,3	1172,2	1203,2	1704,7	3928,4	4795,6	30994,2	2582,85
Одесская	1851,4	1922	1957,5	794,2	670,6	585,7	625,7	634	646,9	816,9	1715,7	1996,2	14216,8	1184,73
Львовская	1248,9	1369,8	1120,4	709,2	600,8	596	581,3	559,6	546,5	672,6	1007,3	1204	10216,4	851,37

Таблица 6.51 - Коэффициенты сезонности для пассажирских служб K_c

Железная дорога	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Приднепровская	1,56	1,65	1,60	0,87	0,51	0,46	0,50	0,54	0,54	0,87	1,34	1,56
Донецкая	1,62	1,73	1,55	0,94	0,57	0,53	0,49	0,55	0,52	0,76	1,19	1,55
Южная	1,83	1,86	1,91	0,92	0,32	0,29	0,31	0,28	0,73	0,58	0,54	2,43
Юго – Западная	1,88	1,66	1,56	0,84	0,33	0,34	0,44	0,45	0,47	0,66	1,52	1,86
Одесская	1,56	1,62	1,65	0,67	0,57	0,49	0,53	0,54	0,55	0,69	1,45	1,68
Львовская	1,47	1,61	1,32	0,83	0,71	0,70	0,68	0,66	0,64	0,79	1,18	1,41

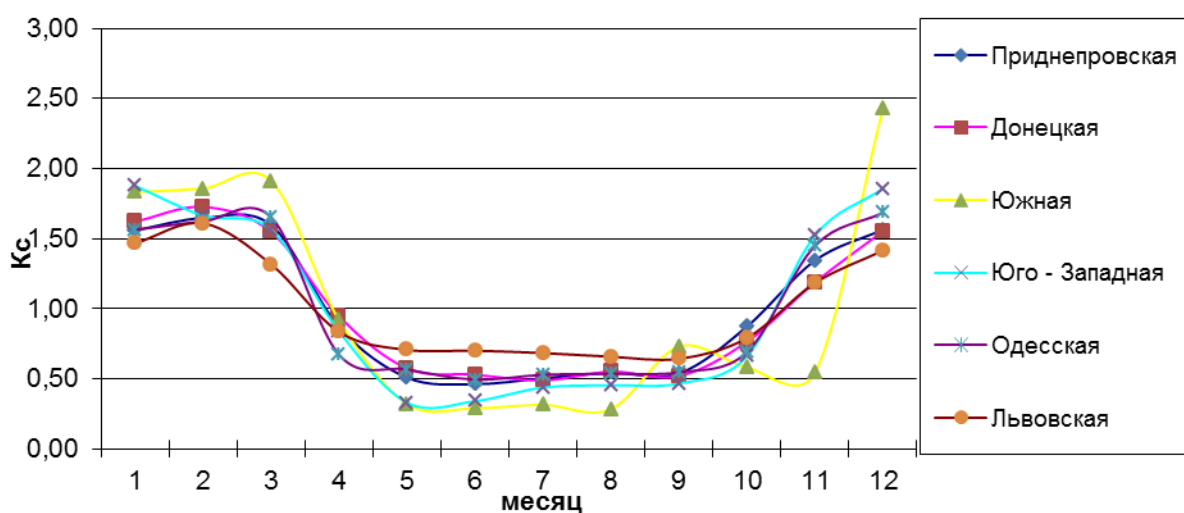


Рисунок 6.77 - Коэффициенты сезонности для пассажирских служб

Таблица 6.52 - Расход электроэнергии потребителями служб маркетинга и коммерческой работы W , тыс. кВт·ч

Железная дорога	Месяц												всего	W_{cp}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Приднепровская	1142	1149	1018,4	779,1	579,5	431,5	431,2	456,9	507,4	715,2	1008	1180,8	9399	783,25
Донецкая	81	71	70	49	29	27	39	12	19	24	44	41	506	42,17
Южная	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Юго – Западная	65,5	139,6	81,6	57,6	53,2	37,7	0,7	35,9	48,7	55,7	88,7	101,1	766	63,83
Одесская	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Львовская	35,8	35,1	53	25,6	18,3	17,1	16,2	15,9	10,9	18,9	26,1	28,7	301,6	25,13

Таблица 6.53 - Коэффициенты сезонности для служб маркетинга и коммерческой работы K_c

Железная дорога	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Приднепровская	1,46	1,47	1,30	0,99	0,74	0,55	0,55	0,58	0,65	0,91	1,29	1,51
Донецкая	1,92	1,68	1,66	1,16	0,69	0,64	0,92	0,28	0,45	0,57	1,04	0,97
Южная	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Юго – Западная	1,03	2,19	1,28	0,90	0,83	0,59	0,01	0,56	0,76	0,87	1,39	1,58
Одесская	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Львовская	1,42	1,40	2,11	1,02	0,73	0,68	0,64	0,63	0,43	0,75	1,04	1,14

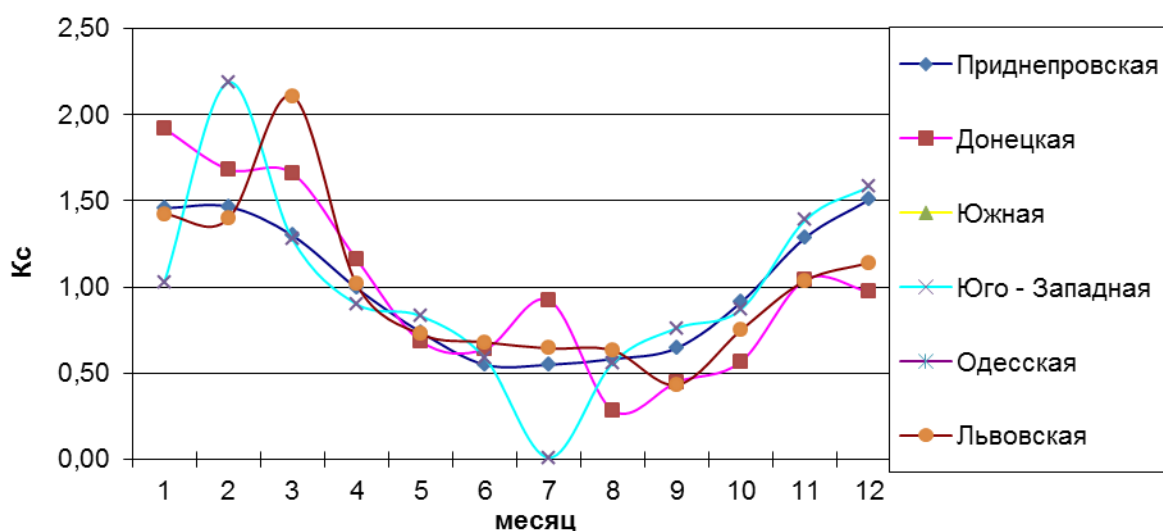


Рисунок 6.78 - Коэффициенты сезонности для служб маркетинга и коммерческой работы

Для сети железных дорог (в целом для Укрзализныци) коэффициенты сезонности получены следующим образом. Сначала получены средние коэффициенты сезонности для каждой железной дороги, а потом был рассчитан средний коэффициент сезонности для Укрзализныци.

Таблица 6.54 - Коэффициент сезонности для Укрзализныци

Служба	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Перевозок	1,49	1,41	1,29	0,98	0,70	0,57	0,57	0,62	0,70	0,93	1,25	1,47
Локомотивная	1,32	1,41	1,26	1,05	0,85	0,68	0,64	0,65	0,66	0,88	1,23	1,35
Вагонная	1,23	1,28	1,21	1,03	0,84	0,78	0,75	0,74	0,76	0,91	1,19	1,28

Пути	1,31	1,36	1,25	0,99	0,78	0,68	0,67	0,70	0,72	0,96	1,18	1,41
Э	1,65	1,35	1,20	0,82	0,55	0,51	0,55	0,57	0,59	1,00	1,41	1,79
Ш	1,18	1,18	1,11	1,00	0,90	0,86	0,85	0,86	0,86	0,94	1,09	1,16
Пассажирская	1,67	1,68	1,60	0,85	0,47	0,44	0,48	0,50	0,55	0,75	1,29	1,73
Коммерческая	1,45	1,53	1,34	1,00	0,74	0,56	0,53	0,57	0,64	0,89	1,28	1,48
По Укрзалинці	1,42	1,38	1,28	0,96	0,72	0,64	0,64	0,66	0,70	0,91	1,23	1,46

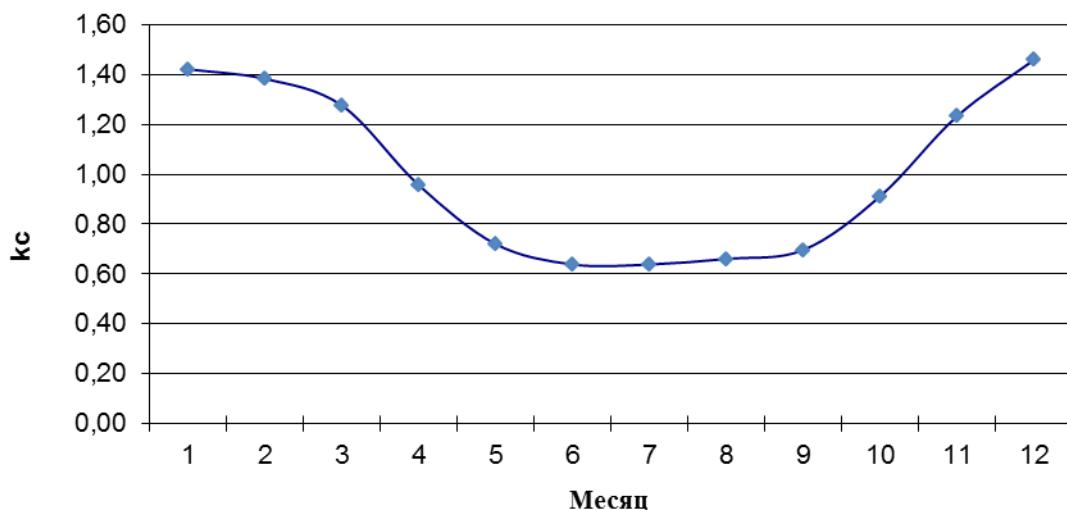


Рисунок 6.79 - Коэффициент сезонности для стационарных потребителей
Укрзализныці

Будем идентифицировать уравнение регрессии, связывающее перевозную работу железных дорог и норму потребления электроэнергии для стационарных потребителей в следующем виде, кВт · ч / 10⁴ т · км брутто,

$$\omega_d = k_{md} k_{cd} k_{zd} (A_d - B_d \cdot n_{dp}) = \frac{\sum_{j=1}^{n_c} W_{cj}}{n_{dp}}, \quad (6.219)$$

где k_{md} - коэффициент, который учитывает воздействие уровня технической оснащенности всех объектов, которые входят в состав железной дороги, на смену удельного расхода электроэнергии [86];

k_{cd} - коэффициент сезонности, значения которого определяют по табл. 6.55

k_{zd} - коэффициент, который учитывает воздействие температуры внешнего воздуха на изменения удельного расхода электроэнергии [86].

A_d и B_d - коэффициенты, которые отвечают конкретной железной дороге .

Таблица 6.55 - Значение коэффициентов k_{cd} для железных дорог Украины

Железная дорога	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Придн.	1,42	1,45	1,41	0,94	0,68	0,59	0,62	0,64	0,66	0,91	1,25	1,43
Донецкая	1,44	1,37	1,20	0,95	0,76	0,62	0,64	0,66	0,70	0,99	1,22	1,44
Южная	1,44	1,18	1,12	0,89	0,73	0,67	0,66	0,67	0,76	0,96	1,25	1,68
Юго-зап.	1,45	1,46	1,33	0,98	0,66	0,61	0,59	0,63	0,65	0,85	1,28	1,50
Одесская	1,40	1,42	1,30	0,99	0,74	0,67	0,66	0,69	0,72	0,85	1,20	1,37
Львовская	1,35	1,37	1,25	1,01	0,79	0,74	0,70	0,71	0,71	0,88	1,17	1,33

В результате обработки массива экспериментальных данных о расходах электроэнергии стационарными потребителями за 2000-2005 г.г. по отчётным формам ЕО-1 были получены следующие значения коэффициентов уравнения регрессии (6 .219) [11].

Таблица 6.56 - Значение коэффициентов A_d и B_d

Железная дорога	A_d	B_d
Приднепровская	34,773	$1,371 \cdot 10^{-6}$
Донецкая	39,747	$1,310 \cdot 10^{-6}$
Юго-западная	35,552	$1,961 \cdot 10^{-6}$
Южная	49,824	$4,832 \cdot 10^{-6}$
Львовская	38,793	$3,670 \cdot 10^{-6}$
Одесская	30,614	$1,432 \cdot 10^{-6}$

Технология нормирования расходов электроэнергии на собственные нужды тяговых подстанций, постов секционирования и пунктов параллельного соединения

Нормирование является очень специфическим процессом, который имеет много особенностей. На данном этапе реформирования отрасли у специалистов, профессиональная деятельность которых так или иначе связана с нормированием расхода ТЭР, возникают еще многие вопросы при расчетах. Это вызвано несовершенством нормативно-технической документации, наличием так называемых «белых пятен» в различных методических указаниях по нормированию расходов ТЭР. Фактические (отчетные) потери электроэнергии определяют как разность электроэнергии, поступившей в сеть, и электроэнергии, отпущенной из сети потребителям. Эти потери содержат в себе составляющие различной природы: потери в элементах сети, имеющие чисто физический характер, расход электроэнергии на работу оборудования, установленного на подстанциях, и обеспечивающего передачу электроэнергии, погрешности фиксации электроэнергии приборами ее учета и, наконец, хищения электроэнергии, неуплату или неполную оплату по показаниям счетчиков и т.п.

До 2006 г. при проведении расчетов по определению норм расхода электроэнергии для тяговых подстанции постоянного тока использовали нормативную базу энергоснабжающих организаций [316]. Кроме некоторых нестыковок с условиями и схемами работы тяговых подстанций железнодорожного транспорта (большее количество потребителей собственных нужд на тяговых подстанциях по сравнению с типичными подстанциями энергосистемы), в [316] полностью отсутствует раздел для тяговых подстанций постоянного тока.

В зависимости от проекта тяговой подстанции постоянного тока к расходам на собственные нужды относятся:

1. Расход электроэнергии на вентиляцию полупроводникового преобразовательного агрегата.

2. Расход электроэнергии на обогрев РП-3,3 кВ.

3. Расход электроэнергии на обогрев РП-10 кВ закрытого типа.

Все эти дополнительные расходы, по нашему мнению, следует рассчитывать следующими методами. Расход электроэнергии на вентиляцию полупроводникового агрегата - по известным установленной мощностью и средней продолжительности работы:

$$W_{\text{вент}} = P_{\text{вент}} \cdot \tau_p, \quad (6.220)$$

где $W_{\text{вент}}$ - расход электроэнергии на вентиляцию, кВт·ч;

$P_{\text{вент}}$ - установленная мощность электродвигателей вентиляции агрегата, кВт;

τ_p - средняя продолжительность работы двигателей обдува за год.

Расход электроэнергии на обогрев помещений РП-10 и 3,3 кВ следует рассчитывать по установленной мощности и коэффициенту сезонности:

$$W_o = P_o \cdot k_{\text{сс}} \cdot \tau_p, \quad (6.221)$$

где W_o - расход электроэнергии на обогрев помещений, кВт·ч;

P_o - установленная мощность электропечей обогрева помещений, кВт;

$k_{\text{сс}}$ - коэффициент сезонности для обогрева помещений [295].

τ_p - средняя продолжительность работы электропечей обогрева за год.

Для примера в приложении Г приведен расчет норм расхода электроэнергии на собственные нужды для тяговой подстанции Зеленый Клин-110 кВ Краснолиманской дистанции электроснабжения Донецкой железной дороги.

Нормирование расходов электроэнергии на собственные нужды постов секционирования и пунктов параллельного соединения имеет свои характерные особенности.

В идеальном случае фактические потери электроэнергии на ПСК и ППС постоянного тока представляют собой исключительно расходы электроэнергии на собственные нужды, которые необходимы для обеспечения работы технологического оборудования и жизнедеятельности

обслуживающего персонала. Но по действующей схеме функционирования ППС и ПСК эти расходы не учитываются непосредственно в месте подключения потребителя. Учет осуществляется с помощью счетчиков, установленных на фидерах продольного электроснабжения 10 кВ (ПЭ) и автоблокировки 6-10 кВ (АБ), и счетчиков на фидерах тягового электроснабжения тяговых подстанций. Поэтому при нормировании расхода электроэнергии необходимо принимать во внимание [20]:

- технические потери электроэнергии, обусловленные физическими процессами, происходящими при передаче электроэнергии по электрическим сетям. Их значение можно получить расчетным путем на основе известных законов электротехники;

- потери электроэнергии, обусловленные инструментальными погрешностями ее измерения (инструментальные потери). Эти потери получают расчетным путем на основе данных о метрологических характеристиках и режимах работы приборов;

- коммерческие потери, обусловленные хищениями электроэнергии, несоответствием показаний счетчиков оплате за электроэнергию бытовыми потребителями и другими причинами в сфере организации контроля за потреблением энергии. Эти потери нельзя исключить, так как от фидеров ПЭ питаются сторонние потребители.

Особенности питания оборудования ПСК и ППС постоянного тока отражены на обобщенной схеме питания собственных нужд ППС и ПСК (рис. 6.80).

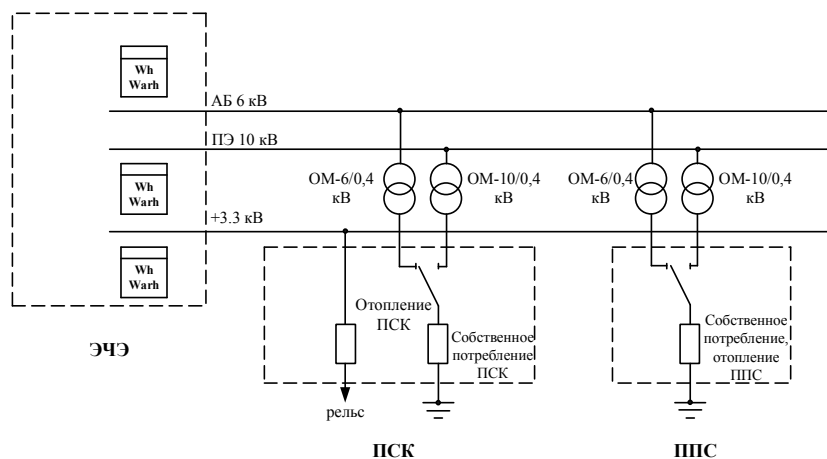


Рисунок 6.80 - Обобщённая схема питания цепей собственных нужд ПСК и ППС постоянного тока

Рассмотрим подход по определению расхода электроэнергии только на собственные нужды ПСК и ППС. Ниже не будут рассматриваться технические, коммерческие потери, а также потери, обусловленные погрешностями приборов учета. Расходы на собственные нужды являются структурированными и типичными для всех типов ПСК и ППС (как тех, что используются с начала электрификации, так и самых современных аналогов). Структура расхода представлена на рис. 6.81.

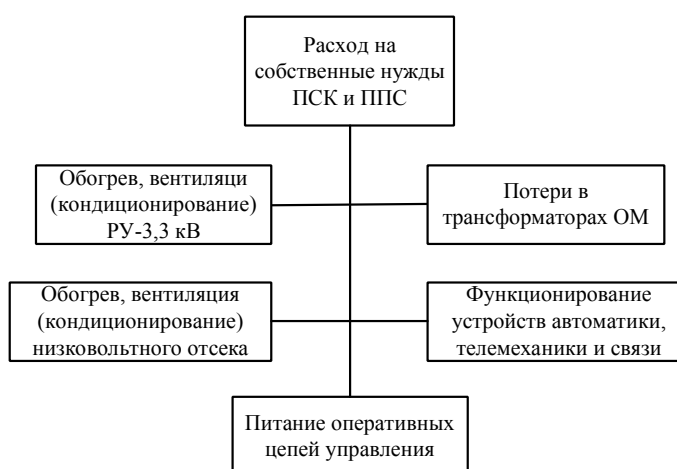


Рисунок 6.81 - Структура расхода электроэнергии на собственные нужды ПСК и ППС постоянного тока

Таким образом, определим поэтапно нормы расхода электроэнергии на собственные нужды ПСК и ППС:

1. Потери в трансформаторах ОМ-10 (6) кВ. Эти потери легко определить, исходя из паспортных данных трансформаторов и времени работы. Нормальная схема питания предусматривает питание от линии ПЭ, поэтому как расчетные берем потери в трансформаторах ОМ-10 кВ.

2. Обогрев, вентиляция (кондиционирование) РУ-3, 3 кВ. Существуют некоторые различия между ППС и ПСК. Эти различия и особенности расчета требуют внимания и будут рассмотрены ниже.

3. Обогрев, вентиляция (кондиционирование) низковольтного отсека. Будем выполнять расчет исходя из среднего количества часов пребывания

персонала в месяц, установленной мощности обогревательных или кондиционирующих устройств. Предполагается, что при отсутствии обслуживающего персонала температура, необходимая для нормального функционирования приборов РЗиА, поддерживается за счет теплообмена с РУ -3,3 кВ.

$$W_{\text{НВ}} = P_{\text{НВ}} \cdot \tau_{\text{рНВ}}, \quad (6.222)$$

где $W_{\text{НВ}}$ - расход электроэнергии на обогрев низковольтного отсека, кВт·ч;

$P_{\text{НВ}}$ - суммарная установленная мощность устройств обогрева и кондиционирования низковольтного отсека, кВт;

$\tau_{\text{рНВ}}$ - средняя продолжительность пребывания обслуживающего персонала за год. Эту величину можно принять 212 ч/год (по опыту эксплуатации ПСК на Донецкой ж.д.).

4. Функционирование устройств автоматики и связи. Норма расходов рассчитывается на основании мощности, которую потребляет совокупность устройств за час по паспорту:

$$W_{\text{А}} = P_{\Sigma \text{А}} \cdot \tau_{\text{рА}}, \quad (6.223)$$

где $W_{\text{А}}$ - расходы электроэнергии на устройстве автоматики и связи, кВт·ч;

$P_{\Sigma \text{А}}$ - суммарная установленная мощность устройств автоматики и связи, кВт;

$\tau_{\text{рА}}$ - средняя продолжительность работы оборудования автоматики и связи за год. Принимаем - 8736 ч/год.

5. Питание оперативных цепей управления. Рассчитывается аналогично п. 3. Кроме того добавляется потребление удерживающих катушек высоковольтных выключателей:

$$W_{\text{ОЛ}} = P_{\text{ОЛ}} + P_{\text{ТКВ}} \cdot \tau_{\text{рО}}, \quad (6.224)$$

где $W_{\text{ОЛ}}$ - расход электроэнергии на оперативные цепи, кВт·ч;

$P_{\text{ОЛ}}$ - суммарная установленная мощность устройств автоматики и связи, кВт. Определяется в зависимости от установленного оборудования;

$P_{\text{ТКВ}}$ - суммарная установленная мощность удерживающих катушек быстродействующих выключателей, кВт. Определяется в зависимости от типов выключателей по паспорту;

$\tau_{\text{рО}}$ - средняя продолжительность работы оборудования оперативных цепей за год. Равняется 8736 ч/год.

Рассмотрим детально п.2. Питание приборов обогрева поста секционирования постоянного тока, которые устанавливались при электрификации, происходит по схеме приведенной на рис. 6.82.

К главной шине 3,3 кВ последовательно подключены 5 печей R_1 - R_5 мощностью 750 Вт каждая через блоки-контакты терморегулятора S_1 . Электropечи установлены в высоковольтном отсеке ПСК, термодатчик терморегулятора расположен в низковольтном отсеке. Терморегулятор в заводском положении установлен на включение при температуре ниже $+15^\circ\text{C}$, но в процессе эксплуатации установлено, что работоспособность аппаратуры обеспечивается при температуре не ниже $+10^\circ\text{C}$, поэтому с целью энергосбережения все термодатчики переведены на срабатывание при $+10^\circ\text{C}$.

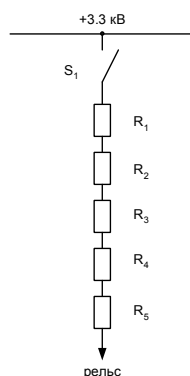


Рисунок 6.82 - Схема питания приборов обогрева ПСК постоянного тока

В ППС печь обогрева, как правило, одна, питается от сети переменного тока 220 В собственных нужд. Печь мощностью 1000 Вт установлена в отсеке 3,3 кВ, терморегулятор установлен в том же отсеке (рис. 6.83).

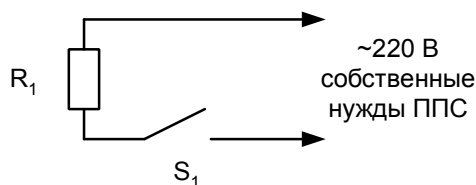


Рисунок 6.83 - Схема питания отопления ППС постоянного тока

Расходы электроэнергии на обогрев РУ-3,3 кВ можно рассчитать по установленной мощности и коэффициенту сезонности:

$$W_o = P_o \cdot k_{cc} \cdot \tau_p, \quad (6.225)$$

где W_o - расходы электроэнергии на обогрев помещений, кВт·ч;

P_o - установленная мощность электропечей обогрева помещений, кВт;
для ПСК равняется 3,75 кВт, для ППС - 1,0 кВт;

k_{cc} - коэффициент сезонности для обогрева помещений, значение которого приведены в [295].

τ_p - средняя продолжительность работы электропечей обогрева за год.

Опыт эксплуатации позволяет выделить 4 режима работы электропечей для поддержки температурного режима ПСК и ППС:

1. Температура окружающей среды выше +10 °С – печи отключены.
2. Температура окружающей среды 0 – +10°С – печи включены приблизительно 10 % времени суток (2,5 часа).
3. Температура окружающей среды -15 – 0°С – печи включены 30% времени суток (7,2 часа).
4. Температура окружающей среды ниже -15°С – печи включены 50 % времени суток (12 часов).

Средняя продолжительность работы электропечей за год получена с помощью статистических методов обработки данных (по материалам

Донецкой железной дороги). За 5 лет (2003-2007) были рассчитаны среднесуточные температуры по месяцам. Распределив температурные показатели согласно четырём режимам работы, была рассчитана средняя продолжительность работы электропечей - 1 971 ч/год.

В качестве примера приведём расчёт нормативных расходов электроэнергии на обогрев РУ-3,3 кВ ПСК и ППС по месяцам (табл. 6.57).

Таблица 6.57 - Значение нормативных расходов электроэнергии на обогрев РУ-3,3 кВ ПСК и ППС по месяцам расчетного периода

Месяц	Значение нормативных расходов электроэнергии на обогрев РУ-3,3 кВ , тыс. кВт·ч	
	ПСК	ППС
Январь	1,89	0,50
Февраль	1,70	0,45
Март	0,07	0,02
Апрель	0,00	0,00
Май	0,00	0,00
Июнь	0,00	0,00
Июль	0,00	0,00
Август	0,00	0,00
Сентябрь	0,00	0,00
Октябрь	0,06	0,02
Ноябрь	1,77	0,47
Декабрь	1,89	0,50
Год	7,39	1,97

Рекомендации по уменьшению небалансов электроэнергии в системах тягового электроснабжения постоянного тока.

Специалистами кафедры «Электроснабжение железных дорог» совместно с работниками Донецкой и Львовской железных дорог было проведено исследование небалансов электроэнергии [38, 40, 81]. Небаланс электроэнергии в отчетном периоде определяется по методике [317].

Фактический небаланс электроэнергии за расчетный период определяется как разница между общим поступлением электроэнергии и количеством отпущенной электроэнергии (см. (6.226). В процентах небаланс электроэнергии определяется в отношении общего поступления электроэнергии

$$\text{НБф} = \frac{W_{\Pi} - W_0}{W_{\Pi}} \cdot 100\%, \quad (6.226)$$

где W_{Π} (W_0) - объем приема (отпуска) электроэнергии в расчетном периоде, определяется по показаниям счетчиков на присоединениях.

Полученный небаланс сравнивается с допустимым и делается соответствующий вывод о наличии на подстанции неучтенного потребления электроэнергии и о наличии погрешностей измерительных комплексов.

Допустимый небаланс в процентах определяется по формуле

$$\text{НБп} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^k \delta_{\Pi i}^2 \cdot d_{\Pi i}^2 + \sum_{i=1}^m \delta_{0i}^2 \cdot d_{0i}^2 \right)}, \quad (6.227)$$

где $\delta_{\Pi i}$ (δ_{0i}) - среднеквадратичная погрешность i -го измерительного комплекса, соответствующего классам точности трансформаторов тока и напряжения, и счетчика, предназначенного для учета электроэнергии, поступившей (отпущенной), входящих в этот комплекс, %;

$d_{\Pi i}$ (d_{0i}) - доля электроэнергии, прошедшей (отпущенной) через i -тый измерительный комплекс;

k - количество измерительных комплексов, которые учитывают электроэнергию, поступившую на шины объекта;

m - количество измерительных комплексов, учитывающих отпущенную энергию (в том числе на собственные нужды подстанций).

В табл. 6.58 приведены значения небалансов активной энергии по тяговой подстанции «Ш» Донецкой ж.д. по месяцам [38, 40, 81].

Таблица 6.58 - Небаланс активной энергии по ТП «Ш» по месяцам

Показатель	1. Май 2010 г.	2. Июнь 2010 г.	3. Июль 2010 г.	4. Август 2010 г.	5. Сентябрь 2010 г.	6. Октябрь 2010 г.	7. Ноябрь 2010 г.	8. Декабрь 2010 г.	9. Январь 2011 г.	10. Февраль 2011 г.	11. Март 2011 г.
Допустимый активный небаланс, %	1,42735	1,21366	1,29474	1,41654	1,32714	1,42421	1,37154	1,40832	1,40708	1,37832	1,39626
Фактический активный небаланс, %	-0,85913	0,01445	1,76471	2,07493	4,20172	5,30946	5,66318	6,29124	5,64875	0,12110	1,17505
Сверхнормативный небаланс, %	0,00	0,00	0,46997	0,65839	2,87458	3,88525	4,29164	4,88292	4,24149	0,00	0,00
Распределенный небаланс, %	-0,85913	0,01445	1,29474	1,41654	1,32714	1,42421	1,37154	1,40832	1,40708	0,12110	1,17505

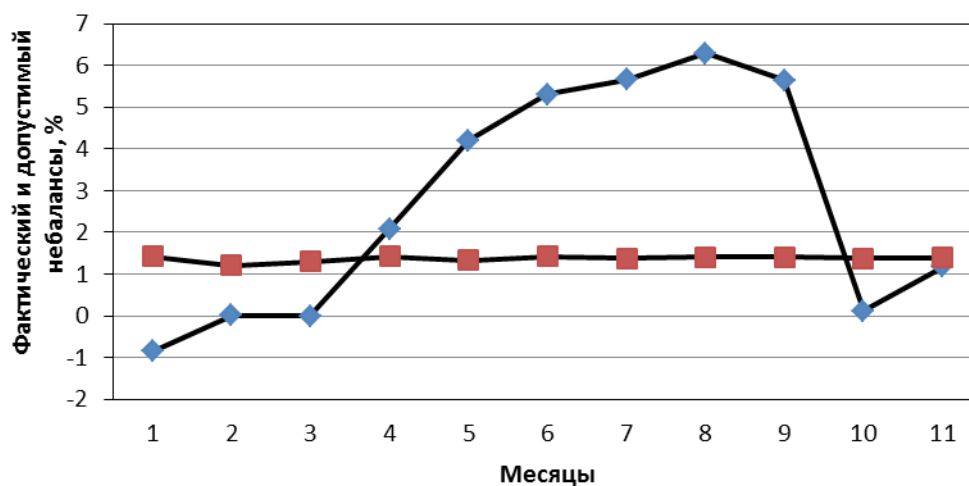


Рисунок 6.84 - Фактический и допустимый активные небалансы тяговой подстанции «Ш»

На рис. 6.84 приведен график зависимости фактического и допустимого активных небалансов электроэнергии. На рассматриваемой тяговой подстанции с июля 2010 г. по январь 2011 г. фактический небаланс превышает допустимый. На рис. 6.85 приведен сверхнормативный небаланс.

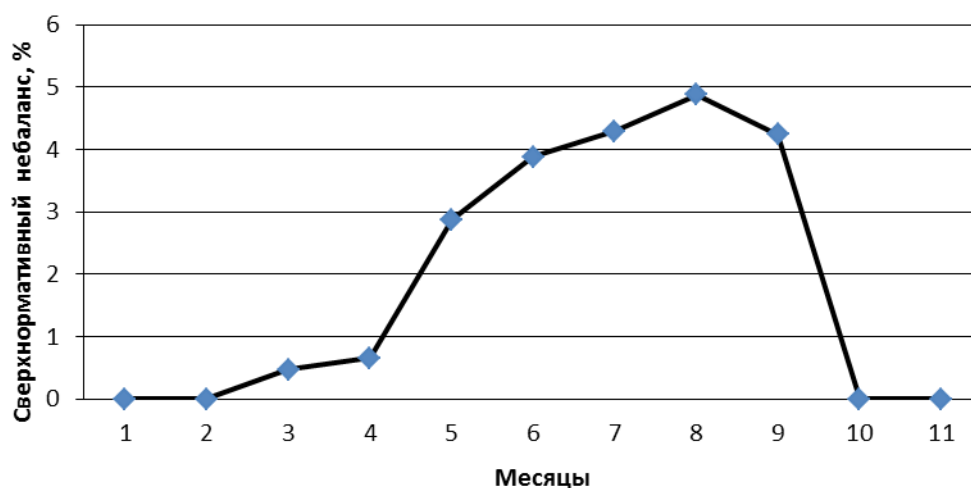


Рисунок 6.85 - Сверхнормативный активный небаланс тяговой подстанции «Ш»

Самый большой небаланс на рассматриваемой тяговой подстанции «Ш» наблюдался в декабре 2010 г. и составлял 4,88 %. Для анализа причин небалансов проанализируем загрузки трансформаторов напряжения и трансформаторов тока (табл. 6 .59). Данные были собраны по режимным замерам на тяговой подстанции [81].

Таблица 6.59 - Коэффициенты загрузки трансформаторов тока ТП «Ш» по фидерам

t, ч	Ввод 1 35 кВ	Ввод 2 35 кВ	ЧП Р 10 кВ	ТПВА 1 10 кВ	ТСН 1	СЦБ	ФПЭ Ф	ЭЧК-22	ЖДУ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,048	0,222	0,218	0,174	0,008	0,002	0	0,116	0,418
1	0,046	0,202	0,148	0,162	0,006	0,004	0	0,11	0,406
2	0,048	0,244	0,184	0,222	0,008	0,002	0	0,1	0,406
3	0,042	0,176	0,294	0,126	0,008	0,002	0	0,102	0,414
4	0,044	0,202	0,316	0,16	0,008	0,004	0	0,106	0,408

Окончание табл. 6 .59

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	0,048	0,154	0,314	0,09	0,01	0,002	0	0,108	0,4
6	0,048	0,12	0,304	0,04	0,01	0,004	0	0,092	0,406
7	0,044	0,228	0,226	0,198	0,006	0,002	0	0,076	0,446
8	0,046	0,194	0,134	0,152	0,006	0,004	0	0,072	0,438

9	0,05	0,236	0,204	0,202	0,008	0,002	0	0,074	0,454
10	0,052	0,182	0,228	0,12	0,006	0,004	0,008	0,07	0,404
11	0,048	0,148	0,25	0,084	0,008	0,004	0,008	0,072	0,364
12	0,044	0,198	0,272	0,158	0,008	0,004	0	0,07	0,358
13	0,052	0,17	0,252	0,11	0,006	0,002	0	0,064	0,406
14	0,05	0,124	0,226	0,054	0,006	0,002	0	0,062	0,384
15	0,046	0,144	0,328	0,076	0,008	0,004	0	0,07	0,42
16	0,048	0,22	0,336	0,174	0,006	0,002	0	0,08	0,45
17	0,054	0,166	0,356	0,094	0,008	0,004	0	0,076	0,44
18	0,058	0,158	0,36	0,078	0,008	0,002	0	0,078	0,436
19	0,05	0,124	0,22	0,044	0,008	0,002	0	0,082	0,418
20	0,052	0,14	0,17	0,068	0,006	0,004	0	0,088	0,446
21	0,052	0,166	0,27	0,098	0,008	0,002	0	0,088	0,418
22	0,052	0,19	0,274	0,138	0,008	0,002	0	0,088	0,384
23	0,05	0,208	0,29	0,166	0,006	0,004	0	0,082	0,37

Как видно из табл. 6 .59, трансформаторы недогружены. Коэффициент загрузки для трансформаторов тока не превышает 0,46.

Аналогичные работы были проведены в марте и апреле 2010 г. На тяговых подстанциях ЭЧ-3 Львовской железной дороги было выполнено измерение параметров вторичных цепей учета в сетях 110, 35, 27 кВ. По результатам замеров выявлено недозагруженность не только трансформаторов тока, но и трансформаторов напряжения [39].

Для подтверждения нормируемых метрологических характеристик ТН согласно их классам точности 0,5 при действительных значениях мощностей и коэффициентов мощности их вторичной нагрузки было предложено мощность вторичного нагрузки обмоток и коэффициенты мощности вторичной нагрузки ТН привести в соответствие с требованиями ГОСТ -1983 и ГОСТ- 7746 соответственно. Для этого предлагается догрузить вторичные цепи трансформаторов напряжения резисторами. Дозагрузки трансформаторов напряжения рекомендуется выполнить путем подключения в цепи напряжения релейной защиты (фаза - ноль) нагрузочных сопротивлений. В качестве примера приведены рекомендуемые величины добавочных резисторов для четырёх тяговых подстанций ЭЧ-3 Львовской ж.д. (табл. 6 .60).

Таблица 6.60 - Нагрузка трансформаторов напряжения ЭЧ-3

Фаза	Измеренная нагрузка ТН, Вт	Нагрузка, которая добавляется, Вт	Суммарная нагрузка на однофазный ТН, Вт	Допустимый диапазон нагрузок ТН, Вт	Номинал нагрузочного сопротивления, Ом
ЭЧЭ-3 ТН 1 110 кВ					
A	17	100	117	100 - 400	33 Ом/ 150Вт
B	15	100	115	100 - 400	33 Ом/ 150Вт
C	13,8	100	113,8	100 –400	33 Ом/ 150Вт
ЭЧЭ - 3 ТН 2 110 кВ					
A	71,6	50	121,6	100 - 400	66 Ом/ 100Вт
B	75,6	50	125,6	100 - 400	66 Ом/ 100Вт
C	58,9	50	108,9	100 –400	66 Ом/ 100Вт
ЭЧЭ - Д ТН 1 110 кВ					
A	13	100	113	100 - 400	33 Ом/ 150Вт
B	14	100	114	100 - 400	33 Ом/ 150Вт
C	15	100	115	100 –400	33 Ом/ 150Вт
ЭЧЭ - Д ТН 2 110 кВ					
A	15	100	115	100 - 400	33 Ом/ 150Вт
B	14	100	114	100 - 400	33 Ом/ 150Вт
C	16	100	116	100 –400	33 Ом/ 150Вт

Аналогичные измерения были проведены на ЭЧ-6 Львовской железной дороги (табл. 6 .61)

Таблица 6.61 - Нагрузка трансформаторов напряжения ЭЧ- 6

Фаза	Измеренная нагрузка ТН, Вт	Нагрузка, которая добавляется, Вт	Суммарная нагрузка на однофазный ТН, Вт	Допустимый диапазон нагрузок ТН, Вт	Номинал нагрузочного сопротивления, Ом
ЭЧЭ Л ТН 1 110 кВ					
A	59,1	60	119,1	100 - 400	50 Ом/ 100Вт
B	47,1	60	107,1	100 - 400	50 Ом/ 100Вт
C	53,4	60	113,4	100 –400	50 Ом/ 100Вт
ЭЧЭ -Л ТН 2 110 кВ					
A	99,8	20	129,8	100 - 400	200 Ом/ 50Вт
B	104,7	20	124,7	100 - 400	200 Ом/ 50Вт
C	81,2	30	111,2	100 –400	135 Ом/ 50Вт
ЭЧЭ - Р ТН 1 110 кВ					

A	57,2	60	117,2	100 - 400	33 0м/ 150Вт
B	54,6	60	114,6	100 - 400	33 0м/ 150Вт
C	54,9	60	114,9	100 –400	33 0м/ 150Вт

**Программный комплекс по определению рациональных режимов
системы электроснабжения тяги поездов на основе адаптированного
генетического алгоритма**

Назначением представленного в данном пункте программного комплекса является определение рациональных режимов СТЭ магистральных железных дорог постоянного тока, а именно - определение оптимального количества одновременно работающих понижающих и тяговых трансформаторов на каждой подстанции, уровня напряжений на шинах тяговых подстанций, рациональных схем питания контактной сети (учитывая переменную стоимость электроэнергии и надежность оборудования).

Структура программы. Для описания структуры программы была избрана диаграмма компонентов (рис. 6.86), которая описывает особенности физического представления системы.

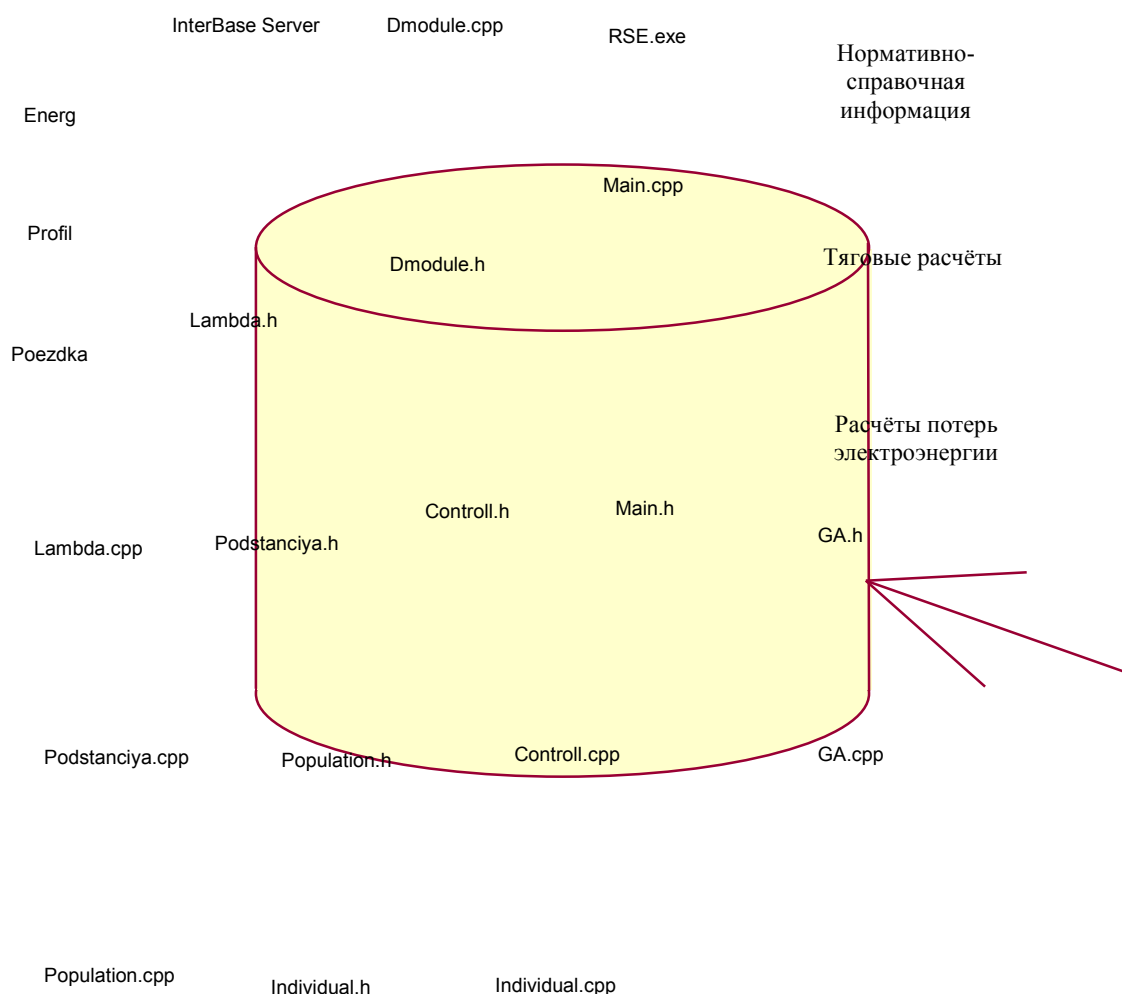


Рисунок 6.86 - Диаграмма компонентов

Особенностью предложенной диаграммы компонентов является тот факт, что один из модулей программы (`Dmodule.cpp`) использует стороннюю программу (Interbase Server) для доступа к файлам базы данных (`Energ`, `Profil`, `Poezdka`).

На рис. 6.87 показана диаграмма классов программного комплекса.

Класс `Main` обеспечивает работу пользователя с интерфейсом, иницирует работу других классов. Класс `Controll` обеспечивает взаимодействие интерфейса с данными. Класс `Podstanciya` представляет данные о силовом оборудовании и характеристики подстанции. В данном модуле рассчитываются потери мощности в оборудовании подстанции.

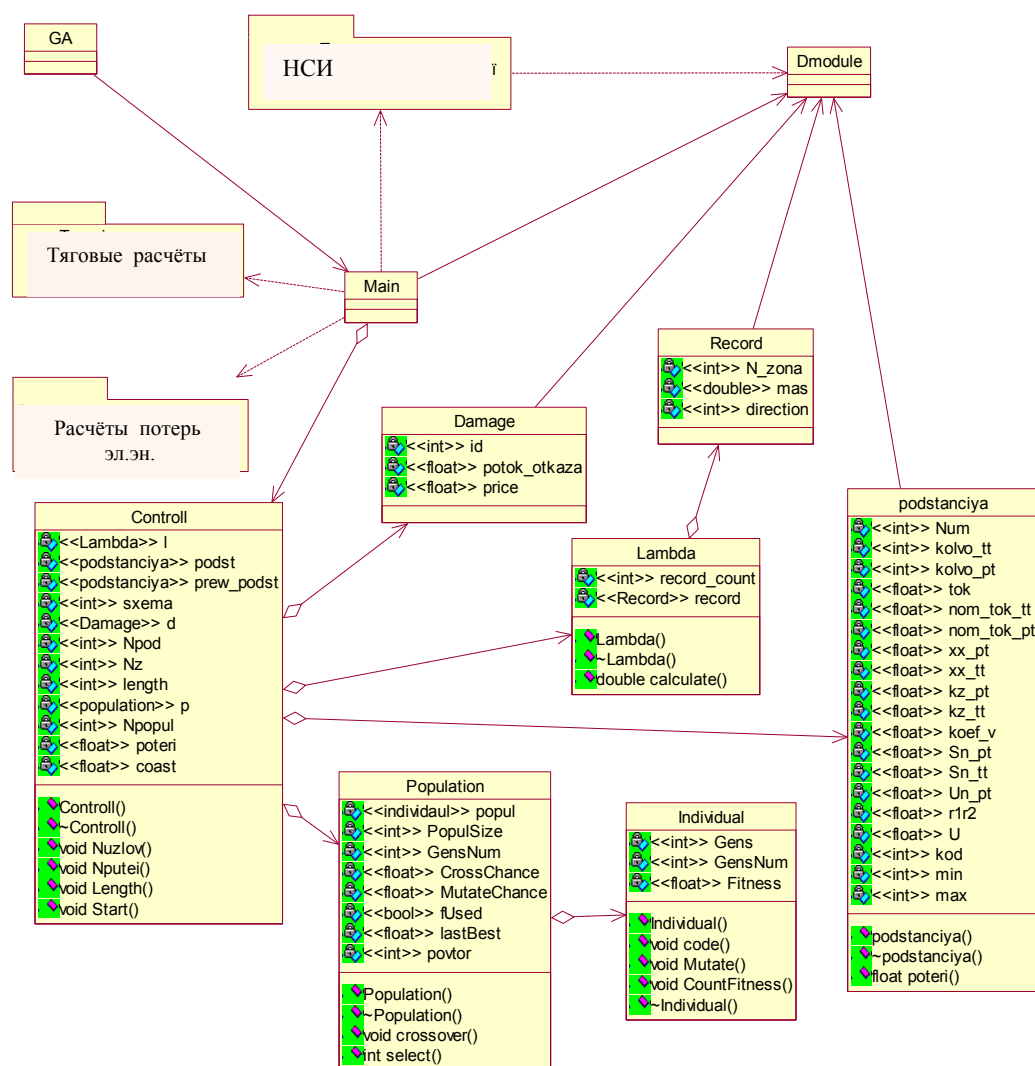


Рисунок 6.87 - Взаимодействие классов программного комплекса

Класс Lamda представляет усредненную модель потока поездов. Класс Dmodule обеспечивает взаимодействие с базой данных. Структура Record представляет собой одну строку таблицы интенсивности потока поездов из базы данных. С помощью класса Damage можно получить данные о типах и стоимости ущерба от отказов, которые учитывают надёжность оборудования. Класс GA предоставляет пользователю информацию о результатах работы генетического алгоритма, инициирует работу генетического алгоритма. Класс Population отвечает за представление популяции и работу генетического алгоритма. Класс Individual отвечает за представление особи генетического алгоритма, кодирование и декодирование генетической информации, расчёт приспособленности «особи».

Исходными данными для программного комплекса являются:

- $C_e(t)$ - тариф на электроэнергию;
- T - период времени, за который определяются потери электроэнергии ;
- $P_{XX\_ПТi}, P_{XX\_ТТi}$ - потери холостого хода понизительного и тягового трансформаторов соответственно;
- C_i - стоимость i -й операции по восстановлению ресурса;
- $\omega(t)$ – суммарный параметр потока отказов;
- $r_0(S)$ - удельное сопротивление тяговой сети в сечении S , Ом;
- $\psi(s, x)$ – функция токораспределения;
- NP – количество подстанций на рассматриваемом участке;
- ND – количество участков;
- NK_i – количество путей на i -м участке;
- NV_i – количество узлов на i -м участке;
- $\Delta P_{КЗПТi}, \Delta P_{КЗТТi}$ – потери короткого замыкания соответственно понизительного и тягового трансформаторов i -й ТП, кВт;
- $I_{НОМ\_ТТi}, I_{НОМ\_ПТi}$ – номинальные токи соответственно понизительного и тягового трансформаторов i -й ТП, кА;
- $f(t)$ – плотность распределения межпоездных интервалов;
- Q_{ij} – масса j -го поезда, который проходит по i -му участку, т;
- α_{ij} – удельный расход электроэнергии j -го поезда, который проходит по i -му участку, кВт·ч/10⁴т·км;
- v_{ij} – средняя скорость j -го поезда, который проходит по i -му участку, км/ч;
- u – среднее напряжение, кВ;
- L_i – длина i -го участка, км;
- $I_{дн i}$ – номинальное значение тока i -й ТП, кА;
- r_{1pi}, r_{2pi} – активные сопротивления реакторов 1-го и 2-го контуров сглаживающего устройства i -й ТП, Ом;

- ΔE_{1i} – шаг регулирования по первичному напряжению тягового трансформатора i -й ТП, кВ;
- ΔE_{1maxi} – максимальное первичное напряжение тягового трансформатора i -й ТП, кВ;
- ΔE_{2i} – шаг регулирования по первичному напряжению понизительного трансформатора i -й ТП, кВ;
- ΔE_{2maxi} – максимальное первичное напряжение понизительного трансформатора i -й ТП, кВ;
- l_{0i} – положение РПН тягового трансформатора i -й подстанции;
- k_{0i} – положение РПН понизительного трансформатора i -й подстанции.

В результате работы программного комплекса рассчитываются следующие показатели:

- C - стоимость потерь электроэнергии, грн;
- l_i – положение РПН тягового трансформатора i -й подстанции;
- k_i - положение РПН понизительного трансформатора i -й подстанции;
- m - общее количество переключений силового оборудования;
- γ_{uv} – подключение u -го пути до v -го узла (1 – подключено, 2 – не подключено);
- X_{1i}, X_{2i} - количество одновременно работающих понизительных и тяговых трансформаторов i -й подстанции (может принимать значение 1 либо 2).

После запуска исполнительного файла программы на экран выводится главное окно программы (рис. 6.88).

Это окно позволяет пользователю выполнять следующие операции:

- на вкладке «Система ЭЛС» выбирать участок тяговой сети, для которого необходимо определить рациональные режимы работы, вводить информацию о подстанциях избранного участка (рис. 6.88);
- на вкладке «Зоны» вводить информацию о межподстанционных зонах, количестве путей и узлов на каждой зоне (рис. 6.89);

- на вкладке «Результаты» просматривать результаты тяговых расчетов (рис. 6.90);
- на вкладке «Поезда» вводить информацию о поездах, которые двигаются по выбранному участку (рис. 6.91);
- на вкладке «Оборудование подстанций» вводить информацию о силовом оборудовании подстанций (рис. 6.92).

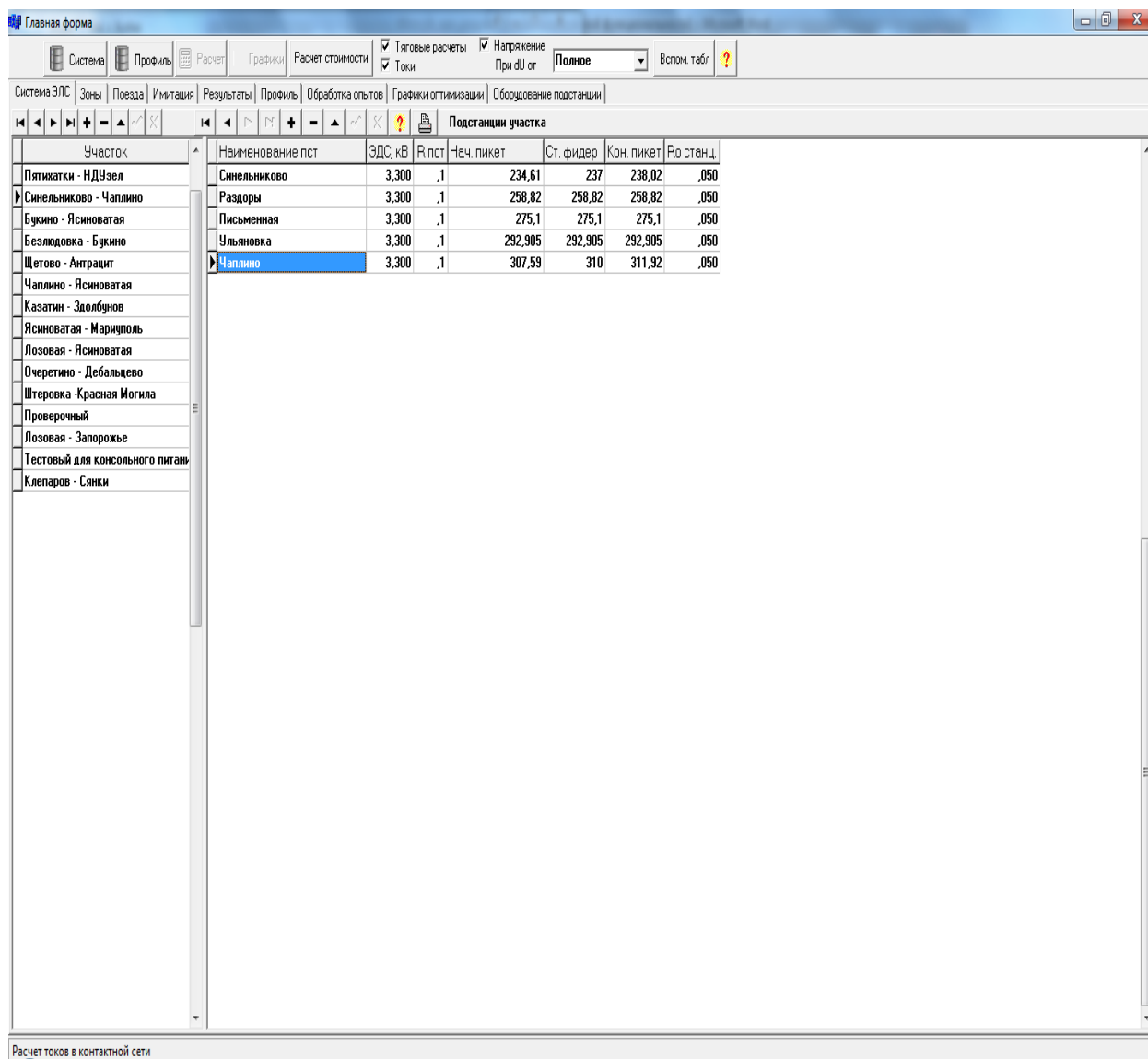


Рисунок 6.88 - Вкладка «Система ЭЛС» главного окна программы

Главная форма

Система ЭПС | Зоны | Поезда | Имитация | Результаты | Профиль | Обработка опытов | Графики оптимизации | Оборудование подстанции

Расчет стоимости | Тяговые расчеты | Напряжение При dU от Полное | Вспом. табл.

Поездов по зонам

Зона	Путь	Nпт1	Nпт2	Nпт3	Nпт4	Nпт5
1	2	60	60			
2	2	60	60			
3	2	60	60			
4	2	60	60			

Подсоединение путей к узлам зоны, разрез узлов

Узел	Наименование	Пикет	1 п	2 п	3 п	4 п	5 п	Разрез
1	ППС 297 км	297,2	подключ	подключ				
2	ПСХ 301 км	301,6	подключ	подключ				
3	ППС 305 км	305,6	подключ	подключ				

Фидера зоны Ro, Ом/км L, км

Путь	Ro лев	Ro прав	L лев	L прав
1	0,005	0,005	0,5	0,5
2	0,005	0,005	0,5	0,5

Удельные сопротивления ветвей зоны

Ветвь	1 путь	2 путь	3 путь	4 путь	5 путь
1	0,05	0,05			
2	0,05	0,05			
3	0,05	0,05			
4	0,05	0,05			

Тяговый расчет.

Рисунок 6.89.- Вкладка «Зоны» главного окна программы

Главная форма

Система ЭПС | Зоны | Поезда | Имитация | Результаты | Профиль | Обработка опытов | Графики оптимизации | Оборудование подстанции

Расчет стоимости | Тяговые расчеты | Напряжение При dU от Полное | Вспом. табл.

Графики

Тяг. расч. пути | поезд 1

Точек на странице 1230

Множитель тока 25

Шаг сетки по X 5

Отступы, % от 10 5 1

Ширина прав. ПСТ, км 2

Подстанций в строке 7

Ориентация бумаги

Классическая

Альбомная

Оптимизация

Включить оптимизацию

Вср оконания, км/ч 40

Начальные. Вкл в оптим

Vтяги 75

Aз огр .08

Креост .7

Aз max .4

Вставки

КПДmin .6 константа

Условия движения

dх, км .1

Delta I .005

Ay max .2

A реост .1

V max 80

Delta V 3

Нагрев по току

Якоря

Полосов

Построить график

T перегрева

dA стали двигателей

dA электрических двиг

dA зубчатке двигат.

dA механических двиг.

dA пусковых реост.

Амех

КПД

Печать (plot.dta.txt)

Тяговых расчетов

Отсутствует

Частичная

Полная

Минимум

Узловые матрицы R,Y

Итераций U - Тяг. расч 1

Можно задать const

I поездов, кА .1

V поезд, км/ч 100

Неравномерность потока

Автоматически

Вручную

Использовать только узловой поля в тяге 1

cbKonsol

Далее 3 зон не учитывать

Тяговый расчет.

Рисунок 6.90 - Вкладка «Результаты» главного окна программы

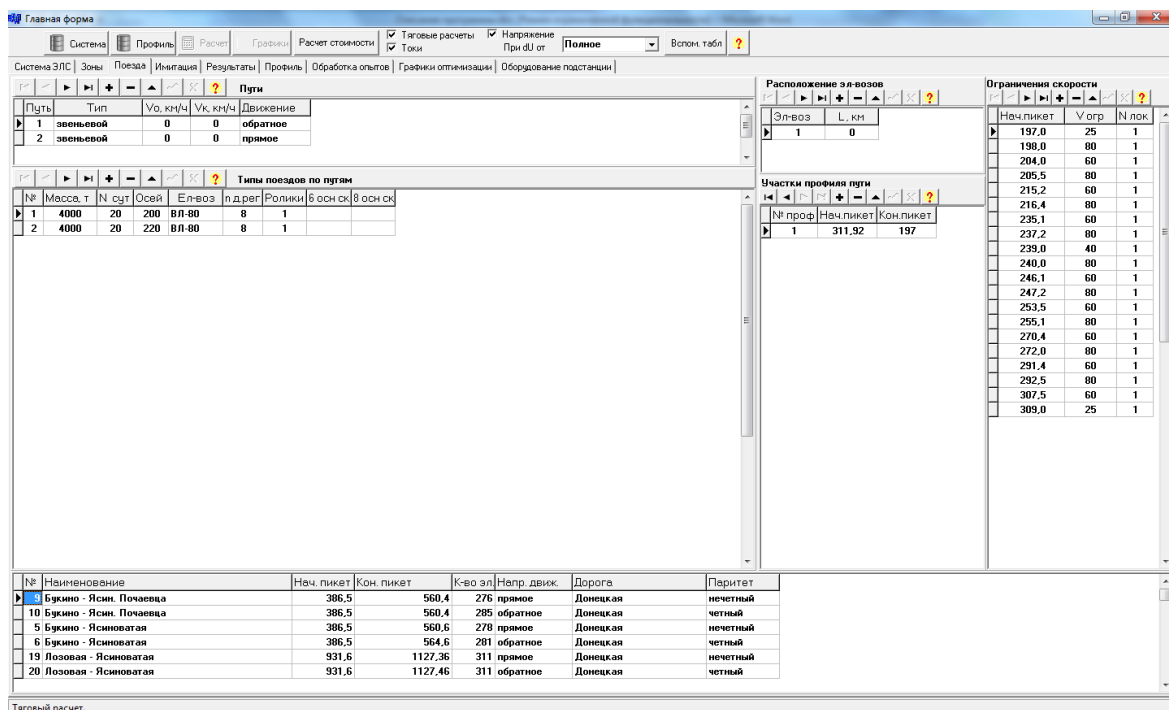


Рисунок 6.91 - Вкладка «Поезда» главного окна программы

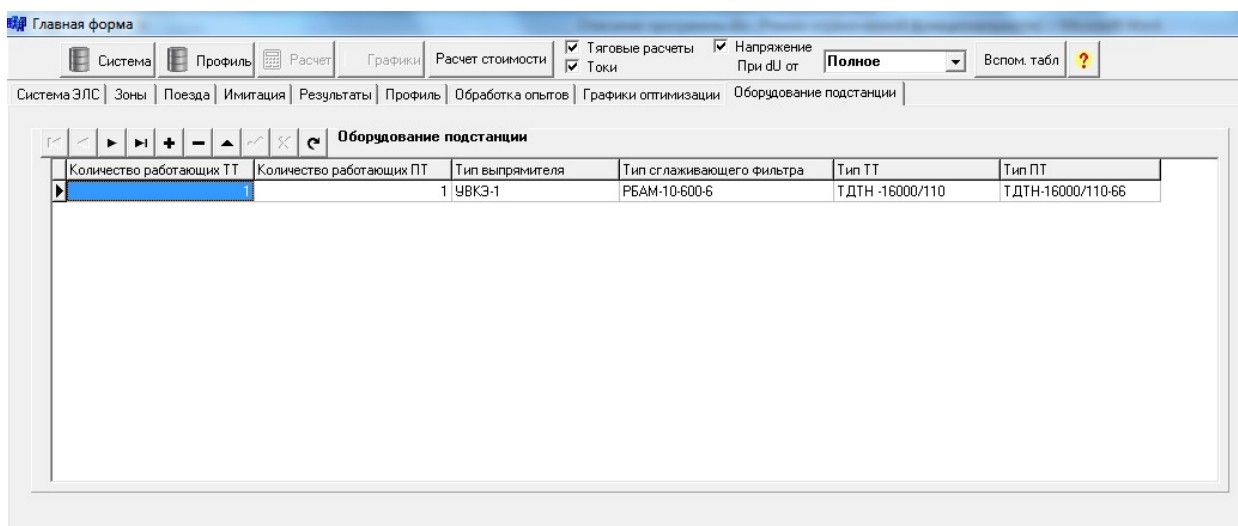


Рисунок 6.92 - Вкладка «Оборудование подстанций» главного окна программы

Окно «Постоянные данные» (рис. 6.93) выводится на экран с помощью кнопки «Вспом.табл». Оно содержит научно-справочную информацию, которая располагается на вкладках «Электропоезда», «Характеристики электропоездов», «Трансформаторы подстанций», «Преобразователи подстанций», «Стоимость», «Параметры ГА», «Интенсивность», «Оборудование подстанций», «Ущерб».

ПОСТОЯННЫЕ ДАННЫЕ

Электровозы | Характеристики электровозов | Вспомогательная | Трансформаторы подст. | Преобразователи подст. | Стоимость | Параметры ГА | Интенсивность | Оборудование подстанции | Ущерб

Параметры электровозов

Имя	Тип	Rном	Iном	Uном	dPст	Еном	Емах	Uрмах	Rяк	Rглпол.	Rкомп	Rдпол.	Rстаб	Rишунт	Rпр.взб.	Rвозб.	Kрзс	Nдв.откл.	Rвент	Rкомпр	Uном	Tнагр
ВЛ-8	= ток с рекуп	570	0,38	42,6	11	2,8	5	54	0,0473	0,0442	0	0,0237	0	0	0	80	0,7	8	87	28,5	3	44
ЧС-7	= ток без рек	817	0,545	87,8	15,8	2,8	5	80	0,0446	0,0272	0	0,0173					0,7	8	156	21	3	40
ВЛ-80	= ток без рек	836	0,88	52,5	17,5	3,1	4,5	56	0,0151	0,0103	0,0089	0,007					0,7	8	290	44	25	23
ДЗ-1	= ток с I cons	785	0,565	50,8	20	3	5	60	0,026	0,0195	0,024	0	0,395	0	0	80	0,7	8	85	24,5	3	24
ВЛ-10	= ток с рекуп	575	0,41	48,7	12	2,8	5	54	0,0382	0,03	0,0032	0,0118	0	0	0	81	0,7	8	106,2	21	3	20

Ограничение по току рекуперации

Имя	N посл. двиг	Uмах рек
С	8	30
СП	4	56
П	2	100

Геостаты на одну параллельную секцию

Позиция	Rс	Rсп	Rп	Kосл
0	0	0	0	1
1	0,39	0,19	0,104	1
2	0,79	0,35	0,179	1
3	1,29	0,54	0,259	1
4	1,86	0,77	0,382	1
5	2,442	0,99	0,4	1
6	3,136	1,18	0,65	1
7	4,84	1,39	0,85	1
8	4,97	1,73	1,01	1
9	5,89	1,97	1,47	1
10	6,95	2,37	1,47	1
11	8,26	2,37	1,47	1
12	10,36	2,37	1,47	1
13	13,86	2,37	1,47	1
14	19,1	2,37	1,47	1
15	25,91	2,37	1,47	1

Наименов

Ослабл.

ПП	1
ОП1	,75
ОП2	,55
ОП3	,43
ОП4	,36

Рисунок 6.93 - Окно «Постоянные данные»

Окно «ГА» выводится на экран с помощью кнопки «Расчет стоимости». Оно содержит информацию о работе генетического алгоритма, которая располагается на вкладках «Стоимость потерь электроэнергии», «Схемы подключения путей к узлам», «Уровни напряжения на подстанциях», «Трансформаторы», «Графики». На вкладке «Стоимость потерь электроэнергии» отображается график стоимости существующих потерь электроэнергии на участке тяговой сети и стоимость потерь при рациональных режимах работы системы электроснабжения. На вкладке «Схемы подключения путей к узлам» отображаются существующие и рациональные схемы подключения путей к узлам для каждой межподстанционной зоны. На вкладке «Уровни напряжения на подстанциях» отображаются действующие и рациональные уровни напряжения на каждой подстанции рассматриваемого участка тяговой сети. На вкладке «Трансформаторы» отображается существующее и рациональное количество одновременно работающих понижающих и тяговых трансформаторов на каждой подстанции рассматриваемого участка. На вкладке «Графики»

отображаются графики стоимости электроэнергии и интенсивности потока поездов.

Далее приведен пример определения рациональных режимов СТЭ для участка Донецкой железной дороги.

На Красноармейской дистанции электроснабжения (рис. 6.94 и рис. 6.95) были неравномерно загружены сопредельные тяговые подстанции Удачная – Красноармейск – Желанная (суточные расходы в 2009 году были 39, 76 и 52 тыс. кВт·год соответственно), в 2010 году было проведено (после измерений внешних характеристик тяговых подстанций и определения уровня напряжения на шинах 3,3 кВ) переключение анцапф тяговых трансформаторов в соответствии с целевой функцией (2.40), которое позволило оптимизировать расходы электроэнергии и напряжения на шинах тяговых подстанций (суточные расходы стали 51, 75 и 60 тыс. кВт·ч соответственно). Общий расход электроэнергии на тягу по ЭЧ в феврале 2010 г. составил 10,889 млн. кВт·ч против 11,363 млн кВт·ч в феврале 2009 г. Было зафиксировано снижение потребления электроэнергии на 474 тыс. кВт·ч [34].

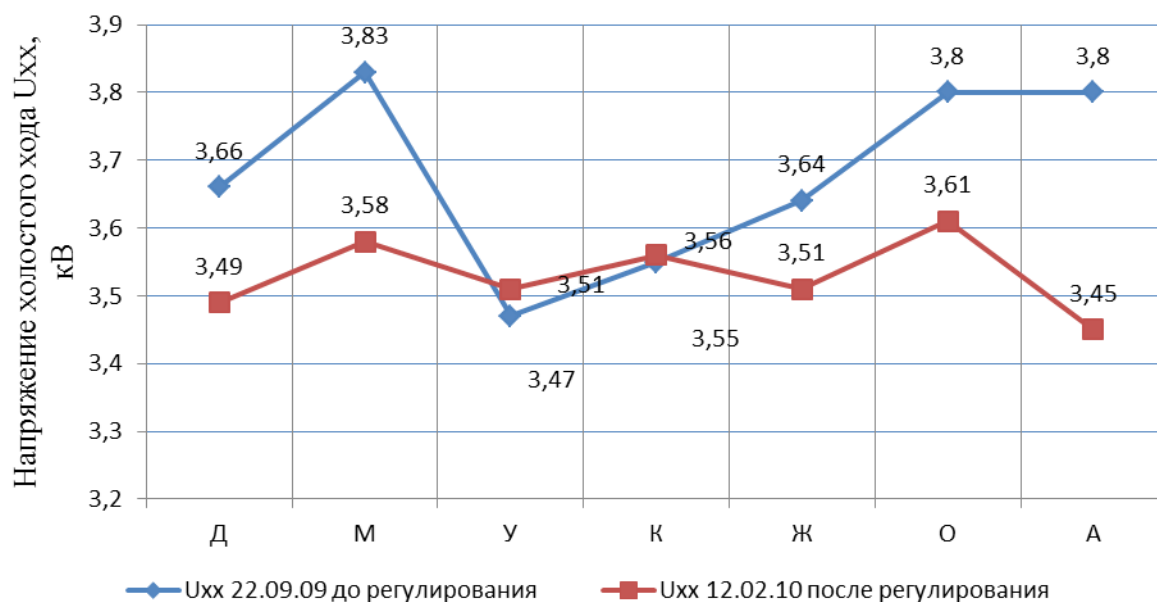


Рисунок 6.94- Напряжения холостого хода на шинах тяговых подстанций до и после регулирования

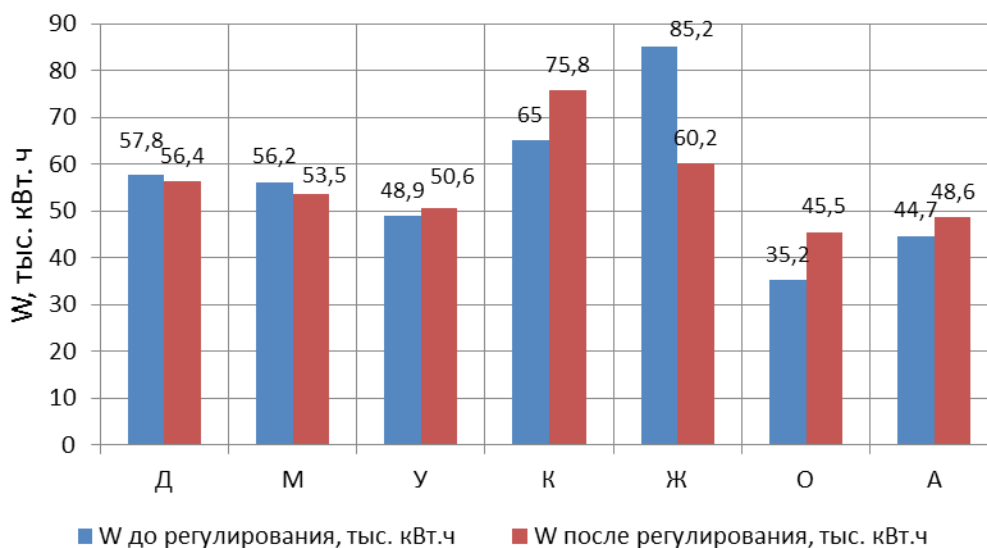


Рисунок 6.95- Расходы электроэнергии тяговых подстанций до и после регулирования напряжения на шинах подстанций

Анализ графиков расходов электроэнергии на тягу поездов в зимний период с помощью системы АСКУЭ показал зависимость расхода электроэнергии на тягу поездов не только от объема перевозок, но и от колебаний температуры окружающего воздуха. Так, при снижении температуры возрастает расход электроэнергии на тягу при тех же объемах перевозок (рис. 6 .96, рис. 6 .97). Очевидно, это происходит вследствие повышения потребления электроэнергии на отопление пассажирских вагонов, электропоездов и электровозов. Необходимо проводить отдельный учет на электрообогрев, а также привести учет электроэнергии на ЭПС в соответствии с требованиями времени – устанавливать электронные счетчики, делать их проверку [43].

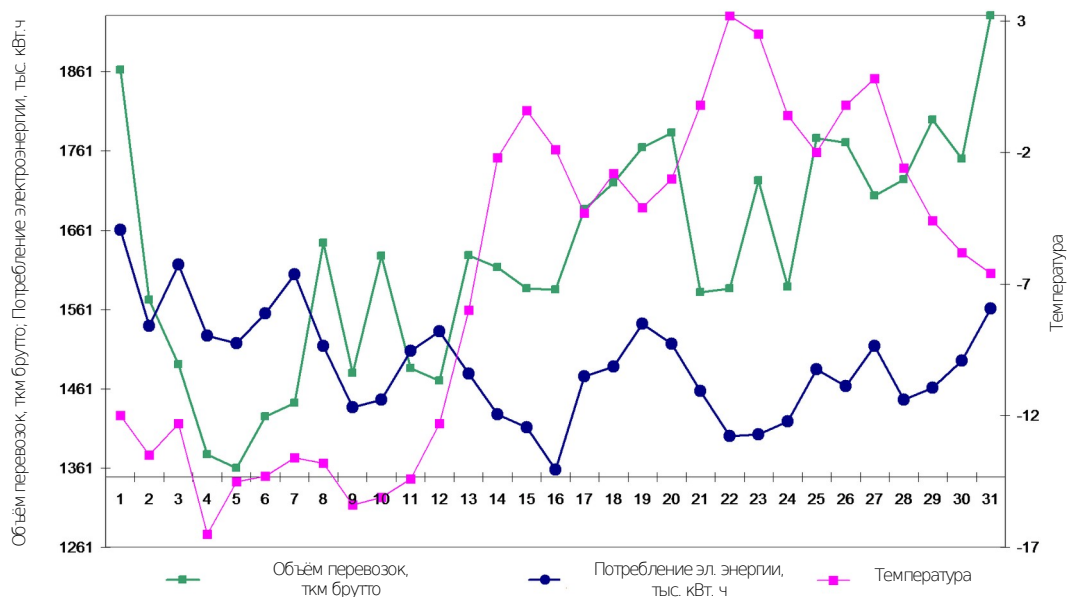


Рисунок 6.96 - Характер изменения суточных расходов электроэнергии на тягу поездов, объёмов перевозной работы и температуры тяговой подстанции «Красноармейск» за январь 2008 г.

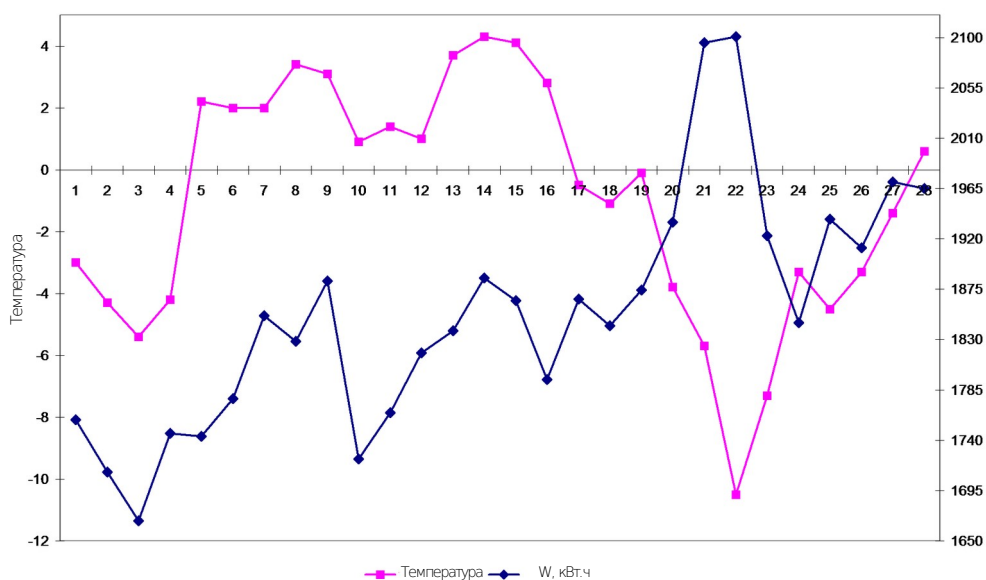


Рисунок 6.97 - Характер изменения суточных расходов электроэнергии на тягу поездов, температуры на дистанции электроснабжения «Красноармейск» в феврале 2009 г.

Выводы к разделу 6

1. Либерализация рынка электроэнергии, её закупка с ОРЭ позволила использовать гибкие принципы расчётов за электроэнергию. В данном разделе приведены научные принципы модернизации тяговой подстанции с учётом перевода тяги поездов со 2-го класса напряжения на 1-й на основе ИС МАИ. Зафиксированный экономический эффект от данного мероприятия составил 3,04 млн. грн.

2. Приведено описание прикладного программного комплекса, предназначенного для определения рациональных режимов электрифицированных участков на основе адаптированного генетического алгоритма.

3. В результате оптимизации режимов на Красноармейской дистанции электроснабжения в 2010 году было проведено (после измерений внешних характеристик тяговых подстанций и определения уровня напряжения на шинах 3,3 кВ) переключение анцапф тяговых трансформаторов в соответствии с целевой функцией (2.40), которое позволило оптимизировать расходы электроэнергии и напряжения на шинах тяговых подстанций. Общий расход электроэнергии на тягу по ЭЧ в феврале 2010 г. составил 10,889 млн кВт·ч против 11,363 млн кВт·ч в феврале 2009 г. при одинаковых показателях эксплуатационной работы. Было зафиксировано снижение потребления электроэнергии на 474 тыс. кВт·ч.

4. В разделе определены недостатки существовавших до 2006 г. нормативных инструкций по расчёту норм расхода электроэнергии на нужды стационарных потребителей:

- прежние нормативные документы по определению норм расходов электроэнергии на нужды стационарных потребителей не учитывали целый ряд структурных и технических изменений в стационарных потребителях. Так, например, при нормировании расходов электроэнергии для пассажирской службы учитывались лишь вокзалы и не учитывались пассажирские вагонные депо, пункты технического обслуживания. При

нормировании расходов электроэнергии для службы пути учитывались лишь дистанции пути.

- в нормативных документах, которые использовались во время СССР при планировании расходов электроэнергии на эксплуатационные нужды использовались номограммы, учитывающие географическую широту. Такой подход был неудобный для определения норм расхода для украинских железных дорог.

- за годы независимости коренным образом изменился характер сезонности работы железных дорог в целом.

В процессе выполнения научно-исследовательской работы разработаны усовершенствованные методологические основы и создана нормативная документация по определению норм расхода электроэнергии на нужды стационарных потребителей железных дорог Украины. При этом нормы расхода электроэнергии предложено определять по разработанным регрессионным зависимостям. Методология положена в основу методических указаний ЦЕ-0015.

5. Разработаны научные подходы и создана нормативная документация по определению норм расходов электроэнергии на собственные нужды тяговых подстанций, ПСК и ППС. Расход электроэнергии на собственные нужды РУ-3,3 кВ целесообразно определять по установленной мощности и продолжительности работы оборудования. Методами экспериментальных наблюдений установлены 4 режима работы печей ПСК и ППС. Методология детально описана в инструкции ЦЕ-0018.

6. Установлено, что причиной сверхнормативных небалансов электроэнергии является низкая загрузка измерительных трансформаторов тока и напряжения. Для подтверждения нормируемых метрологических характеристик трансформаторов напряжения согласно их классам точности 0,5 при действительных значениях мощностей и коэффициентов мощности их вторичного нагрузки было предложено мощность вторичного нагрузки обмоток и коэффициенты мощности вторичной нагрузки трансформатора

напряжения привести в соответствие с требованиями ГОСТ-1983 и ГОСТ-7746 соответственно. Для этой цели предложено подключать к вторичной обмотке трансформатора напряжения добавочное сопротивление.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Диссертационная работа есть законченной научной работой, в которой на основе теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая проблема - повышение энергетической и экономической эффективности систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока на основе развития теоретических основ энергосбережения.

Основные результаты и выводы состоят в следующем.

1. Комплексный анализ систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока железных дорог Украины показал, что они на современном этапе развития работают в условиях либерализации рынка электроэнергии, значительного износа основного силового оборудования, неудовлетворительной энергетической и экономической эффективности. Поэтому необходима разработка методов энергосбережения, которые позволяют находить решение по нескольким критериям при переменных во времени тарифах на электроэнергию, учитывая уровень надежности силового оборудования.

2. На основе системного анализа предложен метод определения потенциала энергосбережения для систем тягового электроснабжения постоянного тока, предложена его классификация. Разработанная методология определения потенциала энергосбережения позволила определить эффективность энергосберегающих мероприятий с учетом системного эффекта на основе оценок прямого снижения потерь электроэнергии в системе внешнего электроснабжения.

3. Предложенная математическая модель выбора энергосберегающих мероприятий в системах тягового электроснабжения на основе инвариантно-согласованного метода анализа иерархий позволяет системно подходить к выбору энергосберегающих мероприятий. Инвариантно-согласованный метод анализа иерархий обеспечивает согласованность экспертных оценок на всех этапах ранжирования альтернатив. Для

наглядного представления системы энергосберегающих мероприятий в системе тягового электроснабжения, определения суммарного эффекта предложена графовая модель.

4. Разработанные на основе инвариантно-согласованного метода анализа иерархий научно-методологические подходы к энергоэффективной модернизации тяговых подстанций Донецкой железной дороги позволили учитывать надежность силового оборудования, возможность использования переменных тарифов за электроэнергию на тягу поездов. Рекомендовано перейти на новую схему трансформации 35/3,3 кВ, которая позволяет осуществлять закупку электроэнергии по тарифу 1-го класса, а не по тарифу 2-го класса, как при старой схеме трансформации 35/6/3,3 кВ. Расчеты показали, что экономический эффект от оптимизации расходов на приобретение электроэнергии для тяговой подстанции Донецк составляет 3,04 млн грн в год (в ценах 2009 г.).

5. Предложенная модель надёжности системы тягового электроснабжения постоянного тока на основе структурно-логического анализа для задач управления режимами позволяет определить величину суммарного параметра потока отказов. Это даёт возможность оценивать вероятности отказа при осуществлении операций регулирования режимов.

6. Предложенная модель экономического ущерба от возможных отказов системы тягового электроснабжения позволяет определить величину ущерба для разных ситуаций, которые связаны с регулированием режимов. Для каждой элементарной ситуации данная модель предусматривает представление ущерба в виде произведения вероятности отказа на стоимость операции по восстановлению (замены) оборудования, которое утратило работоспособность. Среднюю величину указанных сомножителей рекомендовано получать в условиях эксплуатации по заводским инструкциям и калькуляциям работ соответственно.

7. На основе модернизированного метода расчёта системы электроснабжения тяги поездов с использованием потоков восстановления

предложены выражения для определения потерь мощности в элементах тяговых подстанций с учетом регулировочных воздействий. Предложены выражения для определения коэффициентов потерь мощности в контактной сети, которые могут быть использованы при организации косвенного метода контроля потерь электроэнергии в дистанциях электроснабжения.

8. Предложено определять рациональные режимы системы электроснабжения тяги поездов постоянного тока на основе адаптированного генетического алгоритма. Такой подход позволяет формировать регламент переключений оборудования фидерного участка с учётом возможности оплаты за электроэнергию по переменным во времени тарифам и надёжности силового оборудования. В результате оптимизации режимов на Красноармейской дистанции электроснабжения в 2010 году достигнуто снижение потребления электроэнергии на 474 тыс. квт·ч.

9. На основе исследования зависимостей величины потерь мощности в контактной сети от дислокации поездов и расстояния между ними установлено, что имеется существенный резерв снижения потерь в контактной сети за счет выбора рациональной дислокации поездов. Вариация потерь мощности в зависимости от дислокации и расстояния между поездами составила 3,5 раза для участка Н.Д.- Узел-Илларионово и почти 10 раз для участка Письменная-Раздоры.

10. Предложены регрессионные зависимости для определения норм расхода электроэнергии для стационарных потребителей железных дорог Украины на уровнях линейных предприятий, служб, железных дорог, главных управлений и на уровне Укрзализныци, которые используются в эксплуатационной работе предприятий железнодорожного транспорта. Предложенные научные подходы к определению норм расходов электроэнергии на собственные нужды тяговых подстанций, постов секционирования и пунктов параллельного соединения позволили планировать потребление электроэнергии.

11. Результаты диссертационной работы внедрены в Главном управлении электрификации и электроснабжения Укрзализныци, службах электроснабжения Донецкой и Львовской железных дорог, в Институте железнодорожного транспорта (г. Варшава, Польша) и в учебном процессе Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепція Державної програми реформування залізничного транспорту України. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України № 651-р від 27 грудня 2006 р. – К. : Укрзалізниця, 2006.
2. Програма енергозбереження на 1996-2010 роки. – К. : Державна адміністрація залізничного транспорту, 1996. – 20 с.
3. Мямлін С. В. Аспекти політики енергозбереження в тягових системах залізничного транспорту / С. В. Мямлін, В. Г. Кузнецов, В. Г. Сиченко // Матеріали 1-й Міжнародної науково-практ. конф. «Енергосбереження на залізничному транспорті», 2010, Мисхор. – Д. : ДНУЗТ, 2010. – С. 13-18.
4. Доманский В. Т. Система информационно-управляющего обеспечения рациональных режимов электропотребления электрифицированных линий железных дорог: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.09 / Доманский Валерий Тимофеевич; [Моск. гос. ун-т путей сообщ.]. – М., 1993. – 48 с.
5. Аржанников Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока / Б. А. Аржанников // Ж.-д. трансп. Сер. Электроснабжение железных дорог / ЭИ ЦНИИТЭИ МПС. – 1990. – № 4. – С. 17-27.
6. Быкадоров А. Л. Теоретические основы прикладных задач управления режимами работы системы электроснабжения железных дорог для АСУЭ: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.09 / Быкадоров Александр Леонович; [РГУПС]. – Ростов-на / Д., 1995. – 578 с.
7. Марквардт Г. Г. Применение теории вероятностей и вычислительной техники в системе энергоснабжения / Г. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1972. – 224 с.

8. Марквардт К. Г. Учет напряжения в тяговых сетях / К. Г. Марквардт, Г. Г. Марквардт, Г. И. Гатальский // Ж.-д. трансп. – 1977. – № 5. – С.59-60.
9. Мирошниченко Р. И. Режимы работы электрифицированных участков / Р. И. Мирошниченко. – М. : Транспорт, 1982. – 207с.
10. Малишко І. В. Основні напрямки енергозбереження на залізничному транспорті України / І. В. Малишко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2006. – Вип. 13.– С. 36-38.
11. Кузнецов В. Г. Нормування витрат електроенергії для споживачів залізничного транспорту: монографія / В. Г. Кузнецов. – Д. : Вид-во Маковецький, 2012. – 216 с.
12. Кузнецов В. Г. Оценка потерь электроэнергии в тяговой сети магистральных железных дорог / В. Г. Кузнецов, Р. С. Мицко, Д. О. Босий // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2006. – Вип. 12. – С. 36-40.
13. Иванов А. П. Стоимостная оптимизация режимов ведения грузовых поездов с учетом затрат активной и реактивной электроэнергии / А. А. Иванов, В. Г. Кузнецов // Тези доп. 6-ї Міжнародної наук. конф. «Проблеми економіки транспорту». – Д. : ДНУЗТ, 2007. – С. 175.
14. Оптимизация режимов ведения поездов по критерию минимума стоимости потребленной активной и реактивной электроэнергии / В. В. Скалозуб, В. Г. Кузнецов, Д. А. Босый, А. П. Иванов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2008. – № 4. – С. 111-114.
15. Кузнецов В. Г. Визначення факторів, що впливають на довговічність стійок залізобетонних опор контактної мережі / В. Г.

Кузнецов, О. М. Полях // Тези доп. 1-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Транселектро-2007», 2007, Місхор. – Д. : ДНУЗТ, 2007. – С. 53.

16. Спосіб визначення стану опори контактної мережі : пат. 33089 Україна: МПК (2006) В60М 1/00 / Полях О. М., Кузнецов В. Г.; заявник та власник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № u200801473; заявл. 5.2.2008; опубл. 10.6.2008; Бюл. № 11. – 4 с.

17. Матусевич А. А. Анализ надежности существующей системы телемеханики на Приднепровской железной дороге / А. А. Матусевич, В. Г. Кузнецов // Залізничний трансп. України. – 2007. – № 5. – С. 72-73.

18. Матусевич О. О. Вплив показника рівня захисту від загроз на надійність комплексу керування тяговим електропостачанням / О. О. Матусевич, В. Г. Кузнецов, В. Г. Сиченко // Залізничний трансп. України. – 2008. – № 2. – С. 32-36.

19. Кузнецов В. Г. Нормування витрат електроенергії на власні потреби тягових підстанцій / В. Г. Кузнецов, М. О. Іванов, Ф. О. Фічоряк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – № 21. – С. 61-68.

20. Кузнецов В. Г. Нормування витрат електроенергії на власні потреби постів секціонування та пунктів паралельного з'єднання постійного струму / В. Г. Кузнецов, М. О. Іванов, А. А. Матусевич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 25. – С. 30-33.

21. Сиченко В. Г. Дослідження режиму напруги в тяговій мережі змінного струму при рекуперації електроенергії / В. Г. Сиченко, В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий // Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту. – 2008. – Вип. 18, ч. 2. – С. 35-39.

22. Кузнецов В. Г. Підвищення енергетичної ефективності електротранспорту шляхом удосконалення процесу перевезень /

В. Г. Кузнецов, К. О. Калашников // Тезисы докл. Международной конф. «Трансэлектро – 2009», Мисхор. – Д. : ДПТ, 2009. – С. 54-55.

23. Кузнецов В. Г. Оптимизация графика движения поездов с учетом энергетической составляющей / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Тр. Международной научно-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: образование, наука, производство». – Ростов-на/Д. : РГУПС, 2009. – С. 362-363.

24. Кузнецов В. Г. Дослідження впливу роботи поїздного диспетчера на систему електропостачання / В. Г. Кузнецов, К. О. Калашников // Матеріали 1-й Международной научно-практ. конф. «Енергосбереження на залізничному транспорті», 2010, Мисхор. – Д. : ДНУЖТ, 2010. – С. 9-10.

25. Кузнецов В. Г. Оптимизация взаимного расположения поездов на перегоне с учетом условий электроснабжения / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Тезисы 4-й Международной научно-практ. конф. «Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте "EMC&S-R"», 2011, Чинадиево. – Д. : ДНУЖТ, 2011. – С. 48-49.

26. Кузнецов В. Г. Энергооптимальное управление потоком поездов / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Матеріали 2-й Международной научно-практ. конф. «Енергосбереження на залізничному транспорті», 2011, пгт Ждениево. – Д. : ДНУЖТ, 2011. – С. 35-37.

27. Кузнецов В. Г. Дослідження показників транспортного потоку на електрифікованій дільниці для визначення раціональних режимів системи тягового електропостачання / В. Г. Кузнецов, К. О. Калашников // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 3(82). – С. 57-61.

28. Кузнецов В. Г. Исследование зависимости потерь мощности в тяговой сети от показателей неравномерности потока

поездов / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Електрифікація транспорту. – 2011. – № 2. – С. 51-53.

29. Кузнецов В. Г. Повышение энергоэффективности электротранспорта постоянного тока путем оптимизации управления транспортным потоком / В. Г. Кузнецов // Материалы 5-й Международной научно-практ. конф. «Электрификация транспорта "Трансэлектро-2011"». – Д. : ДНУЖТ, 2011. – С. 40-41.

30. Надійність і діагностика пристроїв тягового електропостачання : навчальний посібник / В. Г. Кузнецов, О. Г. Галкін, О. В. Єфімов, О. О. Матусевич. – Д. : Вид-во Маковецький, 2009. – 248 с.

31. Исследование работы системы электроснабжения постоянного тока при пропуске сдвоенных поездов / В. Г. Дзюман, В. Г. Сыченко, В. Г. Кузнецов, Т. И. Кирилюк // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 3. – С. 74-76.

32. Шляхи підвищення ефективності експлуатації діляниць гірського профілю Львівської залізниці / І. С. Груник, В. Л. Горобець, В. Г. Сиченко, В. Г. Кузнецов // Материалы 2-й Международной научно-практ. конф. «Энергосбережение на железнодорожном транспорте», 2011, пгт Ждениево. – Д. : ДНУЖТ, 2011. – С. 21-22.

33. Оптимізація витрат Донецької залізниці при закупівлі електроенергії на тягу поїздів / С. Д. Бітюков, В. Г. Кузнецов, В. Г. Сиченко, Т. І. Кирилюк // Зб. наук. пр. Української держ. акад. залізн. трансп. – 2011. – № 122. – С. 93-100.

34. Бітюков С. Д. Оптимізація споживання електроенергії на електричному транспорті з використанням інформації автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії / С. Д. Бітюков, В. Г. Кузнецов, В. Г. Сиченко // Проблеми загальної енергетики. – 2011. – № 3(26). – С. 39-44.

35. Кузнецов В. Г. Дослідження впливу величин напруг на шинах тягових підстанцій на корозійний стан опор контактної мережі / В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк // Гірнича електромеханіка та автоматика: науково-техн. зб. – 2010. – № 84. – С. 38-45.

36. Кузнецов В. Г. Дослідження впливу величин напруг на шинах тягових підстанцій на корозійний стан опор контактної мережі / В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк // Матеріали 4-й Международной научно-практ. конф. «Электрификация железнодорожного транспорта "Трансэлектро-2010"», Мисхор. – Д. : ДНУЖТ, 2010. – С. 96.

37. Кузнецов В. Г. Визначення втрат енергії в системі тягового електропостачання / В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк // Матеріали 1-й Международной научно-практ. конф. «Энергосбережение на железнодорожном транспорте», 2010, Мисхор. – Д. : ДНУЖТ, 2010. – С. 8.

38. Бітюков С. Д. Проблеми небалансів електроенергії в системі тягового електропостачання / С. Д. Бітюков, В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк // Тезиси 4-й Международной научно-практ. конф. «Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте "EMC&S-R"», 2011, Чинадиево. – Д. : ДНУЖТ, 2011. – С. 14-15.

39. Барна А. І. Дослідження небалансів електроенергії на Львівській залізниці / А. І. Барна, В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк // Матеріали 2-й Международной научно-практ. конф. «Энергосбережение на железнодорожном транспорте», 2011, пгт Ждениево. – Д. : ДНУЖТ, 2011. – С. 8.

40. Кузнецов В. Г. Дослідження небалансів електроенергії на тягових підстанціях / В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Ч. 2. Силова електроніка та енергоефективність. – 2011. – С. 181-186.

41. Кузнецов В. Г. Экспериментальне дослідження «умовних втрат» електроенергії в тяговій мережі / В. Г. Кузнецов, Ю. М. Сергатий, Т. І. Кирилюк // Восточноевропейский журн. передовых технологий. – 2011. – № 4/8(52). – С. 29-33.
42. Кузнецов В. Г. Аналіз динаміки зміни «умовних» втрат електричної енергії в тяговій мережі / В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк, Ю. М. Сергатий // Електрифікація транспорту. – 2011. – № 1. – С. 42-45.
43. Кузнецов В. Г. Экспериментальная проверка величин «условных потерь» электроэнергии в контактной сети / В. Г. Кузнецов, Ю. Н. Сергатий // Материалы 2-й Международной научно-практ. конф. «Энергосбережение на железнодорожном транспорте», 2011, пгт Ждениево. – Д. : ДНУЖТ, 2011. – С. 38-40.
44. Кузнецов В. Г. Визначення показників потоку поїздів, які обмежують пропускну здатність ділянки за умовами електропостачання / В. Г. Кузнецов, Г. Я. Мозолевич, К. А. Калашников // Гірнича електромеханіка та автоматика: науково-техн. зб. – 2011. – № 87. – С. 47-49.
45. Кузнецов В. Г. Инвариантно-согласованный метод анализа иерархий в задачах планирования энергосберегающих мероприятий системы электроснабжения железнодорожного транспорта / В. Г. Кузнецов, В. И. Шинкаренко // Системні технології. – 2011. – № 6 (77). – С. 77-85.
46. Кузнецов В. Г. Исследование факторов, определяющих величину потерь мощности в тяговой сети / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХП»: зб. наук. пр. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2012. – № 18. – С. 62-67.
47. Кузнецов В. Г. Дослідження впливу показників транспортного потоку на втрати електроенергії в тяговій мережі / В. Г. Кузнецов, О. М. Полях, А. О. Полях // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2011. – № 36. – С. 84-87.

48. Кузнецов В. Г. Оценка потенциала энергосбережения систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока / В. Г. Кузнецов, Б. А. Костюковский // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». – 2012. – № 26. – С. 109-116.

49. Кузнецов В. Г. Методические подходы к оценке общей энерго-экологической эффективности реализации мероприятий по снижению потребления электроэнергии на железнодорожном транспорте / В. Г. Кузнецов, Б. А. Костюковский, С. В. Шульженко // Материалы 3-й Международной научно-практ. конф. «Энергосбережение на железнодорожном транспорте». – Д. : ДНУЖТ, 2012. – С. 39-40.

50. Кузнецов В. Г. Проблеми використання прогресивних методів закупівлі електроенергії на Львівській залізниці / В. Г. Кузнецов, Ф. О. Фічоряк // Материалы 3-й Международной научно-практ. конф. «Энергосбережение на железнодорожном транспорте». – Д. : ДНУЖТ, 2012. – С. 40-42.

51. Кузнецов В. Г. Расчет рациональных режимов работы тяговых подстанций постоянного тока на основе генетического алгоритма / В. Г. Кузнецов, В. И. Шинкаренко, Н. В. Коваленко // Материалы 3-й Международной научно-практ. конф. «Энергосбережение на железнодорожном транспорте». – Д. : ДНУЖТ, 2012. – С. 42-44.

52. Кузнецов В. Г. Удосконалення непрямого способу визначення втрат електричної енергії в тяговій мережі / В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // Материалы 3-й Международной научно-практ. конф. «Энергосбережение на железнодорожном транспорте». – Д. : ДНУЖТ, 2012. – С. 37-38.

53. Костюковский Б. А. Модель выбора перечня мероприятий по повышению энергоэффективности при наличии ограничений на инвестиции и альтернативных мероприятий / Б. А. Костюковский, Н. П.

Иваненко, В. Г. Кузнецов // Материалы 3-й Международной научно-практ. конф. «Энергосбережение на железнодорожном транспорте». – Д. : ДНУЖТ, 2012. – С. 31.

54. Кузнецов В. Г. Расчет рациональных режимов работы тяговых подстанций постоянного тока на основе генетического алгоритма / В. Г. Кузнецов, В. И. Шинкаренко, Н. В. Коваленко // Гірничя електромеханіка та автоматика: науково-техн. зб. – 2012. – № 88. – С. 14-20.

55. Кузнецов В. Г. Эффективность параллельной работы трансформаторов тяговых подстанций участков переменного тока / В. Г. Кузнецов // Матеріали Першої міжнародної науково-практ. конф. «Науковий потенціал світу – 2004». Т. 60. Технічні науки. – Д. : Наука і освіта, 2004. – С. 24-25.

56. Кузнецов В. Г. Статистический подход к определению потерь электроэнергии в трансформаторах тяговых подстанций переменного тока / В. Г. Кузнецов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2005. – № 6. – С. 124-126.

57. Кузнецов В. Г. Моделирование процесса изнашивания контактного провода / В. Г. Кузнецов // Матеріали 8-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Наука і освіта-2005». Т. 60. Техніка. – Д. : Наука і освіта, 2005. – С. 26-28.

58. Кузнецов В. Г. О подходе к определению оптимальной площади сечения контактной сети на участках электрифицированных железных дорог / В. Г. Кузнецов // Вісн. Хмельницького нац. ун-ту. – 2006. – Вип. 2 Т.2. – С. 67-70.

59. Кузнецов В. Г. Визначення витрати електроенергії за нормою для стаціонарних споживачів залізниць / В. Г. Кузнецов // Тези 66-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – 2006. – Д. : ДНУЗТ, 2006. – С. 143.

60. Кузнецов В. Г. Визначення витрати електроенергії за нормою для стаціонарних споживачів на основну роботу залізниць / В. Г. Кузнецов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – № 14. – С. 55-58.

61. Кузнецов В. Г. Нормування витрат електроенергії на власні потреби тягових підстанцій залізниць України / В. Г. Кузнецов // Тези доп. 1-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Транселектро-2007», Місхор. – Д. : ДНУЗТ, 2007. – С. 42.

62. Кузнецов В. Г. Критерии оптимальной параллельной работы силовых трансформаторов для тяговых подстанций / В. Г. Кузнецов // Вісн. Приазовського держ. техн. ун-ту. – 2008. – № 18, ч. 2. – С. 65-67.

63. Кузнецов В. Г. Оцінка втрат напруги при паралельній роботі тягових трансформаторів / В. Г. Кузнецов // Гірничя електромеханіка та автоматика: науково-техн. зб. – 2008. – № 80. – С. 18-22.

64. Кузнецов В. Г. Підвищення енергетичної ефективності залізниць / В. Г. Кузнецов // Зб. матеріалів Міжнародної науково-практ. конф. «Транспортні зв'язки. Проблеми та перспективи». – Д. : ДНУЗТ, 2008. – С. 71.

65. Кузнецов В. Г. Про оптимальний коефіцієнт завантаження силових трансформаторів / В. Г. Кузнецов // Тези доп. 2-ї Міжнародної науково-практ. конф. «Транселектро-2008», Місхор. – Д. : ДНУЗТ, 2008. – С. 43.

66. Кузнецов В. Г. Расчет системы тягового электроснабжения с применением теории потоков восстановления / В. Г. Кузнецов // Тезисы докл. Международной научн. конф. «Трансбалтика – 2009». – Вильнюс : Вильнюсский техн. ун-т им. Гедиминаса, 2009. – С. 35-36.

67. Кузнецов В. Г. Розрахунок системи тягового електропостачання із застосуванням теорії потоків відновлення / В. Г.

Кузнецов // Тезисы докл. Международной конф. «Трансэлектро – 2009», Місхор. – Д. : ДІТ, 2009. – С. 55-56.

68. Кузнецов В. Г. Про коефіцієнт завантаження силових трансформаторів тягових підстанцій залізниць / В. Г. Кузнецов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 26. – С. 56-59.

69. Кузнецов В. Г. Задача определения условий рационального распределения мощности тяговой подстанции постоянного тока / В. Г. Кузнецов // Восточноевропейский журн. передовых технологий. – 2011. – № 2/8(50). – С. 26-31.

70. Кузнецов В. Г. Управление распределением мощности тяговых подстанций постоянного тока при расчетах за электроэнергию по оптовым ценам / В. Г. Кузнецов // Тезисы Международной научно-практ. конф. «Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании». – Д. : ДНУЖТ, 2011. – С. 17-18.

71. Кузнецов В. Г. Подходы к оценке потенциала энергосбережения в системах электроснабжения железных дорог / В. Г. Кузнецов // Материалы 5-й международной научно-практ. конф. «Электрификация транспорта "Трансэлектро-2011"». – Д. : ДНУЖТ, 2011. – С. 38-40.

72. Кузнецов В. Г. Учет надежности систем тягового электроснабжения при регулировании их режимов / В. Г. Кузнецов // Восточноевропейский журн. передовых технологий. – 2012. – № 3/8 (57). – С. 20-24.

73. Kuzniecowa W. G. Problem zasilania energii w systemach zasilania trakcji elektrycznej / W. G. Kuzniecowa // Infrastruktura transportu. – 2012. – № 3. –Р. 38-40.

74. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2010 році. – К. : Державна адміністрація залізничного транспорту, 2011. – 244 с.

75. Маслов Г. П. Электроснабжение железных дорог : конспект лекций. Ч. 1 / Г. П. Маслов, Г. С. Магай, О. А. Сидоров. – Омск : ОмГУПС, 2006. – 48 с.
76. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.
77. Железко Ю. С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, О. В. Савченко. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 280 с.
78. Черемисин В. Т. Контроль удельного расхода и «условных» потерь электроэнергии / В. Т. Черемисин, С. И. Петров, А. Г. Зверев // Ж.-д. трансп. – 2010. – № 10. – С. 47-50.
79. Кузнецов В. Г. Дослідження закономірностей зміни «умовних» втрат в тяговій мережі / В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк, Ю. М. Сергатий // Тезиси 5-й Міжнародної науково-практ. конф. «Безопасность и электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте "ЕМС"». – Д. : ДНТ, 2012. – С. 45-46.
80. Железко Ю. С. Инструкция по нормированию, анализу и снижению потерь электроэнергии в электрических сетях энергоснабжающих организаций / Ю. С. Железко. – М. : РАО ЕЭС России, 2002. – 53 с.
81. Дослідження наднормативних небалансів обліку електричної енергії на тягових підстанціях Донецької залізниці для тягової підстанції Штерівка і розробка рекомендацій по їх приведенню до нормативних вимог : звіт з НДР / кер. В. Г. Кузнецов. – ДР 0111U003606 ; – Д. : ДНУЗТ, 2011. – 116 с.
82. Сопильняк В. Т. Погрешности измерительных трансформаторов тока: исследования, особенности, рекомендации / В. Т. Сопильняк // Новости электротехники. – 2004. – № 6(30). – С. 13-17.

83. Воротницкий В. Э. Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях: учебно-методическое пособие / В. Э. Воротницкий, М. А. Калинкина. – М. : ИПК госслужбы, 2003. – 64 с.
84. Нефедьев Д. Н. Точность учета электроэнергии искажают непереносимые измерительные трансформаторы / Д. Н. Нефедьев // Новости электротехники. – 2003. – № 3 (21). – С. 15-18.
85. Пирогов В. Н. О повышении достоверности учета и анализа допустимых и фактических небалансов электроэнергии на электростанциях, подстанциях и в сетях / В. Н. Пирогов, И. П. Старцев, И. П. Парцахашвили // Электрические станции. – 2003. – № 1. – С. 65-67.
86. Методичні вказівки щодо визначення норм витрат електроенергії для стаціонарних споживачів залізниць. ЦЕ-0015: затв.: Наказ Укрзалізниці № 545-Ц від 28.12.2006 р. / розроб. В. Т. Доманський, В. Г. Кузнецов. – К. : Мін-во трансп. України; Укрзалізниця, 2007. – 108 с.
87. Номенклатура витрат по основній діяльності залізниць України. – К. : Транспорт України, 1996. – 134 с.
88. Стратегія розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 р. № 1555-р. – К. : КМУ, 2009.
89. Котельников А. В. Энергетическая стратегия железных дорог России / А. В. Котельников // Железные дороги мира. – 2005. – № 2. – С. 16-23.
90. Доманский В. Т. Энергетическая стратегия железных дорог / В. Т. Доманский, В. В. Корниенко, А. В. Котельников // Столичный экспресс. – 2006. – № 7. – С. 24-28.
91. Розробка концепції енергетичної стратегії Укрзалізниці на період до 2010 р. та на перспективу до 2020 р.: звіт з НДР / кер. В. Г. Сиченко. – ДР 10106U005700; – Д. : ДНУЗТ, 2006. – 48 с.

92. Корнієнко В. В. Електрифікація залізниць. Світові тенденції і перспективи (аналітичний огляд) / В. В. Корнієнко, О. В. Котельников, В. Т. Доманський. – К. : Транспорт України, 2004. – 198 с.
93. Інтелектуальні задачі та алгоритми рішення їх для управління приладами електропостачання електрифікованих залізниць: звіт з НДР / кер. В. Т. Доманський. – ДР 0199U001432; – Д. : ДДТУЗТ, 1999. – 91 с.
94. Розробка технології енергооптимального керування пристроями електропостачання електрифікованими ділянками залізниць: звіт з НДР / кер. В. Т. Доманський. – ДР 0101U002583; – Д. : ДДТУЗТ, 2001. – 150 с.
95. Підвищення енергетичної ефективності та економічності роботи електротягових систем: звіт з НДР / кер. В. Т. Доманський. – ДР 0103U005112; Інв. 0401.00742081. – Д. : ДНУЗТ, 2005. – 117 с.
96. Підвищення надійності пристроїв контактної мережі електрифікованих залізниць: звіт з НДР / кер. В. Г. Сиченко. – ДР 10107U002523; – Д. : ДНУЗТ, 2007. – 142 с.
97. Корниенко В. В. Энергетическая безопасность железных дорог и стратегия их развития / В. В. Корниенко, А. В. Котельников, В. Т. Доманский // Залізничний трансп. України. – 2010. – № 6. – С. 5-9.
98. Концепція функціонування та розвитку оптового ринку електричної енергії України: затв. Постановою Кабінету Міністрів України від 16 листопада 2002 р. № 1789. – К., 2002. – 75 с.
99. The influences of climatic factors on electricity prices in liberalized market in Finland / K. Laitinen, J. Hovila, T. Mannila, L. Korpinen // Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2000. Proceedings. DRPT 2000. Intern. Conf. on. – 2000. – P. 544-548.
100. Mandal P. Neural network models to predict short-term electricity prices and loads / P. Mandal, T. Senjyu, T. Funabashi // Industrial

Technology, 2005. ICIT 2005. IEEE Intern. Conf. on. – 14-12-2005. – P. 164-169.

101. Povh M. Modeling Long-Term Electricity Forward Prices / M. Povh, S. E. Fleten // Power Systems, IEEE Transactions on. – 2009. – № 4. – P. 1649-1656.

102. Rothwell G. Electricity Economics: Regulation and Deregulation / G. Rothwell, T. Gomez. – N. Y. : Wiley-IEEE Press, 2003. – 304 p.

103. Ruibal C. M. Forecasting the Mean and the Variance of Electricity Prices in Deregulated Markets / C. M. Ruibal, M. Mazumdar // Power Systems, IEEE Transactions on. – 2008. – № 1. – P. 25-32.

104. Yunhe H. Modeling of electricity prices / H. Yunhe, H. Yang // Green Circuits and Systems (ICGCS), 2010 Intern. Conf. on. – 21-6-2010. – P. 549-554.

105. Zhengjun L. Electricity price forecasting model based on chaos theory / L. Zhengjun, Y. Hongming, L. Mingyong // Power Engineering Conference, 2005. IPEC 2005. The 7th Intern. – 29-11-2005. – P. 1-449.

106. Звіт про діяльність Національної комісії регулювання електроенергетики України у 2010 році: затв. Постановою НКРЕ України № 684 від 21.04.2011. – К. : НКРЕ, 2011.

107. Курган М. Б. Впровадження ресурсозберігаючих технологій при розмежуванні вантажного і пасажирського руху / М. Б. Курган // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 34. – С. 94-102.

108. Сиромаха В. Н. Автоматизация диспетчерского управления электроснабжением железнодорожного транспорта: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Сиромаха Валерий Николаевич; [МГУПС]. – М., 2009. – 24 с.

109. Розробка наукових основ раціональних режимів системи тягового електропостачання: звіт з НДР / кер. В. Г. Сиченко. – ДР 10110U000897; – Д. : ДНУЗТ, 2011. – 188 с.
110. Журахівський А. В. Оптимізація режимів електроенергетичних систем : навчальний посібник / А. В. Журахівський, Н. Р. Засідкович, А. Я. Яцейко. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2009. – 140 с.
111. Про енергозбереження: Закон України, введений в дію Постановою ВР № 75/94-ВР від 01.07.94. – К. : ВР, 1994.
112. Ковалко М. П. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / М. П. Ковалко, С. П. Денисюк, А. К. Шидловський. – К. : УЕЗ, 1998. – 506 с.
113. Комплексна державна програма енергозбереження України. Схвалена постановою Кабінету Міністрів України від 5 лютого 1997 р. № 148. – К. : Держкоменергозбереження, 1997. – 234 с.
114. Державна цільова економічна програма енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2015 роки: із змінами затв. постановою Кабінету Міністрів України від 1 березня 2010 р. № 243 та від 25.01.2012 № 105. – К., 2010. – 22 с.
115. Жовтянський В. А. Стратегія енергозбереження в Україні. Аналітично-довідкові матеріали: в 2 т. / В. А. Жовтянський, М. М. Кулик, Б. С. Стогній. – К. : Академперіодика, 2006. – Т. 1. Загальні засади енергозбереження. – 510 с.
116. Симборський А. І. Потенціал енергозбереження у цементній промисловості / А. І. Симборський, В. В. Станиціна // Проблеми загальної енергетики. – 2010. – № 3(23). – С. 25-29.
117. Євтухова Т. О. Структурно-функціональні особливості побудови системи управління енергозбереженням у ЖКГ України / Т. О.

Євтухова // Проблеми загальної енергетики. – 2010. – № 2(22). – С. 39-44.

118. Марикин А. Н. Управляемые системы тягового электроснабжения постоянного тока для скоростных участков / А. Н. Марикин, В. В. Волчанинов // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2005. – Т. 12, вып. 2. – С. 434-435.

119. Марикин А. Н. Новые технологии в сооружении и реконструкции тяговых подстанций: учеб. пособ. для вузов ж.-д. трансп. / А. Н. Марикин, А. В. Мизинцев. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 220 с.

120. Доманська Г. А. Енергозберігаючі технології тягового електропостачання залізниць з урахуванням режимів роботи живлячих їх енергосистем: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 / Доманська Галина Анатоліївна; [НТУ ХП]. – Х., 2008. – 22 с.

121. Доманский В. Т. Экспериментальное определение потерь энергии в электротяговых сетях постоянного тока / В. Т. Доманский, В. Ф. Блохин, Г. А. Доманская // Вестн. ВНИИЖТ. – 1990. – № 5. – С. 29-32.

122. Доманский В. Т. Использование сетевых моделей для имитационного моделирования системы диспетчерского контроля и управления устройствами электроснабжения / В. Т. Доманский, А. В. Гордеев, А. Ю. Молчанов // Вестн. ВНИИЖТ. – 1993. – № 7. – С. 38-48.

123. Доманский В. Т. Расчет системы электроснабжения участков разных номинальных напряжений / В. Т. Доманский, А. В. Андреевских, Г. А. Доманская // Вестн. ВНИИЖТ. – 1990. – № 2. – С. 19-23.

124. Доманский В. Т. Энергооптимальная технология перевозочного процесса / В. Т. Доманский, В. П. Кручина, А. П. Юшкевич // Ж.-д. трансп. – 1993. – № 5. – С. 6-13.

125. Доманский В. Т. Проблемы совершенствования управления перевозочным процессом на основе развития информационных технологий / В. Т. Доманский, В. Б. Землянов, С. Ю. Цейтлин // Залізничний трансп. – 1998. – № 1. – С. 23-27.

126. Руководство по эксплуатации ДЯИМ.4111 52.018 РЭ. – М. : Эльстер Метроника, 2007. – 78 с.

127. Счетчик электрической энергии трехфазный многофункциональный Альфа А1800: Паспорт. – М. : Эльстер Метроника, 2007. – 35 с.

128. Костін М. О. Зниження непродуктивних втрат електроенергії – найважливіша задача підвищення ефективності електроспоживання системами електричної тяги / М. О. Костін, П. Є. Михаліченко, А. В. Петров // Залізничний трансп. України. – 2009. – № 2. – С. 43-44.

129. Петров А. В. Непродуктивні втрати електроенергії в тяговому електропостачанні системи постійного струму / А. В. Петров, М. О. Костін // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – С. 106-110.

130. Петров А. В. Додаткові втрати електроенергії в тяговій мережі системи електричної тяги постійного струму / А. В. Петров, А. І. Кійко, О. Г. Шейкіна // Гірничя електромеханіка та автоматика: науково-техн. зб. – 2011. – № 87. – С. 27-30.

131. Доманский В. Т. Автоматизированная система контроля и учета электроэнергии на дистанциях электроснабжения / В. Т. Доманский, В. Г. Кузнецов, С. Я. Карпенко // Залізничний трансп. України. – 2002. – № 4. – С. 33-36.

132. Бардушко В. Д. Алгоритмы контроля и оптимизации параметров системы тягового электроснабжения / В. Д. Бардушко. – Иркутск : ИрИИТ, 2000. – 108 с.

133. Бардушко В. Д. Анализ и параметрический синтез систем тягового электроснабжения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01 / Бардушко Валерий Данилович; [ИрГУПС]. – Иркутск, 2001.

134. Бардушко В. Д. Аналитический метод расчета оптимальных мест размещения пунктов параллельного соединения контактной сети / В. Д. Бардушко // Информационные технологии контроля транспортных средств. – 2000. – Вып. 6. – С. 145-160.

135. Доманская Г. А. Энергосберегающие технологии управления режимами работы тягового электроснабжения / Г. А. Доманская // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». – 2007. – № 36. – С. 114-120.

136. Доманская Г. А. Оценка перетоков мощности и выбор энергосберегающих схем питания / Г. А. Доманская // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». – 2007. – № 37. – С. 106-110.

137. Корниенко В. В. Методы расчета и моделирования режимов работы систем тягового электроснабжения и питающих их энергосистем / В. В. Корниенко, Г. А. Доманская // Восточноевропейский журн. передовых технологий. – 2007. – № 5/3 (29). – С. 31-37.

138. Проектирование систем энергоснабжения электрических железных дорог: учеб. пособие для вузов / Б. А. Бесков, Б. Е. Герониус, В. Н. Давыдов и др. – М. : Трансжелдориздат, 1963. – 471 с.

139. Землянов В. Б. Енергооптимальні технології аналізу та регулювання електроспоживання на тягу поїздів: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.09 / Землянов Володимир Борисович; [ДНУЗТ]. – Д., 2000. – 23 с.

140. Землянов В. Б. Интегрированная информационная технология перевода тяговых подстанций на многотарифную оплату за

потребленную электроэнергию / В. Б. Землянов, В. В. Скалозуб, В. В. Доманский // Залізничний трансп. – 2000. – № 3. – С. 41-43.

141. Скалозуб В. В. Ресурсозберігаючі методи управління тягою поїздів і удосконалення конструкцій рухомого складу: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / Скалозуб Владислав Васильович; [ДНУЗТ]. – Д., 2003. – 37 с.

142. Блохин Е. П. Анализ и моделирование компонентов системы поезд – электротяговая сеть / Е. П. Блохин, В. В. Скалозуб // Транспорт: зб. наук. пр. – 2001. – Вип. 9. – С. 23-30.

143. Скалозуб В. В. Комплексные задачи выбора режимов ведения поезда по показателю стоимости электроэнергии / В. В. Скалозуб // Транспорт: зб. наук. пр. – 2002. – Вип. 12. – С. 148-157.

144. Скалозуб В. В. Комплексные задачи выбора режимов ведения поезда по показателю стоимости электроэнергии / В. В. Скалозуб // Транспорт: зб. наук. пр. – 2002. – Вип. 12. – С. 148-157.

145. Скалозуб В. В. Исследование режимов ведения поездов с учетом переменных тарифов оплаты электроэнергии / В. В. Скалозуб, Г. В. Евдомах, В. И. Дробаха // Системні технології. – 2003. – № 3(26). – С. 142-150.

146. Скалозуб В. В. Развитие методов многоуровневого моделирования и управления в условиях неопределённости / В. В. Скалозуб, С. Ю. Разумов, В. Вл. Скалозуб // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 24. – С. 172-178.

147. Скалозуб В. В. Многокритериальные задачи анализа транспортных сетей с учетом специализированных свойств носителей потоков / В. В. Скалозуб, Л. А. Паник // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – № 3. – С. 79-84.

148. Левин Д. Ю. Оптимизация оперативного управления перевозочным процессом в условиях развития диспетчерских центров:

автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.08 / Левин Дмитрий Юрьевич; [МГУПС]. – М., 2009. – 48 с.

149. Левин Д. Ю. Оптимизация потоков поездов / Д. Ю. Левин. – М. : Транспорт, 1988. – 175 с.

150. Каялов Г. М. Вероятностные характеристики потока поездов на магистральных железных дорогах / Г. М. Каялов, В. Н. Отпущенников,

В. М. Гордеев // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1967. – №3. – С.38-40.

151. Почаевец Э. С. Вероятностные характеристики реального потока поездов / Э. С. Почаевец, Ю. Б. Манусов // Деп. ЦНИИ ТЭИ. РЖ железнодорожный транспорт. – 1972. – № 11.

152. Почаевец Э. С. Вероятностные характеристики реального потока поездов / Э. С. Почаевец, Ю. Б. Манусов // Деп. ЦНИИ ТЭИ. – 1971. – №11. – С. 30.

153. Ребец В. И. Оптимизация оперативного управления / В. И. Ребец,

Д. Ю. Левин // Ж.-д. трансп. – 2003. – № 1. – С. 14-23.

154. Статистический анализ режимов напряжения тяговых подстанций / В. М. Лебедев, Ю. Б. Манусов, Э. С. Почаевец, Я. Е. Савич // Тр. Моск. ин-та инженеров ж.-д. трансп. – 1979. – № 636. – С. 102-106.

155. Статистические характеристики подстанционных и фидерных токов / Ю. Б. Манусов, Э. С. Почаевец, Я. Е. Савич, Е. Д. Хмельницкий // Тр. Моск. ин-та инженеров ж.-д. трансп. – 1980. – Вып. 636. – С. 107-111.

156. Почаевец В. С. Введение в специальность «Электроснабжение железных дорог» / В. С. Почаевец. – М. : Маршрут, 2005. – 139 с.

157. Почаевец В. С. Автоматизированные системы управления устройствами электроснабжения железных дорог / В. С. Почаевец. – М. : Маршрут, 2003. – 318 с.
158. Почаевец Э. С. Обобщенные методы анализа режимов системы тягового электроснабжения: учебное пособие / Э. С. Почаевец. – Д. : ДИИТ, 1981. – 55 с.
159. Почаевец Э. С. Анализ режимов системы электроснабжения методами теории потоков случайных событий / Э. С. Почаевец, Я. Е. Савич // Тр. Ростовского ин-та инж. ж.-д. трансп. – 1981. – С. 67-71.
160. Почаевец Э. С. Исследование оптимального тягового режима электроподвижного состава / Э. С. Почаевец // Сб. научн. тр. МИИТа. – 1968. – Вып. 282. – С. 52-64.
161. Почаевец Э. С. К вопросу оптимального управления движением поезда / Э. С. Почаевец // Сб. научн. тр. МИИТа. – 1967. – Вып. 250. – С. 32-40.
162. Почаевец Э. С. Расчет оптимальных программ автоматического ведения поезда: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Почаевец Эдуард Степанович; [МИИТ]. – М., 1967. – 24 с.
163. Почаевец Э. С. Регрессионный анализ и оптимизация расхода электроэнергии поездов метрополитена / Э. С. Почаевец // Тр. ВЗИИТ. – 1981. – Вып. 115. – С. 104-111.
164. Почаевец Э. С. Анализ режимов системы электроснабжения методами теории потоков случайных событий / Э. С. Почаевец, Я. Е. Савич // Тр. РИИЖТ. – 1981. – Вып. 175. – С. 67-71.
165. Левин Д. Ю. Теория оперативного управления перевозочным процессом: монография / Д. Ю. Левин. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 625 с.

166. Гетьман Г. К. Применение методов векторной оптимизации для решения задач тяговых расчетов / Г. К. Гетьман // Вісн. Харківського держ. політехн. ун-ту: зб. наук. пр. – 1999. – Вип. 62. – С. 12-19.

167. Гетьман Г. К. Определение оптимальной по минимуму расхода энергии на движение поезда мощности локомотива / Г. К. Гетьман // Напівпровідникові та мікропроцесорні пристрої в електроенергетичних системах транспорту: зб. наук. пр. – 2000. – Вип. 39. – С. 41-48.

168. Гетьман Г. К. Наукові основи визначення оптимального ряду потужностей вантажних електровозів для залізниць України: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.09 / Гетьман Геннадій Кузьмич; [ДДТУЗТ]. – Д., 2001. – 36 с.

169. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги / Г. К. Гетьман. – Д. : Изд-во Маковецкий, 2011. – 362 с.

170. Гетьман Г. К. Универсальные тягово-энергетические характеристики электроподвижного состава / Г. К. Гетьман // Придніпровський наук. вісн. (технічні науки). – 1998. – № 105 (172). – С. 46-55.

171. Быкадоров А. Л. Учет потерь электроэнергии на электрифицированных участках переменного тока / А. Л. Быкадоров, В. Т. Доманский // Ж.-д. трансп. – 1980. – № 4. – С. 57-59.

172. Быкадоров А. Л. Сравнительная оценка косвенных способов измерения потерь энергии в контактной сети переменного тока / А. Л. Быкадоров, В. Т. Доманский // Тр. Ростовского ин-та инженеров ж.-д. трансп. – 1979. – Вып. 153. – С. 20-27.

173. Быкадоров А. Л. Определение межпоездных интервалов оперативным моделированием поездной ситуации на имитационной модели / А. Л. Быкадоров, Е. А. Черветнова // Автоматизированные системы электроснабжения ж. д.: межвузовский сб. научн. тр. – 1994. – Вып. 96. – С. 197-199.

174. Митрофанов А. Н. Моделирование процессов прогнозирования и управления электропотреблением тяги поездов / А. Н. Митрофанов. – Самара : СамГАПС, 2005. – 168 с.
175. Аржанников Б. А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. – 207 с.
176. Gonzalez D. Optimal design of a D. C. railway power supply system / D. Gonzalez, F. Manzanedo // Electric Power Conference, 2008. EPEC 2008. IEEE Canada. – 6-10-2008. – P. 1-6.
177. He W. The significance and technical-economic benefits of developing railway electrification in China / W. He // Main Line Railway Electrification, 1989., Intern. Conf. on. – 1989. – P. 27-30.
178. Hui-Jen C. Optimal Expansion Planning of Traction Substations for an Electrified Mass Rapid Transit System / C. Hui-Jen, C. Chao-Shun, L. Chia-Hung, C. Jun-Yu, H. Chin-Yin // Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. Intern. Conf. on. – 22-10-2006. – P. 1-7.
179. Hui-Jen C. Optimization of inverter placement for mass rapid transit systems using genetic algorithm / C. Hui-Jen, C. Chao-Shun, L. Chia-Hung, C. Shi-Hong // Transmission and Distribution Conf. and Exhibition : Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES. – 2005. – P. 1-6.
180. Miyatake M. Numerical analyses of minimum energy operation of multiple trains under DC power feeding circuit / M. Miyatake, H. Ko // Power Electronics and Applications, 2007 European Conf. on. – 2-9-2007. – P. 1-10.
181. Rull-Duran J. Power electronics improving 3-Wire DC railways electrification / J. Rull-Duran, J. Bergas-Jane, S. Galceran-Arellano, A. Sumper, J. Coves-Moreno // Power Electronics and Applications, 2009. EPE'09. 13th European Conf. on. – 8-9-2009. – P. 1-7.

182. Sagareli S. Traction power systems reliability concepts / S. Sagareli // Rail Conf., 2004. Proceedings of the 2004 ASME/IEEE Joint. – 6-4-2004. – P. 35-39.

183. White R. D. AC/DC railway electrification and protection / R. D. White // Electric Traction Systems, 2008 IET Professional Development course on. – 3-11-2008. – P. 258-305.

184. Yang Y. Reliability evaluation of a bulk power system for the traction power supply system of a high-speed railway / Y. Yang, J. Wu, J. Xie // Reliability and Maintainability Symposium, 2009. RAMS 2009. Annual. – 26-1-2009. – P. 423-429.

185. Савич Я. Е. Оптимизация напряжений на шинах тяговых подстанций постоянного тока: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 / Я. Е. Савич; [МИИТ]. – М., 1985. – 166 с.

186. Аржанников Б. А. Совершенствование системы электроснабжения постоянного тока на основе автоматического регулирования напряжения тяговых подстанций: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.09 / Аржанников Борис Алексеевич; [УрЭМИИТ]. – Свердловск, 1991. – 432 с.

187. Аржанников Б. А. Автоматическое регулирование напряжения в системе электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ: курс лекций / Б. А. Аржанников, Л. А. Фролов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2009. – 48 с.

188. Аржанников Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока: монография / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург : УрГУПС, 2010. – 176 с.

189. Клейнерман М. И. Автоматическое регулирование напряжения в контактной сети / М. И. Клейнерман // Тр. УЭМИИТ. – 1966. – Вып.13. – С. 3-15.

190. Режимы работы магистральных электровозов / под ред. О. А. Некрасова. – М. : Транспорт, 1983. – 231с.
191. Рышковский Н. Я. Необходимые условия улучшения работы устройств энергоснабжения на электрических линиях / Н. Я. Рышковский // Ж.-д. трансп. – 1957. – № 3. – С. 39-42.
192. Мирошниченко Р. И. Технические требования к напряжению в системе электрической тяги / Р. И. Мирошниченко // Совершенствование режимов работы устройств энергоснабжения с применением ЭЦВМ: сб. науч. тр. ВНИИЖТ. – 1972. – Вып. 476. – С. 7-28.
193. Эффективность регулирования напряжения на тяговых подстанциях / И. Г. Моченов, Г. В. Дмитриевский, Л. С. Панфиль, В. Я. Пахомов, Н. Н. Волков // Ж.-д. трансп. – 1964. – № 11. – С. 72-75.
194. Варенцов В. М. Напряжение в контактной сети и расход электроэнергии / В. М. Варенцов, В. С. Варман, Ю. М. Порошин // Ж.-д. трансп. – 1988. – № 8. – С. 43-44.
195. Марикин А. Н. Стабилизация напряжения на токоприемниках подвижного состава электрифицированных железных дорог постоянного тока: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / Марикин Александр Николаевич; [ПГУПС]. – СПб., 2008. – 38 с.
196. Энергоэффективный преобразовательный агрегат с функциями фильтрации гармоник выходного напряжения тяговой подстанции системы электроснабжения постоянного тока напряжением 3 кВ / В. Н. Самсонкин, Н. В. Панасенко, Ю. П. Гончаров, В. Г. Сыченко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вып. 20. – С. 66-72.
197. Тяговый частотно-регулируемый преобразователь с активным фильтром и комбинированной схемой защиты в аварийных режимах / Н. И. Сергиенко, Ю. П. Гончаров, Н. В. Панасенко, В. Г. Сыченко // Залізничний трансп. України. – 2009. – № 2. – С. 9-16.

198. Аржанников Б. А. Возможности системы электроснабжения постоянного тока для пропуска скоростных пассажирских и грузовых поездов повышенного веса [Электрон. ресурс] / Б. А. Аржанников. – Режим доступа: <http://www.eav.ru/publ1p.php?publid=2009-10a21>.: 2009. – Дата обращения 5.03.2012.

199. Gang Z. A DC traction power supply converter system with very low harmonics for railway vehicles / Z. Gang, L. Zhigang, W. Lei, D. Lijun // Vehicle Power and Propulsion Conf., 2008. VPPC '08. IEEE. – 3-9-2008. – P. 1-6.

200. Марикин А. Н. Управление напряжением тяговой сети постоянного тока как способ усиления линий скоростного движения / А. Н. Марикин, А. Т. Бурков // Ж.-д. трансп. – 2006. – № 10. – С. 55-58.

201. Марикин А. Н. Синтез регулятора на основе обучающейся модели / А. Н. Марикин // Мир транспорта. – 2006. – № 2. – С. 100-106.

202. Устройство для автоматического регулирования напряжения в контактной сети: пат. 42983 Российская Федерация: МПК В 60 М 3/02/ Марикин А. Н., Бурков А. Т., Васильев Ю. П.; заяв. и влад. Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – № 12004126553; заявл. 6.9.2004; опубл. 27.12.2004; Бюл. № 36.

203. Устройство для автоматического регулирования тягового электроснабжения: пат. 145343 Российская Федерация: МПК В 60 М 3/02/ Марикин А. Н., Бурков А. Т., Смирнов А. В.; заяв. и влад. Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – № 12005100935/22; опубл. 17.1.2005; Бюл. № 13.

204. Дьяков В. А. К вопросу о противокоррозионной защите опор контактной сети в зоне станций стыкования / В. А. Дьяков, В. Г. Сиченко, О. И. Гилевич // Залізничний транс. України. – 2009. – № 5. – С. 26-27.

205. Кузнецов В. Г. Визначення факторів, що впливають на довговічність стійок залізобетонних опор контактної мережі / В. Г.

Кузнецов, О. М. Полях // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 19. – С. 55-60.

206. Кузнецов В. Г. Визначення науково обґрунтованого значення діагностичного параметру при віброакустичному методі діагностики залізобетонних опор / В. Г. Кузнецов, О. М. Полях // Залізничний трансп. України. – 2008. – № 3. – С. 46-50.

207. Кузнецов В. Г. Визначення необхідної кількості вимірів для вдосконаленого віброакустичного методу діагностики залізобетонних опор контактної мережі / В. Г. Кузнецов, О. М. Полях // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 20. – С. 58-62.

208. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций / Б. С. Барковский, Г. С. Магай, В. П. Маценко и др.; под ред. М. Г. Шалимова. – М. : Транспорт, 1990. – 127 с.

209. Дослідження показників якості електроенергії на вводах і фідерах тягових підстанцій постійного струму та розробка рекомендацій: звіт з НДР. – Д. : ДНУЗТ, 2007. – 63 с.

210. Сиченко В. Г. Дослідження показників якості електричної енергії на тягових підстанціях постійного струму / В. Г. Сиченко // Гірничя електромеханіка та автоматика: науково-техн. зб. – 2008. – № 81. – С. 53-60.

211. Сиченко В. Г. Розвиток наукових основ підвищення електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму залізничного транспорту: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.09 / Сиченко Віктор Григорович; [ДНУЗТ]. – Д., 2011. – 42 с.

212. Сиченко В. Г. До питання розробки активного фільтра тягової підстанції постійного струму / В. Г. Сиченко, В. А. Зубенко, М. П. Бадьор // Залізничний трансп. України. – 2006. – № 5. – С. 39-41.

213. Пути снижения энергопотребления в электротяговых сетях постоянного тока / В. В. Корниенко, С. Я. Карпенко, С. В. Попкович и др. // *Залізничний трансп. України*. – 2006. – № 6. – С. 69-71.

214. Омеляненко В. И. Электромеханический преобразователь энергии инерционного накопителя для сетей тягового электроснабжения / В. И. Омеляненко, Г. В. Омеляненко // *Электромеханика*. – 2001. – № 4-5. – С. 67-74.

215. Родькин Д. И. Особенности осуществления электропривода с накопителями энергии / Д. И. Родькин, Т. В. Величко // *Проблемы создания новых машин и технологий: вестн. Кременчугского гос. политехн. ун-та*. – 2001. – № 1. – С. 124-132.

216. Омеляненко В. И. Инерционный накопитель энергии для систем тягового электроснабжения / В. И. Омеляненко, Г. В. Омеляненко // *Технічна електродинаміка*. – 2002. – № 4. – С. 83-88.

217. Шевлюгин М. В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.02 / Шевлюгин Максим Валерьевич; [МИИТ]. – М., 2009. – 48 с.

218. Омеляненко В. И. Накопители энергии в тяговых сетях железных дорог / В. И. Омеляненко // *Тезисы 70-й Международной научно-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта»*. – Д. : ДНУЖТ, 2010. – С. 109-110.

219. Оверьянова Л. В. Электромеханический преобразователь инерционного накопителя энергии для электроподвижного состава пригородного сообщения / Л. В. Оверьянова // *Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*. Тематичний випуск: Транспортне машинобудування. – 2012. – № 20. – С. 85-90.

220. Сулим А. А. Применение емкостных накопителей в электрифицированном рельсовом транспорте / А. А. Сулим // *Зб.*

матеріалів 5-ї Міжнародної науково-техн. конф. молодих учених і спеціалістів. – Кременчук : КДУ, 2011. – С. 234.

221. Вейц В. И. Экономия электрической энергии в промышленности / В. И. Вейц. – М. : Госэнергоиздат, 1947. – 208 с.

222. Гофман И. В. Организация и планирование энергохозяйства промышленных предприятий / И. В. Гофман, Г. Л. Госпитальник. – М. : Госэнергоиздат, 1954. – 440 с.

223. Гофман И. В. Нормирование потребления энергии и энергетические балансы промышленных предприятий / И. В. Гофман. – М. : Энергия, 1966. – 319 с.

224. Тайц А. А. Методика нормирования удельных расходов электрической энергии / А. А. Тайц. – М. : Госэнергоиздат, 1966. – 183 с.

225. Тайц А. А. Применение математических методов при нормировании удельных расходов электроэнергии в промышленности / А. А. Тайц, М. Р. Бредлик. – М. : МИЭИ им. С. Орджоникидзе, 1973. – 55 с.

226. Константинов Б. А. О применении математических методов при нормировании потребления электроэнергии в промышленности / Б. А. Константинов // Электричество. – 1964. – № 1. – С. 66.

227. Константинов Б. А. Использование кибернетических методов в промышленной энергетике / Б. А. Константинов, Д. М. Воскобойников // Электричество. – 1976. – № 10. – С. 70-71.

228. Волобринский С. Д. Определение фактических удельных расходов электроэнергии и прогнозирование электропотребления при многономенклатурном производстве / С. Д. Волобринский, А. И. Гельфарб, А. К. Михайлов // Промышленная энергетика. – 1970. – № 5. – С. 26.

229. Щелоков Я. М. О нормировании энергетических показателей / Я. М. Щелоков // Промышленная энергетика. – 2007. – № 10. – С. 50-53.

230. Кудрин Б. И. Учет технологических факторов при нормировании расходов электроэнергии и прогнозировании электропотребления химических предприятий / Б. И. Кудрин, С. В. Жичкин // Промышленная энергетика. – 2002. – № 12. – С. 24-28.

231. Саитбаталова Р. С. Статистическая оценка фактического удельного расхода электроэнергии на выпуск продукции / Р. С. Саитбаталова, Р. У. Галеева, Н. А. Филиппов // Промышленная энергетика. – 2002. – № 12. – С. 29-30.

232. Гунин В. М. Опыт нормирования и прогнозирования электропотребления предприятия на основе математической обработки статистической отчетности / В. М. Гунин, Л. А. Копцев, Г. В. Никифоров // Промышленная энергетика. – 2000. – № 2. – С. 2-5.

233. Кудрин Б. И. О теоретических основах и практике нормирования и энергосбережения / Б. И. Кудрин // Промышленная энергетика. – 2000. – № 6. – С. 33-36.

234. Никифоров Г. В. Совершенствование нормирования и планирования электропотребления в промышленном производстве / Г. В. Никифоров // Промышленная энергетика. – 1999. – № 3. – С. 27-29.

235. Усихин В. Н. О нормировании и планировании электропотребления на промышленных предприятиях / В. Н. Усихин // Промышленная энергетика. – 1997. – № 4. – С. 30-37.

236. Дзевенцкий А. Я. Метод нормирования электроэнергии на предприятиях с изменяющимися режимами потребления мощности / А. Я. Дзевенцкий, Ф. А. Хашимов, А. З. Шукуров // Промышленная энергетика. – 1996. – № 5. – С. 4-6.

237. Олейников В. К. Анализ и планирование электропотребления на горных предприятиях / В. К. Олейников. – М. : Недра, 1983. – 192 с.

238. Праховник А. В. Формирование характеристик электропотребления промышленных объектов / А. В. Праховник // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1982. – № 6. – С. 156-161.

239. Варшавский А. Э. Построение комплексного электробаланса предприятий на основе банка данных / А. Э. Варшавский, А. И. Котельников // Электрические нагрузки и электропотребление в новых условиях хозяйствования. – М. : МДНТП, 1989. – С. 69-71.

240. Вишневецкий И. И. Агрегатные модели нормирования электропотребления / И. И. Вишневецкий, А. А. Морланг, В. В. Фуфаев // Электрические нагрузки и электропотребление в новых условиях хозяйствования. – М. : МДНТП, 1989. – С. 96-98.

241. Дроздов В. А. О точности расчета электрических нагрузок промышленных предприятий / В. А. Дроздов, С. А. Фридман // Промышленная энергетика. – 1978. – № 2. – С. 29-32.

242. Кудрин Б. И. О необходимой точности методов расчета электрических нагрузок и оценка надежности систем электроснабжения промышленных предприятий / Б. И. Кудрин, Э. А. Лосев // ИВУЗ. Электромеханика. – 1982. – № 12. – С. 1448-1451.

243. Кудрин Б. И. Основы комплексного метода расчета электрических нагрузок / Б. И. Кудрин // Промышленная энергетика. – 1986. – № 11. – С. 23-27.

244. Праховник А. В. Контроль ефективності енерговикористання - ключова проблема управління енергозбереженням / А. В. Праховник, В. Ф. Находов, О. В. Борисенко // Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2009. – № 8(66). – С. 41-54.

245. Находов В. Ф. Энергосбережение и проблема контроля эффективности энергоиспользования / В. Ф. Находов // Промелектро. – 2007. – № 1.

246. Находов В. Ф. Аналіз діючих в Україні методик нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів / В. Ф. Находов, О. В. Бориченко, К. К. Кочетова // Промелектро. – 2007. – № 2. – С. 42-48.

247. Праховник А. В. Про «нормування» питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів / А. В. Праховник, В. Ф. Находов, О. В. Овдієнко // Енергозбереження та автоматизація (ЕСТА). – 2002. – № 7(31). – С. 7-9.

248. Загальні положення про порядок нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів у суспільному виробництві: затв. Постановою Кабінету Міністрів України № 786 від 15 липня 1997 р. (зі змінами та доповненнями, внесеними постановою Кабміну № 1040 від 27 червня 2000 р.). – К. : Кабінет Міністрів України, 1997.

249. Основні методичні положення з нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів у суспільному виробництві: затв. Наказом Держкоменергозбереження України № 93 від 14 жовтня 1997 р. – К., 1997. – 78 с.

250. Поплавский А. Н. Электроэнергетика предприятий железнодорожного транспорта / А. Н. Поплавский. – М. : Транспорт, 1981. – 267 с.

251. Поплавский А. Н. Рациональное использование электроэнергии в депо в хозяйстве / А. Н. Поплавский // Электрическая и тепловозная тяга. – 1980. – № 9. – С. 29-31.

252. Методические указания по определению норм расхода электроэнергии для стационарных потребителей отделения дороги. – М. : Транспорт, 1978. – 45 с.

253. Методика определения норм расхода электроэнергии для объектов локомотивного хозяйства. – М. : Транспорт, 1988. – 50 с.

254. Методика определения норм расхода электроэнергии для объектов вагонного хозяйства. – М. : Транспорт, 1979. – 52 с.

255. Методика определения норм расхода электроэнергии на эксплуатационные нужды объектов пассажирской службы. – М. : Транспорт, 1975. – 30 с.

256. Временная методика определения норм расхода электроэнергии на эксплуатационные нужды объектов службы движения. – М. : Транспорт, 1976. – 16 с.

257. Методика определения норм расхода электроэнергии для объектов грузовой службы МПС СССР. – М. : Транспорт, 1976. – 31 с.

258. Методика определения норм расхода электроэнергии на эксплуатационные нужды объектов службы пути МПС СССР. – М. : Транспорт, 1976. – 31 с.

259. Потребление и экономия электроэнергии в стационарной энергетике железнодорожного транспорта / под ред. А. Н. Поплавского. – М. : 1976. – 216 с.

260. Оцінка обсягів скорочення викидів парникових газів за рахунок зниження технологічних витрат в розподільчих мережах України : звіт з НДР / кер. Б. А. Костюковський. – К. : Інститут загальної енергетики, 2011. – 111 с.

261. Інструкція розрахунку технологічних втрат електроенергії в пристроях тягового електропостачання. ЦЕ-0007: затв. Наказом Укрзалізниці від 29.08.2003 р. № 342-ЦЗ / розроб. В. Т. Доманський, Р. С. Мицко. – К. : Мін-во трансп. України; Укрзаліниця, 2003. – 53 с.

262. Митрофанов А. Н. Управление технологиями электропотребления и энергосбережения: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / А. Н. Митрофанов, М. А. Гаранин, Е. В. Добрынин. – Самара : СамГУПС, 2009. – 151 с.

263. Эксплуатационные требования к параметрам устройств энергоснабжения железных дорог, электрифицированных на постоянном токе: сб. науч. тр. – М. : Трансжелдориздат, 1959. – 234 с.
264. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристофидес. – М. : Мир, 1978. – 432 с.
265. Башлыков А. А. Экспертные системы поддержки принятия решений в энергетике / А. А. Башлыков, А. П. Еремеев. – М. : Изд-во МЭИ, 1994. – 216 с.
266. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М. : Радио и связь, 1993. – 278 с.
267. Ветлугин Е. М. Плавное регулирование напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой с помощью дросселей насыщения / Е. М. Ветлугин, Р. Н. Урманов // Тр. ин-та УЭМИИТ. – 1962. – № 5. – С. 44-45.
268. Ногин В. Д. Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев / В. Д. Ногин // Журн. вычислительной математики и математической физики. – 2004. – № 7, т. 44. – С. 1259-1268.
269. Постанова Національної комісії регулювання електроенергетики № 1262 від 04.11.2009 р. – К. : НКРЭ, 2009.
270. Інструкція з класифікації, розслідування, обліку та аналізу порушень нормальної роботи пристроїв електропостачання залізниць. ЦЕ-0013: затв.: Наказ Укрзалізниці від 19.12.2005 р. № 408-Ц / Головне управління електрифікації та електропостачання. – К. : Мін-во трансп. України; Укрзалізниця, 2006. – 36 с.
271. Brown R. E. Electric power distribution reliability / R. E. Brown. – N. Y. : CRC Press, 2009. – 463 p.
272. Reliability evaluations of railway power supplies by fault-tree analysis / Chen, S K, Ho, T K, and Mao, B H // Electric Power Applications, IET. – 2007. – № 2. – P. 161-172.

273. Абдурахманов А. М. Разработка моделей надежности коммутационного оборудования и рекомендаций по их применению в задачах электроэнергетики: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / А. М. Абдурахманов; [ГОУ МЭИ]. – М., 2008. – 20 с.

274. Ефимов А. В. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин. – М. : УМК МПС России, 2000. – 512 с.

275. Калявин В. П. Надежность и диагностика электроустановок: учебное пособие / В. П. Калявин, Л. М. Рыбаков. – Йошкар-Ола : Марийский гос. ун-т, 2000. – 369 с.

276. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць. ЦЕ-0024: затв. Наказом Укрзалізниці від 21.12.2007 р. № 618-Ц / розроб. ВАТ «Укртрансprojekt». – К. : Укрзалізниця, 2007. – 106 с.

277. Основы теории электрических аппаратов / под ред. Г. В. Буткевича. – М. : Высш. шк., 1970. – 600 с.

278. Порудоминский В. В. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой / В. В. Порудоминский. – М. : Энергия, 1974. – 287 с.

279. Таев И. С. Электрические аппараты / И. С. Таев. – М. : Энергия, 1977. – 272 с.

280. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей / В. Г. Холмский. – М. : Высш. шк., 1975. – 360 с.

281. Мельников Н. А. Электрические сети и системы / Н. А. Мельников. – М. : Энергия, 1975. – 462 с.

282. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи: підручник. / М. С. Сегеда. – 2-ге вид. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2009. – 488 с.

283. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – К. : Держстандарт України, 1994. – 76 с.
284. Коллакот Р. Диагностика повреждений / Р. Коллакот. – М. : Мир, 1989. – 512 с.
285. Кузнецов В. Г. Проблемы оптимизации напряжения на шинах тяговых подстанций постоянного тока / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Тр. Международной научно-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: образование, наука, производство». – Ростов-на/Д. : РГУПС, 2009. – С. 363-364.
286. Гусарова Е. В. Экономическое обоснование эффективности проектных решений и внедрения новой техники на железнодорожном транспорте: учебное пособие / Е. В. Гусарова. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2008. – 157 с.
287. Практичні рекомендації з технолого-економічного управління експлуатаційною роботою залізниць. ЦД-0068: затв. Наказом Укрзалізниці від 10.11.2006 № 412-Ц / розроб. В. О. Шиш. – К. : Мін-во трансп. та зв'язку України; Укрзалізниця; Голов. упр. перевезень, 2007. – 56 с.
288. Рекомендації з техніко-економічних розрахунків окремих показників експлуатаційної роботи залізниць. ЦД-0037: затв. Наказом Укрзалізниці від 18.06.2001 № 329-Ц / розроб. О. Ф. Вергун, Л. Ю. Гаркуша. – К.: Транспорт України, 2001. – 64 с.
289. Технологічні карти з капітального, поточного ремонтів і профілактичних випробувань специфічного обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць / розроб. ВАТ «Укртранспроект». – К. : Укрзалізниця; Головне управління електрифікації та електропостачання, 2008. – 107 с.
290. Математико-статистичний підхід до моделювання процесу електромеханічного зношування контактного проводу / Д. М. Барановський, В. В. Аулін, В. Г. Кузнецов, Н. І. Послайко // Тези 65-ї

Міжнародної науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Д. : ДНУЗТ, 2005. – С. 119.

291. Аулін В. В. Вторинні структури поверхні тертя контактного проводу / В. В. Аулін, Д. М. Барановський, В. Г. Кузнецов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2005. – Вип. 9. – С. 36-40.

292. Угрюмов А. К. Неравномерность движения поездов / А. К. Угрюмов. – М. : Транспорт, 1968. – 112 с.

293. Фогель Х. Вопросы увеличения массы и длины поездов / Х. Фогель // Железные дороги мира. – 2000. – № 4. – С. 22-24.

294. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України: навч.-метод. посібник / розроб. О. Ф. Вергун та ін. – К. : Транспорт України, 2002. – 386 с.

295. Інструкція з нормування витрат електроенергії на власні потреби підстанцій 6-220 кВ і розподільчих пунктів 6-10 кВ залізниць України. ЦЕ-0018: затв.: Наказ Укрзалізниці 08.11.2007 р. № 526-Ц / розроб. В. Г. Кузнецов. – К. : Мін-во трансп. України; Укрзалізниця, 2007. – 68 с.

296. Бардушко В. Д. Оценка потерь электроэнергии в трансформаторах тяговых подстанций / В. Д. Бардушко // Актуальные проблемы железнодорожного транспорта Восточной Сибири: сб. науч. трудов ИрИИТ. – 1995. – Вып. 3. – С. 97-101.

297. Быкадоров А. Л. Влияние уравнивающих токов на измерение потерь энергии в тяговой сети / А. Л. Быкадоров, В. Т. Доманский // Тр. Ростовского ин-та инженеров ж.-д. трансп. – 1979. – Вып. 153. – С. 27-30.

298. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. ЦЕ-0009: затв. Наказом Укрзалізниці від 24.12.04 р. № 1010-ЦЗ. – К. : Держадміністрація залізн. трансп. України. Головне управління електрифікації та електропостачання, 2005. – 79 с.

299. А.с. 1220955 СССР. МКИ В 60 М 3/02. Устройство для автоматического регулирования напряжения в контактной сети / Аржанников Б. А., Попов В. С., Сипкин В. И., Соколов Н. А., Урманов Р. Н. (СССР). – № 3814509/27-11; заявл. 17.10.84; опубл. 30.03.86, Бюл. № 12. – 4 с.

300. Аржанников Б. А. Совершенствование системы электроснабжения постоянного тока на основе автоматического регулирования тяговых подстанций / Б. А. Аржанников, А. А. Пышкин. – Екатеринбург : Изд-во Урал. гос. ун-та путей сообщения, 2006. – 118 с.

301. Савич Я. Е. Определение оптимальных положений переключателей ответвлений трансформаторов тяговых подстанций / Я. Е. Савич // Тр. Ростовского ин-та инженеров ж.-д. трансп. – 1983. – № 171. – С. 25-28.

302. Подольский В. И. Железобетонные опоры контактной сети. Конструкция, эксплуатация, диагностика / В. И. Подольский. – М. : Интекст, 2007. – 152 с.

303. Подольский В. И. Эксплуатационные воздействия на опоры контактной сети электрифицированных железных дорог и повышение их надежности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.09 / Подольский Виктор Иванович; [ВНИИЖТ]. – М., 1996. – 303 с.

304. Анализ влияния перераспределения нагрузок железнодорожных тяговых подстанций на потенциальное состояние газопроводов г. Днепропетровска / В. А. Дьяков, Я. Е. Савич, Б. Г. Дубровский, В. П. Выдра // Межвузовский сб. научн. тр. – 1999. – № 11. – С. 120-123.

305. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / М. П. Бадер. – М. : УМК МПС, 2002. – 638 с.

306. Гладков Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – М. : Физматлит, 2006. – 320 с.

307. Киреева Э. А. Автоматизация и экономия электроэнергии в системах промышленного электроснабжения: справочные материалы и примеры расчетов / Э. А. Киреева, Т. Юнес, М. Айюби. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 320 с.

308. Киреева Э. А. Рациональное использование электроэнергии в системах промышленного электроснабжения: Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик». Вып. 10(22) / Э. А. Киреева. – М. : НПФ «Энергопрогресс», 2000. – 76 с.

309. Постанова Національної комісії регулювання електроенергетики № 1241 від 20.12.2001 р. – К. : НКРЕ, 2001.

310. Тихонов К. К. Выбор оптимальных параметров эксплуатации железных дорог / К. К. Тихонов. – М. : Транспорт, 1974. – С. 10-11.

311. Правила улаштування та технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць. ЦЕ-023: затв.: Наказ Укрзалізниці 20.11.2007 № 546-Ц / ЦЕ УЗ. – К. : Укрзалізниця, 2008. – 208 с.

312. Бобирь Д. В. Удосконалення режимів ведення вантажного поїзда з електричною тягою: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Бобирь Дмитро Валерійович; [ДНУЗТ]. – Д., 2007. – 23 с.

313. Гаранин М. А. Совершенствование расчета наличной пропускной способности железных дорог постоянного тока по условиям электроснабжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / М. А. Гаранин; [СамГУПС]. – Самара, 2004. – 25 с.

314. Кузнецов В. Г. Исследование влияния дислокации и расстояния между поездами на величину потерь мощности в контактной сети / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Материалы 3-й Международной научно-практ. конф. «Энергосбережение на железнодорожном транспорте». – Д. : ДНУЖТ, 2012. – С. 38-39.

315. Оптимізація витрат Донецької залізниці при закупівлі електроенергії на тягу поїздів з розробкою рекомендацій: звіт з НДР / кер. В. Г. Кузнецов. – ДР 0111U003607; – Д. : ДНУЗТ, 2011. – 89 с.

316. Нормування витрат електроенергії на власні потреби підстанцій 35-750 кВ та розподільчих пунктів 6-10 кВ. Затв. Наказом Міністерства палива та енергетики України від 02.03.2004 № 129. – К. : Міністерство палива та енергетики України, 2004. – 36 с.

317. Інструкція по зняттю показників приладів обліку електроенергії, їх запису та передачі даних енергодиспетчеру, структурному підрозділу «Енергозбут» та причетним організаціям на об'єктах електропостачання. Затв.: Наказ Укрзалізниці 12.10.2005 № 330-Ц. – К. : Мін-во транспорту та зв'язку України, 2005. – 39 с.

ВЛОЖЕНИЕ А

Пример результатов исследование параметров потока поездов на участке Синельниково – Чаплино Приднепровской ж.д. за декабрь 2010 г.

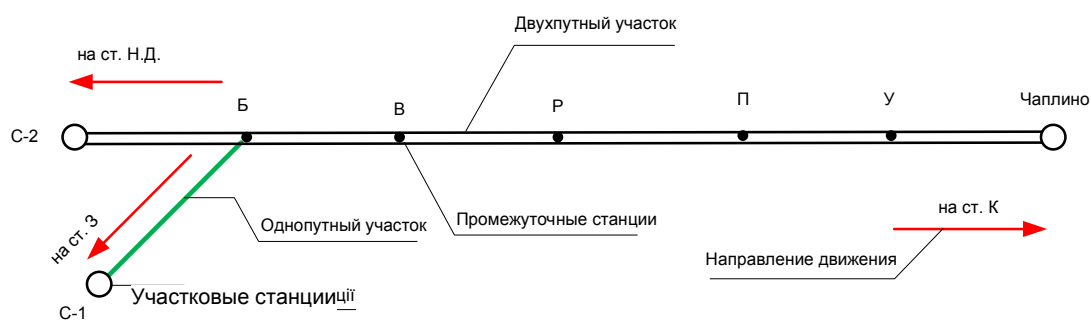
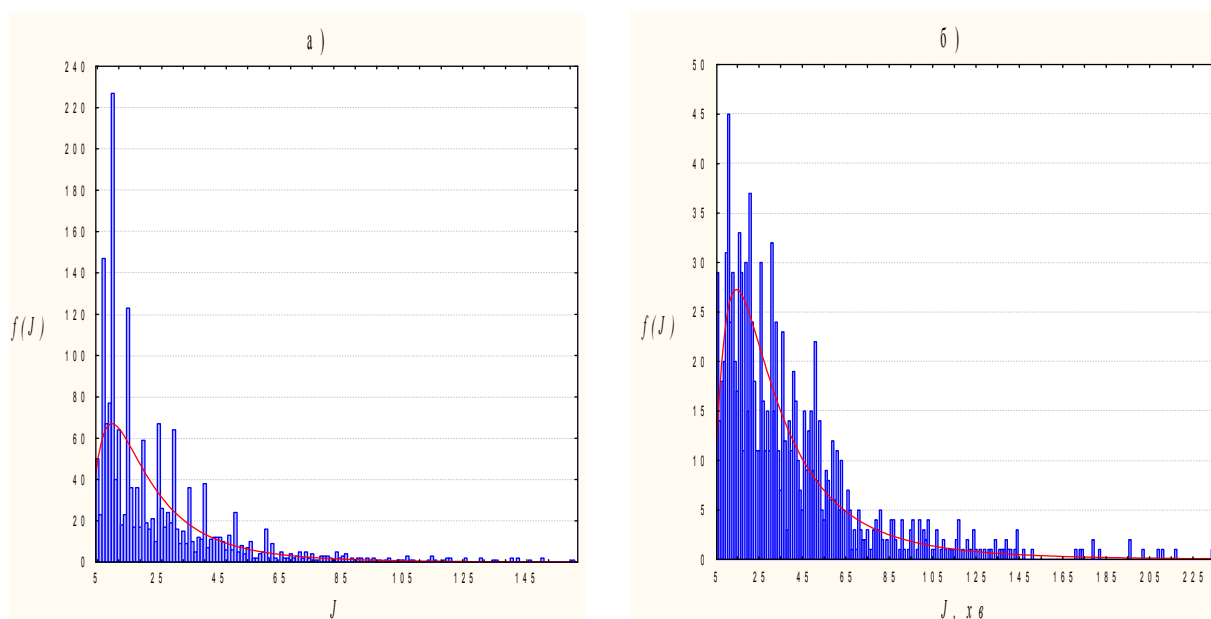


Рисунок А.98- Схема исследуемого электрифицированного участка С-Ч



а) нечётное направление, б) чётное направление

Рисунок А.99 - Гистограммы распределения межпоездных интервалов на рассматриваемом участке

Таблица А.62 - Количество и масса поездов на рассматриваемом участке за декабрь 2010 г.

дата	Количество поездов			Общая масса поездов, т			Средняя масса поездов, т		
	чётных	нечётных	всего	чётных	нечётных	всего	чётных	нечётных	всего
1	47	38	85	152185	67034	219219	3238	1764	2579
2	42	28	70	127577	49325	176902	3038	1762	2527
3	45	36	81	125546	62215	187761	2790	1728	2318
4	54	35	89	177774	56551	234325	3292	1616	2633
5	51	33	84	156955	56600	213555	3078	1715	2542
6	50	29	79	149908	43670	193578	2998	1506	2450
7	60	34	94	193144	59581	252725	3219	1752	2689
8	52	34	86	153434	50045	203479	2951	1472	2366
9	51	34	85	142951	49259	192210	2803	1449	2261
10	59	26	85	195293	32011	227304	3310	1231	2674
11	54	39	93	164785	65680	230465	3052	1684	2478
12	60	31	91	189421	39419	228840	3157	1272	2515
13	55	35	90	173089	63210	236299	3147	1806	2626
14	62	36	98	199637	58852	258489	3220	1635	2638
15	56	35	91	175692	60795	236487	3137	1737	2599
16	56	33	89	188314	48411	236725	3363	1467	2660
17	60	32	92	175217	47366	222583	2920	1480	2419
18	65	41	106	210865	60613	271478	3244	1478	2561
19	57	39	96	185727	59865	245592	3258	1535	2558
20	62	35	97	204261	60682	264943	3295	1734	2731
21	62	46	108	189879	86411	276290	3063	1879	2558
22	64	44	108	198727	54074	252801	3105	1229	2341
23	50	35	85	147309	65426	212735	2946	1869	2503
24	56	32	88	187919	53802	241721	3356	1681	2747
25	54	37	91	171311	68196	239507	3172	1843	2632
26	51	32	83	157601	61415	219016	3090	1919	2639
27	56	36	92	180934	66790	247724	3231	1855	2693
28	60	37	97	178648	71284	249932	2977	1927	2577
29	61	43	104	196122	77200	273322	3215	1795	2628
30	69	40	109	211659	63752	275411	3068	1594	2527
31	56	44	100	181382	74809	256191	3239	1700	2562
всего	1737	1109	2846	5443266	1834343	7277609	3134	1654	2557

РИЛОЖЕНИЕ Б

Анализ небалансов электроэнергии

Таблица Б.63- Данные по небалансам электроэнергии по дистанции электроснабжения Самбор Львовской ж.д.

февраль 2011 г.		Характеристика присоединений ТП				Поступление и реализация электроэнергии на шинах ТП						Потери в ТСН, кВт · ч								
		Номинальное напряжение, кВ	Допустимый расчётный небаланс, %	Фактический небаланс, %		Поступило на шины всего, кВт · ч	Отпущено на тягу, кВт · ч				Отпущено всем кроме тяги, кВт · ч									
				Прошлый месяц	Текущий месяц		По счётчику	По разнице	Разница, кВт · ч	Разница, %										
(рек.)	(рек.)	(рек.)	ЭЧЕ-26	ЭЧЕ-27	10	0,999	0,106	0,165	0,984	1,135	0,272	1,050	533600	1145100	495200	508450	-13250	-2,68	636650	1222,0
	ЭЧЕ-25	10	0,880	0,875	0,979	0,961	0,975	-0,144	-0,050	0,984	1,135	0,272	1,050	533600	1145100	495200	508450	-13250	-2,68	636650
	ЭЧЕ-24	10	0,880	0,875	0,979	0,961	0,975	-0,144	-0,050	0,984	1,135	0,272	1,050	533600	1145100	495200	508450	-13250	-2,68	636650
	ЭЧЕ-23	10	0,880	0,875	0,979	0,961	0,975	-0,144	-0,050	0,984	1,135	0,272	1,050	533600	1145100	495200	508450	-13250	-2,68	636650
	ЭЧЕ-22	10	0,880	0,875	0,979	0,961	0,975	-0,144	-0,050	0,984	1,135	0,272	1,050	533600	1145100	495200	508450	-13250	-2,68	636650
	ЭЧЕ-21	10	0,880	0,875	0,979	0,961	0,975	-0,144	-0,050	0,984	1,135	0,272	1,050	533600	1145100	495200	508450	-13250	-2,68	636650
	ЭЧЕ-20	10	0,880	0,875	0,979	0,961	0,975	-0,144	-0,050	0,984	1,135	0,272	1,050	533600	1145100	495200	508450	-13250	-2,68	636650
	ЭЧЕ-6	10	0,880	0,875	0,979	0,961	0,975	-0,144	-0,050	0,984	1,135	0,272	1,050	533600	1145100	495200	508450	-13250	-2,68	636650
	ЭЧЕ-6	10	0,880	0,875	0,979	0,961	0,975	-0,144	-0,050	0,984	1,135	0,272	1,050	533600	1145100	495200	508450	-13250	-2,68	636650

Окончание табл. Б.63

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
(рек.)	ЭЧЕ-28	10	1,154	-0,759	-0,145	352560	307440	307964	-524	-0,17	44596	1034,9
	ЭЧЕ-40	10	1,092	0,193	0,095	1005600	601200	602932	-1732	-0,29	402668	773,8
(рек.)	ЭЧЕ-43	10	1,062	-0,737	-0,292	487520	453480	452500	980	0,22	35020	443,5
(рек.)	ЭЧЕ-44	10	1,084	-0,155	0,041	379040	237600	238200	620	0,26	140840	443,6
	ЭЧЕ-45	10	1,040	-0,469	-0,547	55160	20800	20980	-180	-0,87	34180	481,8

Таблица Б.64 - Расчёт небаланса на шинах тяговой подстанции ЭЧЭ-26 за февраль 2011 г.

Присоединение	Классы точности			Приём W _п * кВт.ч.	Отпуск W _о * кВт.ч.	d* %	d***
	ТС	ТН	СЧ				
Ввод 1 (приём)	0,5	0,5	0,2	513000		0,735	0,906
Ввод 2 (приём)	0,5	0,5	0,2	0		0,735	0,000
Ввод 1 (отдача)	0,5	0,5	0,2		28000	0,735	0,048
Ввод 2 (отдача)	0,5	0,5	0,2		0	0,735	0,000
КВИ-1 (потребление)	0,5	0,5	0,5		438120	0,866	0,754
КВИ-2 (потребление)	0,5	0,5	2		0	2,121	0,000
КВ-3 (рекуперация)	0,5	0,5	0,5		2520	0,866	0,004
КВ-4 (потребление)	0,5	0,5	2		0	2,121	0,000
КВИ-1 (рекуперация)	0,5	0,5	0,5	52920		0,866	0,094
КВИ-2 (рекуперация)	0,5	0,5	2	0		2,121	0,000
Л-11 (потребление)	0,5	0,5	2		15000	2,121	0,026
Л-12 (потребление)	0,5	0,5	2		41200	2,121	0,071
Л-13 (потребление)	0,5	0,5	0,5		44460	0,866	0,076
ТСН-1	0,5	0,5	2		8856	2,121	0,015
ТСН-2	0,5	0,5	2		0	2,121	0,000
ГРЩ	0,5	0,5	2		3120	2,121	0,005
Всего				565920	581276		
Допустимый небаланс, %				0,953			
Фактический небаланс, %				-2,849			

Таблица Б.65 - Расчёт небаланса на шинах тяговой подстанции ЭЧЭ-40 за февраль 2011 г.

Присоединение	Классы точности			Приём Wп* кВт·ч	Отпуск Wo* кВт·ч	d* %	d***
	ТС	ТН	СЧ				
Ввод 1 (приём)	0,5	0,5	0,2	1054000		0,735	0,991
Ввод 2 (приём)	0,5	0,5	0,2	10000		0,735	0,009
ТВП-1	0,5	0,5	2		6798	2,121	0,007
ТВП-2	0,5	0,5	2		0	2,121	0,000
Л-11 Продольное электроснабжение	0,5	0,5	2		91700	2,121	0,088
Л-12 Продольное электроснабжение	0,5	0,5	2		8800	2,121	0,008
Л-13 ст. Дрогобич	0,5	0,5	2		6000	2,121	0,006
Л-14 ст. Дрогобич	0,5	0,5	2		156500	2,121	0,151
КВІ-1	0,5	0,5	0,5		768800	0,866	0,740
КВ-2	0,5	0,5	2		0	2,121	0,000
КВ-3	0,5	0,5	2		0	2,121	0,000
Всего				1064000	1038598		
Допустимый небаланс, %				1,039			
Фактический небаланс, %				2,315			

Таблица Б.66 - Коэффициенты загрузки трансформаторов тока ЭЧЭ-Штеровка Донецкой ж.д. за январь 2011 г.

Ввод 1 35 кВ	Ввод 2 35 кВ	ЧП Рудник 10 кВ	ТПВА 1 10 кВ	ТСН 1	СЦБ	ФПЕ Фашевка	ЕЧК-22	ЖДУ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,048	0,222	0,218	0,174	0,008	0,002	0	0,116	0,418
0,046	0,202	0,148	0,162	0,006	0,004	0	0,11	0,406
0,048	0,244	0,184	0,222	0,008	0,002	0	0,1	0,406
0,042	0,176	0,294	0,126	0,008	0,002	0	0,102	0,414
0,044	0,202	0,316	0,16	0,008	0,004	0	0,106	0,408
0,048	0,154	0,314	0,09	0,01	0,002	0	0,108	0,4
0,048	0,12	0,304	0,04	0,01	0,004	0	0,092	0,406
0,044	0,228	0,226	0,198	0,006	0,002	0	0,076	0,446
0,046	0,194	0,134	0,152	0,006	0,004	0	0,072	0,438
0,05	0,236	0,204	0,202	0,008	0,002	0	0,074	0,454
0,052	0,182	0,228	0,12	0,006	0,004	0,0084	0,07	0,404
0,048	0,148	0,25	0,084	0,008	0,004	0,0084	0,072	0,364
0,044	0,198	0,272	0,158	0,008	0,004	0	0,07	0,358

Окончание табл. Б.66

1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,052	0,17	0,252	0,11	0,006	0,002	0	0,064	0,406

0,05	0,124	0,226	0,054	0,006	0,002	0	0,062	0,384
0,046	0,144	0,328	0,076	0,008	0,004	0	0,07	0,42
0,048	0,22	0,336	0,174	0,006	0,002	0	0,08	0,45
0,054	0,166	0,356	0,094	0,008	0,004	0	0,076	0,44
0,058	0,158	0,36	0,078	0,008	0,002	0	0,078	0,436
0,05	0,124	0,22	0,044	0,008	0,002	0	0,082	0,418
0,052	0,14	0,17	0,068	0,006	0,004	0	0,088	0,446
0,052	0,166	0,27	0,098	0,008	0,002	0	0,088	0,418
0,052	0,19	0,274	0,138	0,008	0,002	0	0,088	0,384
0,05	0,208	0,29	0,166	0,006	0,004	0	0,082	0,37

Таблица Б.67 -Небалансы активной энергии по ЭЧЭ-Штеровка за 2010-2011

Г.

месяц	май 2010 г.	июнь 2010 г.	июль 2010 г.	август 2010 г.	сентябрь 2010 г.	октябрь 2010 г.	ноябрь 2010 г.	декабрь 2010 г.	январь 2011 г.	февраль 2011 г.	март 2011 г.
Допустимый активный небаланс, %	1,42735	1,21366	1,29474	1,41654	1,32714	1,42421	1,37154	1,40832	1,40708	1,37832	1,39626
Фактический активный небаланс, %	-0,85913	0,01445	1,76471	2,07493	4,20172	5,30946	5,66318	6,29124	5,64875	0,12110	1,17505
Сверхнорматив-ный небаланс, %	0,00	0,00	0,46997	0,65839	2,87458	3,88525	4,29164	4,88292	4,24149	0,00	0,00
Распределённый небаланс, %	-0,85913	0,01445	1,29474	1,41654	1,32714	1,42421	1,37154	1,40832	1,40708	0,12110	1,17505

Таблица Б.68- Небалансы реактивной энергии по ЭЧЭ-Штеровка за 2010-2011 г.

месяц	май 2010 г.	июнь 2010 г.	июль 2010 г.	август 2010 г.	сентябрь 2010 г.	октябрь 2010 г.	ноябрь 2010 г.	декабрь 2010 г.	январь 2011 г.	февраль 2011 г.	март 2011 г.
Допустимый активный небаланс, %	1,39349	1,37924	1,23640	1,38477	1,31577	1,38309	1,34935	1,37409	1,38221	1,36891	1,37903
Фактический активный небаланс, %	-0,80721	-2,06701	2,74404	1,68395	6,06999	5,16363	6,28031	4,73591	3,30010	-3,64018	-2,68860
Сверхнорматив- ный небаланс, %	0,00	-0,68777	1,50764	0,29918	4,75422	3,78954	4,93096	3,36182	1,91789	-2,27127	-1,30957
Распределённый небаланс, %	-0,80721	-1,37924	1,23640	1,38477	1,31577	1,38309	1,34935	1,37409	1,38221	-1,36891	-1,37903

РИЛОЖЕНИЕ В

Расчёт экономической эффективности применения энергосберегающих мероприятий на Донецкой железной дороге

В.1 Характеристика существующей и модернизированной тяговой подстанции Донецк

ТП- Донецк является промежуточной подстанцией на отпайках 35/6/3,3 кВ. В эксплуатацию она была введена в 1963 году. В состав тяговой подстанции входят:

1) РУ- 35кВ, которое имеет:

- ввод № 1 35кВ «Смолка-Северная»;
- ввод № 2 35кВ «Смолка-Тяговая»;

К каждому вводу присоединено по одному понижающему трансформатору типа ТД-16000/35/6 кВ через разъединители РЛНД3.1-35Б/1000 У1 и выключатели С-35. Один понижающий трансформатор типа ТД-16000/35/6 кВ 1981 года выпуска, введён в эксплуатацию в 1981 году (срок службы 25 лет), а другой - 1994 года выпуска, введенный в эксплуатацию в 1995 году (срок службы 25 лет). Вторичные обмотки этих трансформаторов присоединены к секциям шин 6 кВ через выкатные масляные выключатели ВМПЭ-10, введенные в эксплуатацию в 1981 году (срок службы 25 лет).

2) РУ 6 кВ.

РУ 6 кВ состоит из двух секций шин, которые соединены между собой через секционные разъединители РВР-10/2500 У3 и масляный выключатель ВМП-10, введенный в эксплуатацию в 1981 году (срок службы 25 лет).

1 секция – два трансформатора типа ТМРУ 6200/10. Год выпуска 1994, введенный в эксплуатацию 03.1995 года (срок службы 25 лет), трансформатор собственных нужд ТМ 400 кВА. Введён в эксплуатацию в

1984 году (срок службы 25 лет), Фидер ПОСТ ЕЦ №1, Фидер ЖД-1, Фидер СН-1.

II секция – два трансформатора типа ТМРУ 6200/10. Год выпуска 1994, введенный в эксплуатацию 03.1995 года (срок службы 25 лет), трансформатор собственных нужд ТМ 400 кВА. Год выпуска 1984, введенный в эксплуатацию 01.1984 года (срок службы 25 лет), Фидер ПОСТ ЕЦ №2, Фидер ЖД-2, Фидер СН-2, Фидер ФПЕ, Фидер ФМС.

3) РУ 3,3 кВ состоит из главной, минусовой и запасной шин. Рабочая и запасная шины состоят из двух секций:

I секция – Фидер Ф-5, Фидер Ф-1, Фидер Ф-2;

II секция – Фидер Ф-6, Фидер Ф-3, Фидер Ф-4.

Рабочая и запасная шины секционируются разъединителями РВК-10/4000 У1, что позволяет поочередно выводить в ремонт I и II секции без полного погашения РУ-3,3 кВ. Одновременно как к I так и к II секции шин 3,3 кВ подключены сглаживающие устройства, которые состоят из двух реакторов РБФА и резонансных контуров. Реакторы РБФА подключены к минусовой шине для сглаживания пульсации выпрямленного напряжения так, чтобы через них проходил весь ток подстанции.

Также тяговая подстанция имеет следующее оборудование, которое, как и выше указанное, уже отработало свой срок службы:

- вакуумные выключатели в количестве 10 штук. Год выпуска 2004, введенные в эксплуатацию 11.2004 года (срок службы 25 лет);

- вакуумные выключатели в количестве 2 штук. Год выпуска 2009, введенные в эксплуатацию 02.2010 года (срок службы 25 лет);

- быстродействующие выключатели ВАБ-49 в количестве 2 штук. Год выпуска 2008, введенные в эксплуатацию 06.2008 года (срок службы 18 лет);

- дизель генератор ДГМА-75/400. Год выпуска 1983, введенный в эксплуатацию 12.1983 года (срок службы 20 лет);

- трансформаторы тока ТФНД-35. Год выпуска 1979, введенные в эксплуатацию 03.1980 года (срок службы 25 лет);

- трансформаторы напряжения ЗНОМ-35. Год выпуска 1981, введенные в эксплуатацию 12.1981 года (срок службы 25 лет).

Остальное оборудование 1961 года выпуска. Введено в эксплуатацию 01.1962 года (срок службы 25 лет).

Объем электроэнергии, переработанный тяговой подстанцией за 2009 год: общее количество - 36 млн.727 тыс.964 кВт; расход на тягу – 20 млн.403 тыс.932 кВт. Объем электроэнергии, переработанный тяговой подстанцией за январь и февраль 2010 года: общее количество - 7 млн.600 тыс.040 кВт; расход на тягу – 3 млн.501 тыс.480 кВт. Однолинейная схема ТП-Донецк приведена на рис. В.100.

При модернизации подстанции предлагается заменить следующее оборудование :

1. Выключатели АБ 2/4 - на новые быстродействующие выключатели ВАБ-206, которые по сравнению с ВАБ-49, ВАБ-70 (77), Gerapid, Secheron имеют следующие основные преимущества :

- ВАБ-206 владеет повышенным ресурсом из электрической износоустойчивости;

- имеет встроенное реле тока с «сухими» контактами и малогабаритную станцию управления, благодаря чему он может располагаться на выкатном элементе ячейки КРП. Благодаря быстрому действию встроенного реле тока, есть возможность менять чувствительность к скорости роста тока;

- по сравнению с зарубежными аналогами, выключатель ВАБ-206 имеет значительно лучшее токоограничение в индуктивных цепях и на порядок больший ресурс дугогасительной камеры. Также практически на порядок меньший выхлоп ионизированных газов из дугогасительной камеры, которая уменьшает общие габариты ячейки и повышает безопасность персонала.

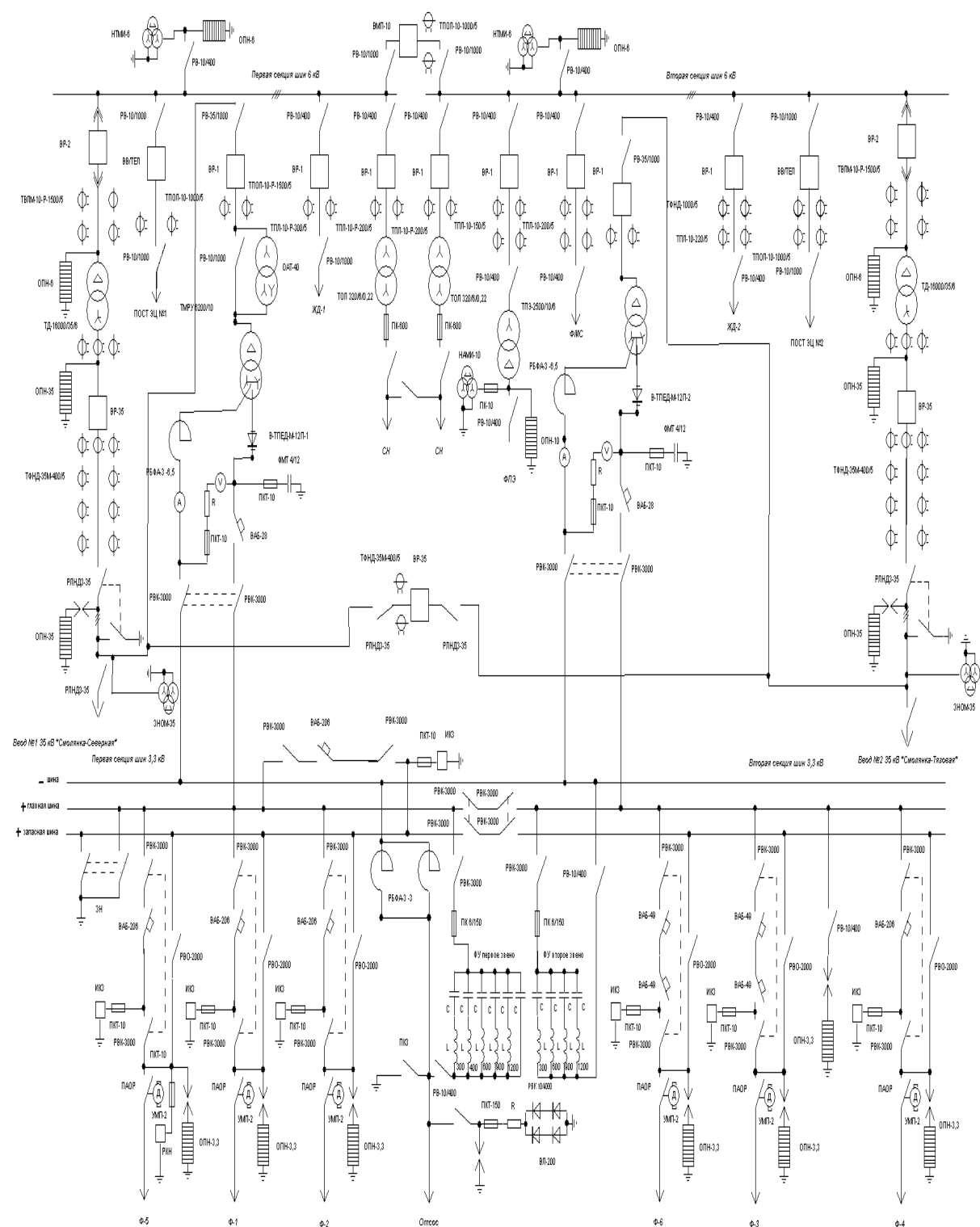


Рисунок В.100- Однолинейная схема модернизируемой подстанции

2. Вентильные разрядники РМВУ-3.3 - на ограничители перенапряжений ОПН-3.3, которые имеют такие преимущества :

- глубокая защита электрического оборудования от коммутационных и атмосферных перенапряжений в сетях переменного тока промышленной частоты;

- ограничители перенапряжений изготавливаются в полимерном корпусе в отличие от традиционных вентильных разрядников в керамическом "кожухе", что позволяет их использовать в районах с большим загрязнением окружающей среды на открытом воздухе;

- ограничители перенапряжений не содержат искрового промежутка. Поскольку в ОПН нет искровых промежутков, то при них срабатывании изнашивания контактов не происходит. Варисторы, которые применяются в ограничителях перенапряжений, имеют стойку вольт-амперную характеристику, которая не меняется в процессе эксплуатации. Поэтому, в отличие от вентильных разрядников, ограничитель перенапряжений не нуждается в обслуживании и контроле параметров в течение всего срока службы;

- высокая механическая прочность и надежность;

- малый вес и габаритные размеры.

3. Масляные выключатели типа С-35 - на вакуумные выключатели ВР-35, масляные выключатели типа ВМПЕ-10 – на вакуумные выключатели ВР-2, масляные выключатели типа ВМГ-10 – на вакуумные выключатели ВВ/ТЕЛ. Широкое применение выше указанных вакуумных выключателей на напряжение 6-35 кВ объясняется следующими их преимуществами:

- высокий механический и коммутационный ресурс при коммутации номинальных токов и номинальных токов отключения. Число отключений номинальных токов вакуумным выключателем без замены вакуумной дугогасительной камеры составляет 10-50 тысяч, число отключений номинального тока отключения – 20-200, что в 10-20 раз превышает соответствующие параметры имело масляных выключателей;

- резкое снижение эксплуатационных расходов. Обслуживание вакуумных выключателей сводится к смазки механизма и привода, проверке износа контактов 1 раз на год;
- отсутствие необходимости ремонта в течение всего срока службы;
- полная взрыво- и пожарная безопасность, возможность работы в агрессивных средах;
- широкий диапазон температур окружающей среды, в котором возможна работа вакуумной дугогасительной камеры;
- повышенная стойкость к ударным и вибрационным нагрузкам вследствие маленькой массы и компактной конструкции выключателя.
- простота встраивания в разные типы КРП и удобство организации необходимых блокировок;
- небольшое потребление энергии по сетям управления;
- бесшумность, чистота, удобство обслуживания, обусловленные малым выделением энергии в дуге и отсутствие выбросов масла, газов при отключении токов короткого замыкания;
- отсутствие загрязнения окружающей среды;
- высокая надежность и безопасность эксплуатации, сокращение времени на монтаж;
- доступная стоимость.

4. Выпрямители ПВА с шести-пульсовой схемой выпрямления на новые выпрямители В-ТПЕД-3,15к-12П с двенадцати-пульсовой схемой выпрямления и с воздушным естественным охлаждением, которые имеют следующие преимущества:

- созданные на таблеточных диодах 38-го класса;
- позволяет уменьшить пульсацию выпрямленного напряжения;
- увеличивается $\cos \varphi$ подстанции;
- обратное напряжение вентилях значительно ниже;
- более высокий КПД;

- работа оборудования для сглаживания пульсации выпрямленного напряжения упрощается, чем снижается мешающее действие электрической тяги на линии связи;

- переоборудование существующих тяговых блоков « трансформатор-выпрямитель» из шести пульсовой схемы выпрямления на двенадцати пульсовую позволяет уменьшить потери электроэнергии на 2,5 %.

В.2 Расчёты экономической эффективности модернизации тяговых подстанций Донецкой ж.д. с учётом использования прогрессивных методов закупки электроэнергии

Рассчитаем годовой экономический эффект от перехода на 12-ти пульсовую схему выпрямления, который определим исходя из количества перерабатываемой электроэнергии на тягу поездов до 23 Млн.кВт·ч/год и средней стоимости электроэнергии за 2008 г.

$$E=(E_{тс}+E_{т}+E_{с}+E_{в}+E_{д}), \quad (В.228)$$

где $E_{тс}$ – экономия электроэнергии в тяговой сети за счет расхождения внешних характеристик;

$E_{т}$ – экономия электроэнергии в трансформаторах за счет увеличения КПД;

$E_{с}$ – экономия электроэнергии в системе электроснабжения за счет сокращения потребления реактивной мощности;

$E_{в}$ – экономия электроэнергии за счет исключения принудительной вентиляции;

$E_{д}$ – экономия электроэнергии за счет уменьшения потерь в диодах.

Данные приведены в табл. В.69.

Таблица В.69-
за счет снижения расхода электроэнергии

Экономия

Количество израсходованной электроэнергии на тягу поездов, Млн.кВт·ч/год	Экономия электроэнергии, тыс. кВт·ч/год при замене 6-ти пульсовых нулевых схем 12-ти пульсовыми					
	В тяговой сети за счет расхода внешних характеристик;	в трансформаторах за счет увеличения КПД	в системе электроснабжения за счет сокращения потребления реактивной мощности	за счет исключения принудительной вентиляции	за счет уменьшения потерь в диодах	Всего
до 23	3,0	69,3	404,6	61,3	168,2	733,8
18	2,3	54,1	315,6	61,3	168,2	601,5
9	1,2	27	157,8	61,3	168,2	415,5
5	0,8	18	105	61,3	168,2	353,3

Результаты расчетов экономии электроэнергии при модернизации выпрямительного агрегата тяговой подстанции представлены в табл. В.70.

Таблица В.70 - Экономия электроэнергии при модернизации выпрямительного агрегата тяговой подстанции

Агрегат	Потери в диодах, тыс. кВт·ч/год	Расходы на вентиляцию, тыс. кВт·ч/год	Экономия при модернизации, тыс. кВт·ч/год
Агрегат, который выводится из работы	252,3	61,3	$(252,3-84,1)+61,3=$ 229,5
Агрегат, который проходит модернизацию	84,1	-	

Рассчитаем потери энергии в диодах при модернизации УВКЕ:

- Потери энергии в диодах при средней нагрузке 400А, ток диода $400/5=80\text{А}$ (5 параллельных диодов в фазе), падение напряжения на диоде - $0,5\text{В}(1,5\times 30\%)$

- до модернизации (720 диодов)

$$0,5\text{В}\times 80\text{А}\times 720\text{шт}=28800\text{ Вт}\cdot\text{ч}$$

$$\text{за год} - 28,8\text{ кВт}\times 24\text{год}\times 365\text{дней}=252288\text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$$

- после модернизации (48 диодов, ток диода 400А)

$$0,5\text{В}\times 400\text{А}\times 48\text{шт}=9600\text{Вт}\cdot\text{ч}$$

за год – $9,6 \text{ кВт} \times 24 \text{ год} \times 365 \text{ дней} = 84096 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}$

- годовая экономия

$$252288 - 84096 = 168192 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}$$

2. Экономия за счет исключения расхода энергии на принудительное охлаждение УВКЕ при мощности двигателя обдува 7 кВт.

$$7 \text{ кВт} \times 24 \text{ год} \times 365 \text{ дней} = 61,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}$$

Экономия по одном объекту при работе на протяжении года составляет: 353,3 тыс.кВт·ч.

Рассчитаем эффективность перевода электроснабжения тяги на I класс напряжения по тяговым подстанциям Донецк и Красноармейск.

Исходные данные для расчетов:

1. Расходы на электроснабжение тяги за март 2009 г.:
 - по тяговой подстанции Донецк – 1 453 680 кВт;
 - по тяговой подстанции Красноармейск – 2 378 856 кВт.
2. Существующие тарифы на электроэнергию (на 2009 г.):
 - на I кл. напряжения (27,5; 35; 110кВт) – 0,5168 грн.;
 - на II кл. напряжения (6; 10кВт) – 0,6931грн.

Рассчитаем ежемесячные расходы на закупку электроэнергии для тяги поездов

По подстанции Донецк

- на I кл. напряжения – $1\,453\,680 \times 0,5168 = 751\,262 \text{ грн.}$
- на II кл. напряжения – $1\,453\,680 \times 0,6931 = 1\,007\,546 \text{ грн.}$

Ежемесячная экономия от перевода тяги с II класса напряжения I класс по тяговой подстанции Донецк $1\,007\,546 \text{ грн.} - 751\,262 \text{ грн.} = 256\,284 \text{ грн.}$

По подстанции Красноармейск

- на I кл. напряжения – $2\,378\,856 \times 0,5168 = 1\,229\,393 \text{ грн.}$
- на II кл. напряжения – $2\,378\,856 \times 0,6931 = 1\,648\,785 \text{ грн.}$

Ежемесячная экономия от перевода тяги со II класса напряжения на I кл. по тяговой подстанции Красноармейск $1\,648\,785 \text{ грн.} - 1\,229\,393 \text{ грн.} = 419\,392 \text{ грн.}$

Расходы на реконструкцию тяговой подстанции (один агрегат)

1. Приобретение блока выключателя 35кВт – 200тыс.грн.
2. Приобретение трансформатора преобразовательного - 2500 тыс.грн.
3. Приобретение выпрямителя - 350 тыс.грн.
4. Электромонтажные работы и материалы - 150 тыс.грн.
5. Проектные работы - 100 тыс.грн.

Всего: 3 300 тыс. грн.

Срок окупаемости для подстанции Донецк $3\,300/256=9$ мес.

Срок окупаемости для подстанции Красноармейск $3\,300/419=8$ мес.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Расчёт норм расхода электроэнергии на собственные нужды тяговой подстанции постоянного тока Зелёный Клин

На тяговой подстанции Зеленый Клин-110/35/10 кВ установлено следующее оборудование:

- Трансформаторы: типа ТДТН-40000-110/35/10 - 2 шт., Типа ТМРУ - 1600 - 2 шт.
- Выключатели: типа МКП-110-3 шт., Типа МКП-35-4 шт.
- Разъединители 110 кВ типа РЛНДЗ-110 - 10 шт.
- Отделители 110 кВ-2 шт., Короткозамыкатели 110 кВ - 2 шт.
- Трансформаторы собственных нужд типа ТМ-320/10 - 1 шт., ТМ-250/10 - 1 шт.
- Размеры ОПК - 310 м²; (площадь производственных и бытовых помещений здания двухэтажного тяговой подстанции, где поддерживается температура воздуха +18 ... +21 ° С.

- Оперативный ток - постоянный. В соответствии с разделом 7 [295] вычисляют составляющие значений нормативных расходов электроэнергии на собственные нужды подстанции.

Значения составляющих норм общеподстанционного расхода электроэнергии принимают согласно таблице А.1 приложения А:

- На обогрев, вентиляцию и освещения помещений ОПК:

$$A_{\text{пит1}} \cdot F = 0,143 \cdot 310 = 44,33 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч в год};$$

- На наружное освещение - 3,0 тыс. кВт·ч в год;
- Прочие расходы - 2,3 тыс. кВт·ч в год.

Результаты вычисления значений электроэнергии на месяцы расчетного периода согласно пункту 7.1.2 «Инструкции...» представлены в табл. Г.71. Результаты вычисления значений нормативных расходов электроэнергии на охлаждение трансформаторов подстанции на месяцы расчетного периода представлены в табл. Г.72

Составляющие значений нормативных расходов электроэнергии на охлаждение трансформаторов типа ТДТН-40000-110/35/10 в год соответственно:

- Трансформаторов с системой охлаждения Д:

$$A_{\text{Д}} = (7 \cdot 2 + 0,28 \cdot 2 \cdot 40) = 36,4 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч в год.}$$

Название расчётного периода	Значения составляющих нормативных общеподстанционных затрат электроэнергии, тыс. кВт · ч			Значение нормативных общеподстанционных затрат электроэнергии, тыс. кВт · ч
	На обогрев помещений	На наружное освещение	Другие расходы электроэнергии	
Январь	8,423	0,36	0,196	8,979
Февраль	7,625	0,33	0,177	8,132
Март	8,423	0,3	0,196	8,919
Апрель	1,64	0,21	0,189	2,039
Май	0	0,15	0,196	0,346
Июнь	0	0,15	0,189	0,339
Июль	0	0,15	0,196	0,346
Август	0	0,15	0,196	0,346
Сентябрь	0	0,18	0,189	0,369
Октябрь	1,64	0,3	0,196	2,136
Ноябрь	8,157	0,36	0,189	8,706
Декабрь	8,423	0,36	0,196	8,979
Год	44,33	3	2,3	49,63

Таблица Г.71- Нормативные значения общеподстанционных расходов электроэнергии на месяцы расчетного периода

Составляющие значений нормативных расходов электроэнергии на обогрев оборудования вычисляют по разделу 7.4 «Инструкции..».

- Выключателей 110 кВ равна произведению нормы расхода электроэнергии по таблице А.2 приложения А на количество выключателей (3 шт.):

$$5,66 \cdot 3 = 16,98 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч в год};$$

- Выключателей 35 кВ равна произведению нормы расхода электроэнергии по таблице А.2 приложения А на количество выключателей (4 шт.)

$$0,02 \cdot 4 = 0,08 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч в год};$$

- Обогрев приводов отделителей и короткозамыкателей (4 шт.)

Принято согласно норме по пункту 7.4.4 «Инструкции...»:

$$4 \cdot 1,1 = 4,4 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч в год.}$$

Таблица Г.72 - Значение нормативных расходов электроэнергии на охлаждение трансформаторов подстанции на месяцы расчетного периода

Название расчётного периода	Значение нормативных расходов электроэнергии на охлаждение трансформаторов, тыс. кВт · ч
Январь	3,094
Февраль	2,8028
Март	3,094
Апрель	2,9848
Май	3,094
Июнь	2,9848
Июль	3,094
Август	3,094
Сентябрь	2,9848
Октябрь	3,094
Ноябрь	2,9848
Декабрь	3,094
Год	36,4

Результаты вычисления значений нормативных расходов электроэнергии на обогрев оборудования A_0 на месяцы расчетного периода представлены в табл. Г.73.

Значения составляющих норм расхода электроэнергии на системы управления подстанцией принимают согласно таблице А.6 приложения А «Инструкции...»:

- На зарядно-подзарядные устройства - 16,5 тыс. кВт·ч в год;
- На вентиляцию помещения аккумуляторной - 8,4 тыс. кВт·ч в год;
- На аппаратуру связи и телемеханики - 8,7 тыс. кВт·ч в год.

Таблица Г.73 - Значение нормативного расхода электроэнергии на обогрев оборудования на месяцы расчетного периода

Название расчётного периода	Значение нормативного расхода электроэнергии на обогрев оборудования, тыс. кВт · ч
Январь	5,49376
Февраль	4,9358
Март	0,2146
Апрель	0

Май	0
Июнь	0
Июль	0
Август	0
Сентябрь	0
Октябрь	0,17168
Ноябрь	5,1504
Декабрь	5,49376
Год	21,46

Результаты вычисления значений нормативных расходов электроэнергии на системы управления подстанцией $A_{\text{КЕР}}$ месяцы расчетного периода согласно пункту 7.7.3 «Инструкции» представлены в табл. Г.74.

Для определения потерь в трансформаторах собственных нужд проведем расчет средних потерь в трансформаторах собственных нужд за месяц в табл. Г.75.

В табл. Г.75 используются следующие обозначения:

$W_{P\phi}$ - количество потребленной активной энергии;

$W_{Q\phi}$ - количество потребленной реактивной энергии;

$W_{\text{в}}$ - средние потери в ТВП тяговой подстанции Зеленый Клин за 2006 год.

Таблица Г.74 - Значение нормативного расхода электроэнергии на системы управления подстанцией на месяцы расчетного периода

Название расчётного периода	Значение нормативного расхода электроэнергии на системы управления подстанцией, тыс. кВт · ч
Январь	2,856
Февраль	2,5872
Март	2,856
Апрель	2,7552
Май	2,856
Июнь	2,7552
Июль	2,856
Август	2,856
Сентябрь	2,7552
Октябрь	2,856
Ноябрь	2,7552
Декабрь	2,856
Год	33,6

Таким образом потери в ТВП за год (при нормальном режиме включен первый ТВП):

$$A_{\text{ТРВП}} = 1,752 \cdot 12 = 21,024 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч в год}$$

Значение нормативного расхода электроэнергии на собственные нужды подстанции 110 кВ за год вычисляют по формуле (9) «Инструкции...»:

$$A_{\text{ВППС}} + A_{\text{ЗП}} + A_{\text{Д}} + A_{\text{Ц}} + A_{\text{О}} + A_{\text{ВΣ}} + A_{\text{СКΣ}} + A_{\text{КЕР}}$$

$$+ A_{\text{ТРВП}} = 49,63 + 36,4 + 48,048 + 58,4 + 33,6 + 21,02 = 247,104 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч}$$

Таблица Г.75 - Расчет потерь в трансформаторах собственных нужд

Параметры трансформаторов			Переработка электроэнергии		Время работи, ч	Потери электро- энергии за месяц, кВт · ч.
Номинальная мощность Sn, кВт · А	Потери		WPф, кВт	WQф кВА		
	dPxx	dPкз				
320	1,9	6,2	45520	50000	720	1752,479
250	0,82	3,7	0	0	0	0

Расходы на отопление закрытого распределительного устройства 10 кВ и 3,3 кВ.

Помещения ЗРУ-10 кВ обогреваются с помощью 6 электропечей, помещения ЗРУ-3, 3 кВ обогревается с помощью 14 электропечей, мощность каждого 1 кВт. Таким образом имеем согласно вышеизложенного:

Результаты вычисления значений нормативных расходов электроэнергии на собственные нужды подстанции на месяцы (кварталы) расчетного периода представлены в табл. Г.76.

Таблица Г.76 - Значение нормативного расхода электроэнергии на собственные нужды подстанции на месяцы (кварталы) расчетного периода

Название расчётного периода	Значения составляющих нормативного расхода электроэнергии на собственные нужды, тыс. кВт * ч						Значение нормативных затрат электроэнергии , тыс. кВт · ч
	$A_{ЗП}$	$A_{Д}$	$A_{В}$	$A_{О}$	$A_{КЕР}$	$\Delta A_{ТРВП\Sigma}$	

Январь	8,98	3,09	4,00	11,10	2,86	1,75	31,78
Февраль	8,13	2,80	4,00	10,04	2,59	1,75	29,32
Март	8,92	3,09	4,00	11,10	2,86	1,75	31,72
I квартал	26,03	8,99	12,01	32,24	8,30	5,26	92,82
Апрель	2,04	2,98	4,00	2,16	2,76	1,75	15,70
Май	0,35	3,09	4,00	0,00	2,86	1,75	12,05
Июнь	0,34	2,98	4,00	0,00	2,76	1,75	11,84
II квартал	2,72	9,06	12,01	2,16	8,37	5,26	39,58
Июль	0,35	3,09	4,00	0,00	2,86	1,75	12,05
Август	0,35	3,09	4,00	0,00	2,86	1,75	12,05
Сентябрь	0,37	2,98	4,00	0,00	2,76	1,75	11,87
III квартал	1,06	9,17	12,01	0,00	8,47	5,26	35,97
Октябрь	2,14	3,09	4,00	2,16	2,86	1,75	16,00
Ноябрь	8,71	2,98	4,00	10,75	2,76	1,75	30,95
Декабрь	8,98	3,09	4,00	11,10	2,86	1,75	31,78
IV квартал	19,82	9,17	12,01	24,00	8,47	5,26	78,73
Год	49,64	36,40	48,05	58,40	33,60	21,02	247,10

$W_O = 20 \cdot 2920 = 58400$ тыс. кВт·ч за год.

Соответственно, с учетом коэффициента сезонности для приборов отопления, потребления электроэнергии с разделением по месяцам будет иметь вид, показанный в табл. Г.77

Расходы на вентиляцию ПВА. Для вентиляции на тяговой подстанции Зеленый Клин на каждый агрегат установлены электродвигатели мощностью 5,5 кВт. Один ПВА и его вентиляция работают круглосуточно. Таким образом затраты на вентиляцию ПВА составляют:

$$5,5 \cdot 24 \cdot 364 = 48,048 \text{ тыс. кВт·ч за год}$$

$$48,048 / 12 = 4,004 \text{ тыс. кВт·ч за месяц.}$$

Таблица Г.77 - Расход электроэнергии на обогрев ЗРУ-10 кВ, ЗРУ-3, 3 кВ

Название расчётного периода	Значение нормативного расхода электроэнергии на обогрев оборудования, тыс. кВт * ч
Январь	11,096
Февраль	10,0448
Март	11,096
Апрель	2,1608
Май	0
Июнь	0
Июль	0
Август	0
Сентябрь	0
Октябрь	2,1608
Ноябрь	10,7456
Декабрь	11,096
Год	58,400

Если приборы учета установлены с низкой стороны при определении потерь в трансформаторах собственных нужд по методике встречаются случаи, при которых ошибочно не учитывают нагрузки фидеров СЦБ. Для объяснения приведем типичную схему питания фидеров СЦБ - рис. Г.101.

Из анализа следует, что при такой схеме учета в расчет потерь в трансформаторах собственных нужд необходимо включать электроэнергию, потребленную потребителями СЦБ. После учета этого пункта расчет

проводят согласно нормативных документов.

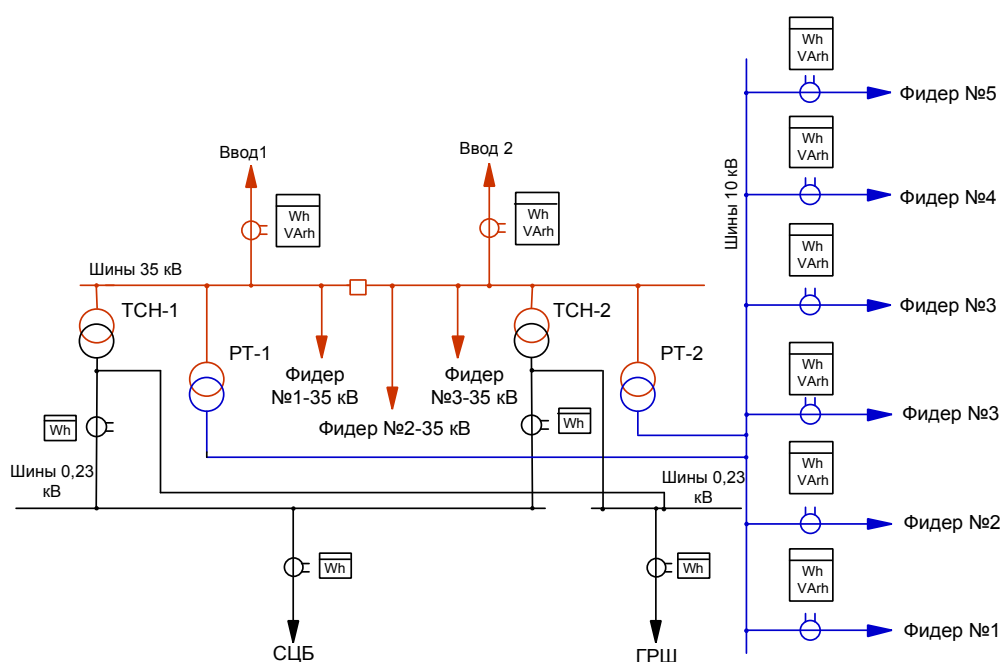


Рисунок Г.101 - Расчетная схема для определения потерь в трансформаторах собственных нужд

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Генетический алгоритм

Д.1 Алгоритмы работы ГА

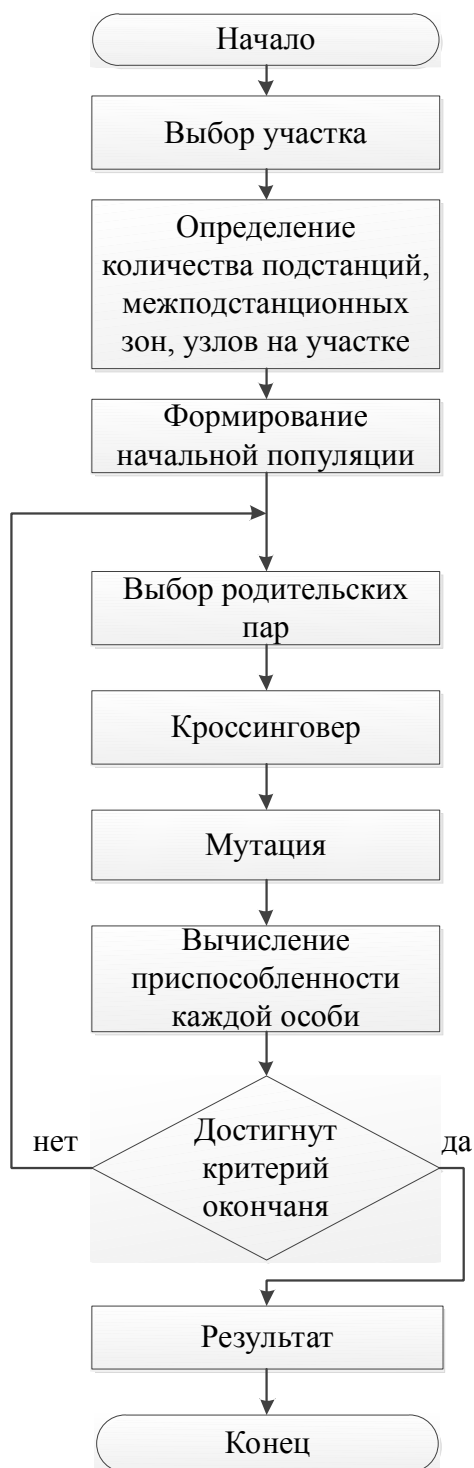


Рисунок Д.102 - Алгоритм ГА

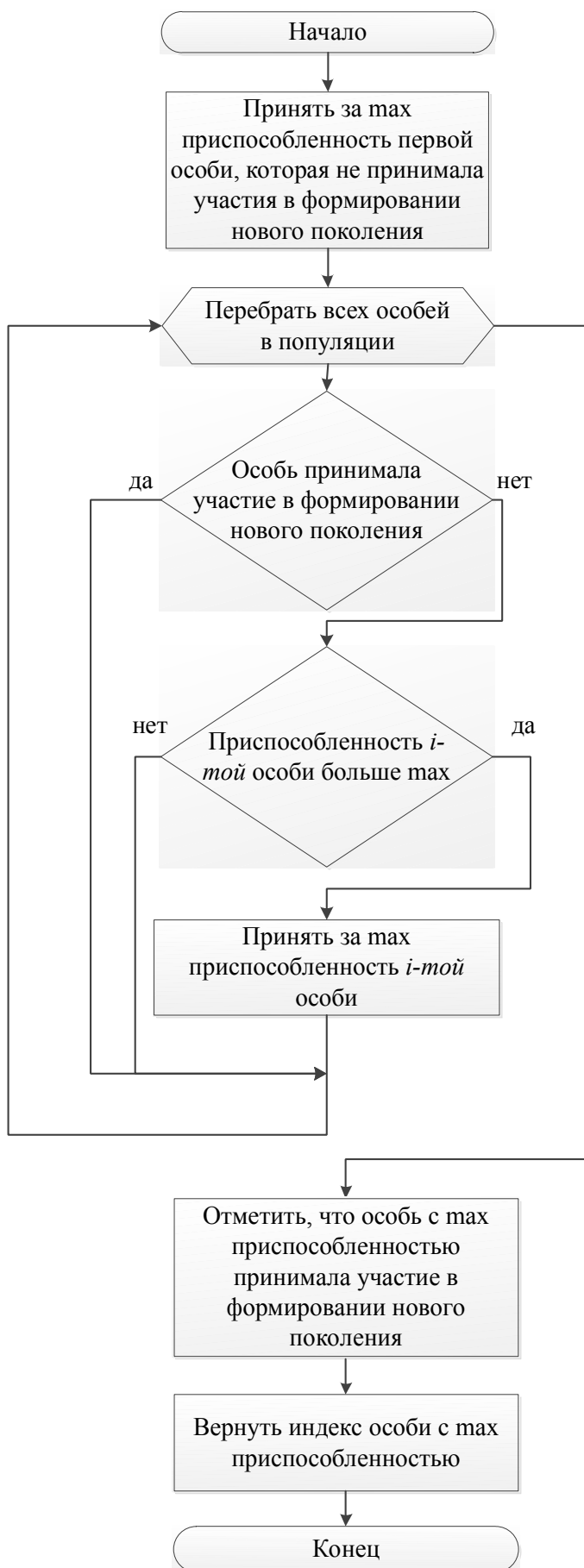


Рисунок Д.103 - Алгоритм выбора особи с максимальной приспособленностью

Д.2 Текст программы, реализующей ГА для определения рациональных режимов системы электроснабжения тяги поездов постоянного тока

Файл individual.h

```
//Класс представления особи в генетическом алгоритме
//Ответственность класса: представление хромосомы;
//                               кодирование и декодирование генетической
//                               информации;
//                               вычисление приспособленности особи;
//                               мутация особи.
class individual
{
public:
    int *Gens;                //массив генов
    int GensNum;              //размер массива генов
    float Fitness;            //приспособленность особи
    float decodeData;         //декодированное значение особи
    void CountFitness();       //метод расчета приспособленности
    individual(int gensNum);    //конструктор с параметрами
    individual(){};            //конструктор по умолчанию
    ~individual();              //деструктор
    void code();               //метод кодирования данных
    void decode(float a, float b); //метод декодирования данных
    void Mutate();              //метод мутации
};
```

Файл individual.cpp

```
#include "individual.h"
#include <vcl.h>
#include <math.h>
#include <math.hpp>
#include <stdlib.h>

//конструктор с параметром
//входные параметры: gensNum – размер хромосомы.
//выходные параметры: Gens – хромосома, заполненная случайным
образом;
//                               Fitness – приспособленность особи.
individual::individual(int gensNum)
{
```

```

    Gens=new int[gensNum]; //выделить память под массив ген
    GensNum=gensNum;
    code();                //закодировать хромосому
    CountFitness();        //рассчитать приспособленность особи
}

//метод расчета приспособленности
//входные параметры: Gens – хромосома.
//выходные параметры: Fitness – приспособленность особи.
void individual::CountFitness()
{
    decode(); //декодировать данные хромосомы
    Fitness=fmMain->f(this); //расчет целевой функции
}

//деструктор
individual::~individual()
{
    delete[] Gens; //удаление хромосомы
}

//метод кодирования данных
//входные параметры: gensNum – размер хромосомы.
//выходные параметры: Gens – хромосома, заполненная случайным
образом.
void individual::code()
{
    //перебрать все гены хромосомы
    for(int j=0; j<GensNum; j++)
    {
        float d;
        d=(float)rand()/RAND_MAX; //выкинуть случайное число
        if(d<0.5) //если случайное число меньше 0.5
            Gens[j]=0; //то ген заполнить нулем
        else Gens[j]=1; //иначе ген заполнить единицей
    }
}

//метод декодирования данных
//входные параметры: a, b – границы возможных значений числа;
//
//                                Gens – хромосома;
//                                gensNum – размер хромосомы.
//выходные параметры: decodeData – декодированное значение особи.
void individual::decode(float a, float b)
{

```

```

float k=0;
for(int j=0; j<GensNum; j++)
{
    k+=Gens[j]*pow(2,j);
}
//формула двоичного декодирования числа
k=(k/pow(2,GensNum)*1.0)*(b-a)*1.0+a*1.0;
decodeData=k;
}

//метод мутации особи
//входные параметры:   Gens – хромосома;
//                       gensNum – размер хромосомы.
//выходные параметры: Gens – мутировавшая хромосома.

```

```

void individual::Mutate()
{
    //выкинуть случайное число от 0 до GensNum
    int p=random(GensNum-1);
    if(Gens[p]==1) //если бит под номером p равен 1
        Gens[p]=0; //изменить его значение на 0
    else Gens[p]=1; //иначе изменить его значение на 1
}

```

Файл population.h

```

//Класс представления популяции генетического алгоритма
//Ответственность класса: создание популяции;
//                       отбор родительских пар;
//                       кроссинговер;
//                       запуск генетического алгоритма.
class population
{
public:
    individual **Popul;    //массив особей популяции
    int PopulSize;         //размер популяции
    int GensNum;           //размер хромосомы особи
    float CrossChance;     //вероятность кроссинговера
    float MutateChance;    //вероятность мутации
    bool *fUsed;           //массив использования особей для
    формирования нового поколения
    int NumPodst;          //количество подстанций
    int NumUch;            //количество участков
    float lastBest;        //лучшая особь в предыдущем поколении
    int povtor;            //кол-во итераций ГА без изменения лучшей
    особи

```

```

    int **Matr;           //матрица, хранящая кол-во путей и кол-во
узлов на каждом межподстанционном участке
    int r;               //размер матрицы Matr
    int select();        //метод отбора родительской особи для
формирования нового поколения
    void crossover(int x, int y); //метод кроссинговера
    population(int popSize, int gensNum, float cross, float mut, int **matr, int
razmer);                //конструктор с параметрами
    ~population();       //деструктор
    individual* Start(int iterations); //метод запуска генетического
алгоритма
};

```

Файл population.cpp

```

#include "population.h"
#include <vcl.h>
#include <math.h>
#include <math.hpp>
#include <stdlib.h>

// метод отбора родительской особи
//входные параметры: PopulSize – размер популяции;
//
//                      fUsed – массив использования особей для
//                      формирования нового поколения;
//                      Popul – массив особей популяции.
//выходные параметры: k – номер особи, которая примет участие в
//                      формировании новой популяции.
int population::select()
{
    float min;
    int k=0;
    //перебрать всех особей в популяции
    for(int i=0; i<PopulSize; i++)
    {
        if(fUsed[i]==false) //если особь не была использована
        {
            //принять ее приспособленность за минимальную
            min = Popul[i]->Fitness;
            //запомнить номер особи с минимальной приспособленностью
            k=i;
            break; //выход из цикла
        }
    }
    //перебрать всех особей популяции
}

```



```

for(int i=0; i<PopulSize; i++)
{
    if(fUsed[i]==false) //если особь не использовалась
    {
        //если приспособленность особи меньше минимальной
        if(Popul[i]->Fitness<= min)
        {
            //принять ее приспособленность за минимальную
            min =Popul[i]->Fitness;
            //запомнить номер особи с минимальной приспособленностью
            k=i;
        }
    }
}
return k; //вернуть номер особи с наименьшей приспособленностью
}

// метод отбора родительской особи
//входные параметры:  popSize – размер популяции;
//                      gensNum – размер хромосомы особи;
//                      cross – вероятность кроссинговера;
//                      mut – вероятность мутации;
//                      matr – матрица, хранящая кол-во путей и кол-во
узлов на каждом межподстанционном участке;
//                      razmer – размер матрицы matr.
//выходные параметры: PopulSize – размер популяции;
//                      GensNum – размер хромосомы особи;
//                      CrossChance – вероятность кроссинговера;
//                      MutateChance – вероятность мутации;
//                      Matr – матрица, хранящая кол-во путей и кол-во
узлов на каждом межподстанционном участке;
//                      r – размер матрицы matr;
//                      povtor – кол-во итерации работы ГА без
изменения лучшей особи
population::population(int popSize, int gensNum, float cross, float mut, int
**matr, int razmer)
{
    povtor=0;
    r=razmer;
    //выделить память под матрицу Matr
    Matr = new int*[razmer];
    for(int i=0; i<r; i++)
    {
        Matr[i] = new int[2];
        for(int j=0; j<2; j++)

```

```

        Matr[i][j]= matr[i][j];
    }
    GensNum = gensNum;
    CrossChance= cross;
    MutateChance= mut;
    PopulSize=popSize;
    //формирование первоначальной популяции
    Popul = new individual*[PopulSize];
    for(int i=0; i<PopulSize; i++)
        Popul[i]=new individual(GensNum);
}

//деструктор
population::~~population()
{
    delete[] Popul; //удаление популяции
}

// метод запуска генетического алгоритма
//входные параметры:  iterations – максимальное количество итераций;
//                      PopulSize – размер популяции;
//                      GensNum – размер хромосомы особи;
//                      CrossChance – вероятность кроссинговера;
//                      MutateChance – вероятность мутации;
//                      fUsed – массив использования особей для
формирования нового поколения
//выходные параметры: PopulSize – размер популяции;
//                      GensNum – размер хромосомы особи;
//                      CrossChance – вероятность кроссинговера;
//                      MutateChance – вероятность мутации;
//                      Matr – матрица, хранящая кол-во путей и кол-во
узлов на каждом межподстанционном участке;
//                      r – размер матрицы matr;
//                      povtor – кол-во итерации работы ГА без
изменения лучшей особи
individual* population::Start(int iterations)
{
    //пока не достигнуто максимальное количество итераций
    while(iterations)
    {
        //выделить память под массив fUsed
        fUsed=new bool[PopulSize];
        //заполнить массив fUsed нулями
        for(int i=0; i<PopulSize; i++)
        {

```

```

        fUsed[i]=false;
    }
    //принять за лучшую первую особь в популяции
    int bestNum=0;
    //перебрать все особи в популяции
    for(int i=0; i<PopulSize; i++)
    {
        //если приспособленность особи меньше приспособленности
        лучшей особи в популяции
        if(Popul[bestNum]->Fitness>Popul[i]->Fitness)
        {
            bestNum=i; //запомнить номер лучшей особи
        }
    }
    //отметить лучшую особь как использованную
    fUsed[bestNum]=true;
    bestNum=0;
    //перебрать все особи популяции
    for(int i=0; i<PopulSize; i++)
    {
        //если приспособленность особи меньше приспособленности лучшей
        особи в популяции и особь не использовалась
        if(Popul[bestNum]->Fitness>Popul[i]->Fitness&& fUsed[i]==false)
        {
            bestNum=i; //запомнить номер лучшей особи
        }
    }
    //отметить лучшую особь как использованную
    fUsed[bestNum]=true;
    //перебрать особей для формирования новой популяции
    for(int i=0; i<((PopulSize-2)/2); i++)
    {
        int firstPar=select(); //выбор первой особи родительской пары
        fUsed[firstPar]=true; //отметить особь как использованную
        int secondPar=select(); //выбор второй особи родительской пары
        fUsed[secondPar]=true; //отметить особь как использованную
        if(Get01Rand()<=CrossChance)
            crossover(firstPar,secondPar); //кроссинговер
        if(Get01Rand()<=MutateChance)
            Popul[firstPar]->Mutate(); //мутация первой особи
        if(Get01Rand()<=MutateChance)
            Popul[secondPar]->Mutate(); //мутация второй особи
    }
    //расчет приспособленности для каждой особи в популяции
    for(int i=0; i<PopulSize; i++)

```

```

{
    Popul[i]->CountFitness();
}
bestNum=0; //принять за лучшую первую особь в популяции
//перебрать все особи в популяции
for(int i=0; i<PopulSize; i++)
{
    //если приспособленность особи меньше приспособленности лучшей
    особи в популяции
    if(Popul[bestNum]->Fitness>Popul[i]->Fitness)
    {
        bestNum=i; //запомнить номер лучшей особи
    }
}
//если лучшая особь популяции не отличается от лучшей особи
предыдущей итерации
if(lastBest==Popul[bestNum]->Fitness)
    povtor++; //увеличить на 1 кол-во итераций ГА без изменения
лучшей особи
else povtor=0; //иначе обнулить кол-во итераций ГА без изменения
лучшей особи
lastBest= Popul[bestNum]->Fitness; //запомнить лучшую особь
if(povtor>5) //если кол-во повторов более 5
    return Popul[bestNum]; //то вернуть лучшую особь
iterations--;
}
int bestNum=0; //принять за лучшую первую особь в популяции
//перебрать все особи в популяции
for(int i=0; i<PopulSize; i++)
{
    //если приспособленность особи меньше приспособленности лучшей
    особи в популяции
    if(Popul[bestNum]->Fitness>Popul[i]->Fitness)
    {
        bestNum=i; //запомнить номер лучшей особи
    }
}
return Popul[bestNum]; //вернуть лучшую особь
}

// метод кроссинговера
//входные параметры:  х, у – номера особей, которые принимают
участие в кроссинговере;
//
//      GensNum – длина хромосомы особи;
//      r – кол-во межподстанционных зон.

```

```

//выходные параметры: Popul[x], Popul[y] – новые особи популяции.
void population::crossover(int x, int y)
{
    int *M;
    int k=0;
    M=new int [GensNum];
    //скопировать хромосому первой особи в вспомогательный массив
    for(int i=0; i<GensNum; i++)
        M[i]=Popul[x]->Gens[i];
    //для каждой межподстанционной зоны
    for(int j=0; j<r; j++) {
        //выкинуть случайное число, которое находится в промежутке,
        //отведенном в хромосоме для данной межподстанционной зоны
        int rand=random(Matr[j][1]+2)+1+k;
        //скопировать часть второй особи в первую особь
        for(int i=k; i<rand; i++)
            Popul[x]->Gens[i]=Popul[y]->Gens[i];
        //скопировать часть вспомогательного массива во первую особь
        for(int i=k; i<rand; i++)
            Popul[y]->Gens[i]=M[i];
        k+= Matr[j][1]+2;
    }
}

```

Д.3 Результаты расчёта рационального режима для участка Синельниково-Чаплино Приднепровской ж.д.

Участок тяговой сети представленная пятью подстанциями и четырьмя МЗ. Информация о подстанциях и МЗ приведена на скриншотах программы (рис. Д.104-рис. Д.113)

Подстанции участка						
Наименование пст	ЭДС, кВ	Р пст	Нач. пикет	Ст. фидер	Кон. пикет	Ро станц.
Синельниково	3,300	,1	234,61	237	238,02	,050
Раздоры	3,300	,1	258,82	258,82	258,82	,050
Письменная	3,300	,1	275,1	275,1	275,1	,050
Ульяновка	3,300	,1	292,905	292,905	292,905	,050
Чаплино	3,300	,1	307,59	310	311,92	,050

Рисунок Д.104 - Характеристики подстанций участка

Оборудование подстанции					
Количество работающих ТТ	Количество работающих ПТ	Тип выпрямителя	Тип сглаживающего фильтра	Тип ТТ	Тип ПТ
1	2	ПВЗ-5	РБА-10-400-3	ТДТН -10000/110	ТДТНЗ-25000/110-69

Рисунок Д.105 - Оборудование подстанции Синельниково

Оборудование подстанции						
Количество работающих ТТ	Количество работающих ПТ	Тип выпрямителя	Тип сглаживающего фильтра	Тип ТТ	Тип ПТ	
1	1	ПВЗ-3	РБА-10-1000-4	ТДТН -16000/110-70	ТДТН-16000/110-66	

Рисунок Д.106 - Оборудование подстанции Раздоры участка

Оборудование подстанции						
Количество работающих ТТ	Количество работающих ПТ	Тип выпрямителя	Тип сглаживающего фильтра	Тип ТТ	Тип ПТ	
1	2	ПВЗ-5	РБА-10-400-4	ТДТН -16000/110	ТДТН-31500/110	

Рисунок Д.107 - Оборудование подстанции Письменная

Оборудование подстанции						
Количество работающих ТТ	Количество работающих ПТ	Тип выпрямителя	Тип сглаживающего фильтра	Тип ТТ	Тип ПТ	
1	1	ПВЗ-3	РБА-10-600-4	ТДТН -10000/110	ТДТНЗ-25000/110-69	

Рисунок Д.108- Оборудование подстанции Ульяновка

Оборудование подстанции						
Количество работающих ТТ	Количество работающих ПТ	Тип выпрямителя	Тип сглаживающего фильтра	Тип ТТ	Тип ПТ	
1	1	УВКЗ-1	РБАМ-10-600-6	ТДТН -16000/110	ТДТН-16000/110-66	

Рисунок Д.109- Оборудование подстанции Чаплино

Подсоединение путей к к узлам зоны, разрез узлов									
Узел	Наименование	Пикет	1 п	2 п	3 п	4 п	5 п	Разрез	
1	ППС 241 км	241,1	подключ	подключ					
2	ПСК 246 км	246,1	подключ	подключ					
3	ППС 250 км	250,4	подключ	подключ					

Рисунок Д.110 - Узлы первой МЗ участка

Подсоединение путей к к узлам зоны, разрез узлов									
Узел	Наименование	Пикет	1 п	2 п	3 п	4 п	5 п	Разрез	
1	ППС 259 км	259,5	подключ	подключ					
2	ПСК 263 км	263,4	подключ	подключ					
3	ППС 268	268,1	подключ	подключ					

Рисунок Д.111 - Узлы второй МЗ участка

Подсоединение путей к к узлам зоны, разрез узлов									
Узел	Наименование	Пикет	1 п	2 п	3 п	4 п	5 п	Разрез	
1	ППС 276 км	276,9	подключе	подключ					
2	ПСК 282 км	282,4	подключе	подключ					
3	ППС 287 км	287,8	подключе	подключ					

Рисунок Д.112 - Узлы третьей МЗ участка

Подсоединение путей к к узлам зоны, разрез узлов									
Узел	Наименование	Пикет	1 п	2 п	3 п	4 п	5 п	Разрез	
1	ППС 297 км	297,2	подключе	подключ					
2	ПСК 301 км	301,6	подключе	подключ					
3	ППС 305 км	305,6	подключе	подключ					

Рисунок Д.113 - Узлы четвертой МЗ участка

В результате работы программного комплекса получен регламент переключения оборудования на участке тяговой сети Синельниково-Чаплино (табл. Д.78-табл. Д.80), который обеспечивает снижение стоимости потерь электроэнергии на 2,5%, что в денежном эквиваленте составляет 1842,81 грн.

Таблица Д.78 - Действующие и рациональные схемы подключения путей к узлам на участке Синельниково- Чаплино (период графика с 14.00 до 15.00)

Действующие схемы подключения путей к узлам			Рациональные схемы подключения путей к узлам		
МЗ 1			МЗ 1		
	Путь 1	Путь 2		Путь 1	Путь 2
Узел 1	вкл.	вкл.	Узел 1	вкл.	вкл.
Узел 2	вкл.	вкл.	Узел 2	вкл.	вкл.
Узел 3	вкл.	вкл.	Узел 3	вкл.	вкл.
МЗ 2			МЗ 2		
	Путь 1	Путь 2		Путь 1	Путь 2
Узел 1	вкл.	вкл.	Узел 1	вкл.	вкл.
Узел 2	вкл.	вкл.	Узел 2	вкл.	вкл.
Узел 3	вкл.	вкл.	Узел 3	вкл.	вкл.
МЗ 3			МЗ 3		
	Путь 1	Путь 2		Путь 1	Путь 2
Узел 1	вкл.	вкл.	Узел 1	вкл.	вкл.
Узел 2	вкл.	вкл.	Узел 2	вкл.	вкл.
Узел 3	вкл.	вкл.	Узел 3	вкл.	вкл.
МЗ 4			МЗ 4		
	Путь 1	Путь 2		Путь 1	Путь 2
Узел 1	вкл.	вкл.	Узел 1	вкл.	вкл.
Узел 2	вкл.	вкл.	Узел 2	вкл.	вкл.
Узел 3	вкл.	вкл.	Узел 3	вкл.	вкл.

Таблица Д.79 - Действующие и рациональные уровни напряжений на подстанциях участка Синельниково- Чаплино в период с 14.00 до 15.00

Исходные уровни напряжений на подстанциях	Рациональные уровни напряжений на подстанциях
Подстанция 1 Уровень напряжения 3,69 кВ	Подстанция 1 Уровень напряжения 3,7 кВ
Подстанция 2 Уровень напряжения 3,62 кВ	Подстанция 2 Уровень напряжения 3,6 кВ
Подстанция 3 Уровень напряжения 3,65 кВ	Подстанция 3 Уровень напряжения 3,7 кВ
Подстанция 4 Уровень напряжения 3,75 кВ	Подстанция 4 Уровень напряжения 3,4 кВ
Подстанция 5 Уровень напряжения 3,76 кВ	Подстанция 5 Уровень напряжения 3,4 кВ

Таблица Д.80 - Действующее и рациональное количество одновременно работающих трансформаторов на подстанциях участка Синельниково- Чаплино в период с 14.00 до 15.00

Действующее количество одновременно работающих трансформаторов	Рациональное количество одновременно работающих трансформаторов
Подстанция 1 Количество работающих понижающих трансформаторов 2	Подстанция 1 Количество работающих понижающих трансформаторов 1
Количество работающих тяговых трансформаторов 1	Количество работающих тяговых трансформаторов 2
Подстанция 2 Количество работающих понижающих трансформаторов 1	Подстанция 2 Количество работающих понижающих трансформаторов 2
Количество работающих тяговых трансформаторов 1	Количество работающих тяговых трансформаторов 1
Подстанция 3 Количество работающих понижающих трансформаторов 2	Подстанция 3 Количество работающих понижающих трансформаторов 1
Количество работающих тяговых трансформаторов 1	Количество работающих тяговых трансформаторов 2
Подстанция 4 Количество работающих понижающих трансформаторов 1	Подстанция 4 Количество работающих понижающих трансформаторов 2
Количество работающих тяговых трансформаторов 1	Количество работающих тяговых трансформаторов 2
Подстанция 5 Количество работающих понижающих трансформаторов 1	Подстанция 5 Количество работающих понижающих трансформаторов 1
Количество работающих тяговых трансформаторов 1	Количество работающих тяговых трансформаторов 2

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Примеры определения расхода электроэнергии для стационарных потребителей

Пример 1. Определить общий расход электроэнергии на год по норме для всех стационарных потребителей Приднепровской железной дороги в целом на основную работу при следующих исходных данных:

- годовой объем работы железной дороги $n_{dp} = 1 \cdot 10^7 \cdot 10^4$ ткм брутто;
- удельные затраты труда $m_{xd} = 8,0$ чел·ч/ 10^4 ткм брутто;
- средняя электрооснащенность труда $E_{xd} = 1,6$ кВт·ч/чел·ч;
- средняя температура внешнего воздуха за отопительный период ($-3,4^\circ \text{C}$).

Расчеты. По формуле (3.3) [86] определяют коэффициент

$$k_{md} = 70,7 \cdot 10^{-3} \cdot 1,6 \cdot 8,0 = 0,905$$

По формуле (6 .219) рассчитываем среднегодовую норму расхода электроэнергии для стационарных потребителей железной дороги

$$\omega_d = 0,905 \cdot 1 \cdot 1,02 \cdot (34,773 - 1,371 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^7) = 19,942 \text{ кВт·ч}/10^4 \text{ ткм брутто.}$$

Расход электроэнергии по норме на выполнение основной работы для стационарных потребителей железной дороги в целом определим следующим образом $W_d = 19,442 \cdot 1,0 \cdot 10^7 = 194,4$ млн. кВт·ч.

Пример 2. По исходным данными примера 1 определим норму расхода электроэнергии на первый квартал для стационарных потребителей Приднепровской железной дороги при условии, что объем работы железной дороги n_d по месяцам первого квартала равняется:

месяц	n_d , 10^4 ткм брутто
апрель	$8 \cdot 10^5$
май	$7 \cdot 10^5$
июнь	$7,8 \cdot 10^5$

Расчеты. По данным табл.3.1 [86] находят средневзвешенное значение коэффициента сезонности за первый квартал:

$$k_{cd} = \frac{1,42 \cdot 8 + 1,45 \cdot 7 + 1,41 \cdot 7,8}{8 + 7 + 7,8} = 1,429$$

За формулой (3.2) [86] определяем норму на второй квартал

$$\omega_{d1} = 19,942 \cdot 1,429 = 27,783 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 10^4 \text{ ткм брутто.}$$

По формуле (3.1) [86] рассчитывают расход электроэнергии по норме на первый квартал для Приднепровской железной дороги

$$W_{d1} = 27,783 \cdot (8 + 7 + 7,8) \cdot 10^5 = 63,4 \text{ млн. кВт} \cdot \text{ч.}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник Головного управління
електрифікації та електропостачання
Укрзалізниці

В. Ф. Максимчук
2012 р.

**АКТ**

використання результатів дисертаційної роботи
Кузнецова Валерія Геннадійовича
на тему «Розвиток теоретичних основ енергозбереження в системах
електропостачання тяги поїздів постійного струму»

Цим підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Кузнецова В. Г. прийняті до використання Головним управлінням електрифікації та електропостачання Укрзалізниці при розробці заходів з підвищення енергетичної та економічної ефективності систем електропостачання тяги поїздів постійного струму.

Особливо важливими, як в теоретичному, так і в практичному плані вважаємо такі результати:

1. Науково-обґрунтовані підходи до визначення потенціалу енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму з урахуванням системного ефекту.
2. Наукові принципи вибору енергоощадних заходів у системах тягового електропостачання на основі вдосконаленого методу аналізу ієрархій.
3. Методологія визначення раціональних режимів систем тягового електропостачання постійного струму на основі генетичного алгоритму з урахуванням змінних протягом доби тарифів на електроенергію та надійності силового обладнання.
4. Розроблення нормативної документації щодо визначення норм витрат електроенергії:
 - для стаціонарних споживачів залізничного транспорту;
 - на власні потреби тягових підстанцій, постів секціонування та пунктів паралельного з'єднання.

Очікуваний економічний ефект від отриманих результатів дослідження складає близько 3 млн. гривень.

Головний інженер
Головного управління
електрифікації та електропостачання

І. І. Лагута

Начальник
технічного відділу

В. О. Фітін

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник Головного управління
електрифікації та електропостачання

Укрзалізниці

В. Ф. Максимчук

2012 р.



А К Т

впровадження результатів науково-дослідних робіт

При виконанні науково-дослідних робіт по госпрозрахунковій тематиці «Інструкція з нормування витрат електроенергії на власні потреби підстанцій 6-220 кВ і розподільчих пунктів 6-10 кВ залізниць України», шифр 23.49.06.07, № держреєстрації 0108U008042, «Методичні вказівки по визначенню норм витрат електроенергії для стаціонарних споживачів залізниць» розроблено наукові підходи і створена нормативна документація по визначенню норм витрат електроенергії.

Мета дослідження – розробити методологічні підходи та принципи визначення норм витрат електроенергії для стаціонарних споживачів залізниць України і на власні потреби тягових підстанцій, постів секціонування та пунктів паралельного з'єднання.

Розроблені висновки та рекомендації покладено в основу розробленої автором нормативної документації щодо визначення норм витрат електроенергії - інструкцій ЦЕ-0018 та ЦЕ – 0015, які використовуються в експлуатаційній роботі Головного управління електрифікації та електропостачання Укрзалізниці.

Впровадження вищезгаданих науково-дослідних робіт сприяло стимулюванню підприємств залізничного транспорту до ощадного споживання електроенергії.

Від «Замовника»

Головний інженер Головного
управління електрифікації та
електропостачання

 І. І. Лагута

Начальник технічного відділу

 В. О. Фітін

Від «Виконавця»

Докторант кафедри Електропостачання
залізниць ДНУЗТ, науковий керівник
НДР, к.т.н.

 В. Г. Кузнецов

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник служби електропостачання
Донецької залізниці

С. Д. Бітюков

2012 р.

АКТ

використання результатів дисертаційної роботи
Кузнецова Валерія Геннадійовича
на тему «**Розвиток теоретичних основ енергозбереження в системах
електропостачання тяги поїздів постійного струму**»

Цим підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Кузнецова В. Г. прийняті до використання службою електропостачання Донецької залізниці при розробці заходів з енергозбереження в системі електропостачання тяги поїздів постійного струму.

Особливо важливими як в теоретичному, так і в практичному плані вважаємо такі результати:

1) наукові принципи модернізації тягових підстанцій з урахуванням переведення тяги поїздів з 2-го класу напруги на 1-й. Зафіксований ефект від даного заходу склав 3,04 млн. грн. для тягової підстанції ТП-Донецьк (в цінах 2009 р.).

2) методологія вибору енергоощадних заходів з використанням вдосконаленого методу аналізу ієрархій;

3) методи визначення раціональних режимів систем електропостачання тяги поїздів на основі генетичних алгоритмів. Зафіксовано ефект від оптимізації режимів електрифікованої ділянки дистанції електропостачання ЕЧ-Красноармійськ- 474 тис. кВт·год.

4) методи визначення норм витрат електроенергії на нужди стаціонарних споживачів;

5) рекомендації щодо зменшення небалансів електроенергії.

Результати дисертаційної роботи Кузнецова Валерія Геннадійовича можуть бути застосовані також на інших залізницях постійного струму.

Головний інженер
служби електропостачання

В. Л. Савченко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник служби електропостачання

Донецької залізниці

С. Д. Бітюков

2012 р.



А К Т

впровадження результатів науково-дослідних робіт

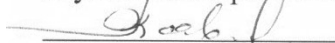
При виконанні науково-дослідних робіт по госпрозрахунковій тематиці «Дослідження показників якості електроенергії на вводах і фідерах тягових підстанцій постійного струму та розробка рекомендацій», шифр 23.52.07.08, № держреєстрації 0107U010377, «Аналіз показників якості електричної енергії на тягових підстанціях постійного струму Донецької залізниці і розробка рекомендацій по їх поліпшенню», шифр 23.64.10.10, № держреєстрації 0111U003605 проведено експериментальні дослідження на тягових підстанціях Донецької залізниці (ТП-Очеретине, ТП-Красноармійськ).

Мета дослідження – експериментальним шляхом визначити статистичні характеристики напруг на шинах підстанцій, показники якості електроенергії на вводах і фідерах тягових підстанцій постійного струму, розробити заходи щодо покращення якості електроенергії та підвищення енергетичної ефективності системи тягового електропостачання.

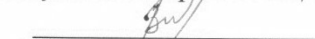
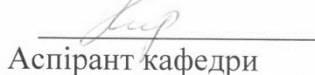
В результаті експериментальних досліджень встановлено, що при зменшенні навантаження доцільно відключати існуючі пасивні згладжуючі фільтри для зменшення втрат енергії в елементах цих фільтрів за умови дотримання необхідного рівня електромагнітної сумісності. Контроль цього рівня може бути здійснений розробкою сучасного пристрою діагностики згладжуючого пристрою.

Очікувані результат впровадження - підвищення ефективності електроспоживання.

Від «Замовника»

Головний інженер
служби електропостачання
 В. Л. Савченко

Від «Виконавця»

Доцент кафедри
Електропостачання залізниць ДНУЗТ,
науковий керівник НДР, к.т.н.
 В. Г. Кузнецов
Аспірантка кафедри
Електропостачання залізниць ДНУЗТ
 Т. І. Кирилук
Аспірант кафедри
Електропостачання залізниць ДНУЗТ
 В. А. Зубенко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник служби електропостачання
Донецької залізниціС. Д. Бітюков
«16» 2012 р.

А К Т

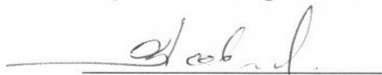
впровадження результатів науково-дослідної роботи

При виконанні науково-дослідної роботи по госпрозрахунковій тематиці «Оптимізація витрат Донецької залізниці при закупівлі електроенергії на тягу поїздів з розробкою рекомендацій», шифр 23.66.10.10, № держреєстрації 0111U003607, обґрунтовано принцип модернізації тягових підстанцій Донецької залізниці з урахуванням вимог з енерго- та ресурсозбереження, проаналізовано профілі споживання електроенергії за рік на тягу поїздів, на основі обробки експериментальних даних показано переваги переводу тяги поїздів на вищий рівень напруги, розраховано економічний ефект, створено моделі споживання електроенергії при використанні оптових цін.

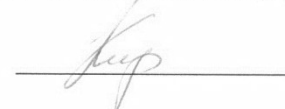
Мета роботи – розробка рекомендацій, дотримання яких дозволить оптимізувати витрати Донецької залізниці при закупівлі електроенергії на тягу поїздів.

Очікувані результати від впровадження роботи – комплекс науково-обґрунтованих пропозицій, умов і заходів, що забезпечують реалізацію енергозберігаючих режимів роботи систем тягового і зовнішнього електропостачання залізниць.

Від «Замовника»

Головний інженер
служби електропостачання
 В. Л. Савченко

Від «Виконавця»

Доцент кафедри Електропостачання
залізниць ДНУЗТ, науковий керівник
НДР, к.т.н.
 В. Г. Кузнецов
Аспірантка кафедри Електро-
постачання залізниць ДНУЗТ
 Т. І. Кирилюк

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник служби електропостачання

Донецької залізниці



С. Д. Бітюков

2012 р.

А К Т

впровадження результатів науково-дослідної роботи

При виконанні науково-дослідної роботи по госпрозрахунковій тематиці «Дослідження наднормативних небалансів обліку електричної енергії на тягових підстанціях Донецької залізниці і розробка рекомендацій по їх приведенню до нормативних вимог для тягової підстанції Штерівка», шифр 23.65.10.10, № держреєстрації 0111U003606, досліджено небаланси електроенергії на тягових підстанціях, вивчено та досліджено існуючі та перспективні способи зниження рівнів наднормативних небалансів, розроблено рекомендації по уникненню небалансів електроенергії.

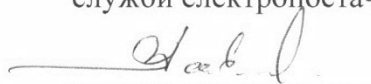
Мета роботи – розробка заходів, впровадження яких дозволить зменшити небаланси обліку електричної енергії на тягових підстанціях залізниці.

Очікувані результати від впровадження роботи – підвищення ефективності електроспоживання за рахунок приведення завантаження вимірювальних трансформаторів до вимог ГОСТ 7746-2001 та ГОСТ 1983-2001.

Від «Замовника»

Від «Виконавця»

Головний інженер
служби електропостачання

 В. Л. Савченко

Доцент кафедри Електропостачання
заліниць ДНУЗТ, науковий керівник
НДР, к.т.н.

 В. Г. Кузнецов
Аспірантка кафедри Електро-
постачання заліниць ДНУЗТ

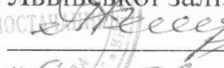
 Т. І. Кирилук



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник служби електропостачання

Львівської залізниці

 М. О. Фесик« 6 »  2012 р.**АКТ**

використання результатів дисертаційної роботи

Кузнецова Валерія Геннадійовича

на тему «Розвиток теоретичних основ енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму»

Цим підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Кузнецова В. Г. прийняті до використання службою електропостачання Львівської залізниці при розробці заходів з підвищення енергетичної і економічної ефективності систем електропостачання тяги поїздів постійного струму.

Особливо важливими, як в теоретичному, так і в практичному плані вважаємо такі результати:

1. Зменшення енергетичної складової собівартості перевезень при впровадженні раціональних режимів системи тягового електропостачання.
2. Рекомендації щодо зменшення небалансів електроенергії в системах тягового електропостачання.
3. Розроблені системні підходи до вибору енергоощадних заходів.
4. Запропоновані автором методи визначення норм витрат електроенергії для специфічного обладнання систем тягового електропостачання постійного струму.

Результати дисертаційної роботи Кузнецова Валерія Геннадійовича можуть бути застосовані також на інших залізницях постійного струму.

Перший заступник
начальника служби електропостачання



М. М. Єліяшевський

Начальник Дорожньої
Електротехнічної лабораторії



А. І. Барна

Утверждаю:

Директор "Instytut Kolejnictwa"
dr inż. Andrzej Żurkowski
15.06.2012 г.

АКТ

использования результатов диссертационной работы
Кузнецова Валерия Геннадиевича
на тему «Развитие теоретических основ энергосбережения в системах
электропитания тяги поездов постоянного тока»

Настоящим актом свидетельствуем, что результаты диссертационной работы Кузнецова В. Г. приняты к использованию в Instytut Kolejnictwa.

Существенными являются такие результаты:

1. Методы определения потенциала энергосбережения в системах электропитания тяги поездов постоянного тока с учетом системного эффекта.
2. Методология выбора энергосберегающих мероприятий в системах тягового электропитания на основе инвариантно-согласованного метода анализа иерархий.
3. Научные подходы к определению рациональных режимов систем тягового электропитания постоянного тока на основе адаптированного генетического алгоритма. Предложенный автором программный комплекс позволяет определять рациональный регламент переключений силового оборудования с учетом переменной стоимости электроэнергии и уровня надежности силового оборудования.
4. Методология определения норм расхода электроэнергии на нужды стационарных потребителей.

Предполагаемый экономический эффект при внедрении результатов исследования для сети железных дорог Польши может составить около 500 тыс. злотых.

Зам. Председателя Научного Совета ИК

к.т.н. инж. А. БЯЛОНЬ



ul. Chłopickiego 50
04-275 Warszawa

www.ikolej.pl
ikolej@ikolej.pl

KRS 0000021539
REGON 016382785
NIP 113-22-57-883

fax +48 22 610-75-97
tel +48 22 610-08-68
tel +48 22 473-13-00



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший проректор Дніпропетровського
національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна,
д.т.н., професор

Б.Є. Боднар

2012 р.

АКТ

використання результатів докторської дисертаційної роботи
Кузнецова Валерія Геннадійовича
на тему **«Розвиток теоретичних основ енергозбереження в системах
електропостачання тяги поїздів постійного струму»**

Цей акт складений про те, що у навчальному процесі, який ведеться в університеті (дисципліна «Енергозбереження» для студентів п'ятого курсу спеціальності 7.05070103 «Електротехнічні системи електроспоживання»), прийняті до використання наукові та практичні результати, викладені в докторській дисертації Кузнецова В.Г.:

1. Науково-методологічні принципи визначення потенціалу енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму з урахуванням системного ефекту.
2. Наукові принципи вибору енергоощадних заходів у системах тягового електропостачання на основі вдосконаленого методу аналізу ієрархій.
3. Методологія визначення раціональних режимів систем тягового електропостачання постійного струму на основі генетичного алгоритму з урахуванням змінних протягом доби тарифів на електроенергію та надійності силового обладнання.
4. Методологія визначення норм витрат електроенергії для нетягових споживачів залізничного транспорту.

Начальник НМУ університету,
к.т.н., доцент

О.О. Матусевич

Декан факультету
«Електрифікація залізниць»,
к.т.н., доцент

А.І. Кійко

Зав. каф. «Електропостачання залізниць»
д.т.н., доцент

В.Г. Сиченко