

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна

На правах рукописи

Калашников Константин Алексеевич

УДК 621.331:621.311:656.224.4.05

**У М Е Н Ъ Ш Е Н И Е   П О Т Е Р Ь   Э Л Е К Т Р О Э Н Е Р Г И И  
В   Т Я Г О В О Й   С Е Т И   П О С Т О Я Н Н О Г О   Т О К А  
П У Т Е М   В Ы Б О Р А   Р А Ц И О Н А Л Ь Н О Й  
Д И С Л О К А Ц И И   Т Я Г О В Ы Х   Н А Г Р У З О К**

Специальность 05.22.09 - электротранспорт

Диссертация на соискание научной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н., доцент Кузнецов Валерий  
Геннадиевич

Днепропетровск – 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	6
РАЗДЕЛ 1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАДАЧИ УМЕНЬШЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	14
1.1 Потери электроэнергии в системе тягового электроснабжения ..	14
1.2 Пути уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока.....	20
1.2.1 Управление режимами системы тягового электроснабжения .	21
1.2.2 Применение накопителей электроэнергии.....	29
1.2.3 Применение систем тягового электроснабжения повышенного напряжения.....	31
1.2.4 Усовершенствование методов учета и контроля потерь электроэнергии .....	33
1.3 Управление положением тяговых нагрузок, разработка рациональных графиков движения поездов .....	35
1.4 Постановка задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок.....	40
РАЗДЕЛ 2 МОДЕЛИ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ НАГРУЗКУ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ .....	43
2.1 Модель системы тягового электроснабжения постоянного тока	43
2.2 Модель транспортного потока.....	49
2.2.1 Закономерности изменения интенсивности движения поездов и интервалов между поездами .....	56
2.2.2 Закономерности изменения плотности и массы поездов .....	61
2.2.3 Закономерности изменения неравномерности движения поездов.....	63

2.3	Исследование возможностей уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок.....	69
	Выводы к разделу 2 .....	73
РАЗДЕЛ 3 НАУЧНЫЕ ПРИНЦИПЫ УМЕНЬШЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПУТЕМ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОЙ ДИСЛОКАЦИИ ТЯГОВЫХ НАГРУЗОК.....		
		75
3.1	Математическая модель энергооптимальной дислокации тяговых нагрузок между тяговыми подстанциями .....	75
3.2	Принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора оптимальной дислокации поездов между тяговыми подстанциями .....	85
3.3	Принципы уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора оптимальной последовательности отправления и интервалов между поездами .....	100
	Выводы к разделу 3 .....	105
РАЗДЕЛ 4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ.....		
		106
4.1	Программный комплекс по оптимизации режимов СТЭ за счет составления энергоэффективных графиков движения поездов.....	106
4.1.1	Функциональное назначение и алгоритм работы программы	106
4.1.2	Структура программы, технические средства .....	113
4.1.3	Описание интерфейса пользователя .....	114
4.2	Реализация научных принципов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок.....	117
4.2.1	Уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока за счет выбора рациональной последовательности отправления поездов различных категорий .....	119

4.2.2 Уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока за счет выбора рациональных интервалов между поездами.....	122
4.2.3 Уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока за счет выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок на участке Приднепровской железной дороги.....	126
4.3 Экономическая эффективность применения методов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет составления энергоэффективных графиков движения поездов.....	128
4.3.1 Показатели экономической эффективности .....	128
4.3.2 Расчет капитальных вложений и эксплуатационных расходов.....	129
4.3.3 Оценка экономического эффекта.....	130
Выводы к разделу 4 .....	130
ВЫВОДЫ.....	132
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ А Исходные данные для исследования вероятностной природы показателей транспортного потока электрифицированного участка Приднепровской ж.д. ....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Расчет оптимальных расстояний между поездами.....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ В Определение оптимальной последовательности отправления и интервалов между поездами на основе эвристического алгоритма поиска минимума функции последовательности .....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Порядок работы с ПК «Поток» .....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Свидетельство регистрации авторского права.....	176
ПРИЛОЖЕНИЕ Е АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ.....	177

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АБ – автоблокировка

АСКУЭ – автоматизированная система контроля и учета электроэнергии

ВСЭ – внешняя система электроснабжения

ГДП – график движения поездов

ДПР – линии электропередач, выполненные по схеме «два провода – рельс»

КС – контактная сеть

МЗ – межподстанционная зона

НТП – нетяговые потребители

НЭ – накопитель электроэнергии

ППНЧ – поток поездов нечётного направления

ППС – пункт параллельного соединения

ППЧ – поток поездов чётного направления

ПСК – пост секционирования

РЭС – район электроснабжения

СТЭ – система тягового электроснабжения

СЦБ – сигнализация, централизация и блокировка

ТП – тяговая подстанция

ТЭР – топливно-энергетические ресурсы

УЗ – Укрзализныця

ЭДС – электродвижущая сила

ЭМС – электромагнитная совместимость

ЭПС – электроподвижной состав

ЭС – экспертная система

ЭЧ – дистанция электроснабжения

ЭЧС – район электрических сетей

## ВВЕДЕНИЕ

Украина относится к энергодефицитным странам, удовлетворяя свои потребности в ТЭР за счет собственной их добычи менее чем на 50 % [1]. В связи с этим необходимо повышение энергоэффективности работы всех отраслей экономики и, в частности, железнодорожного транспорта [2-6]. Поскольку энергетическая составляющая себестоимости перевозок составляет около 20 %, энергосбережение является одной из главных задач политики УЗ. Руководством УЗ проводится большая работа по экономии ТЭР, успешно выполняются Программа повышения энергоэффективности и Программа уменьшения потребления энергоресурсов бюджетными организациями путем рационального использования в сферах транспорта на 2010-2014 гг. Выполнение данных программ позволило уменьшить отчетные потери электроэнергии на 17 % (от уровня потерь).

Одним из направлений энергосбережения на электрифицированных ж.д. является уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока, которые составляют около 7 % от величины потребления на тягу поездов. Существуют резервы уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок. Поскольку транспортный поток поездов определяет нагрузку СТЭ, в данной диссертационной работе под термином «дислокация тяговых нагрузок» понимается различное расположение ЭПС между ТП.

**Актуальность темы исследования.** На величину потерь электроэнергии в тяговой сети влияют следующие факторы: параметры СТЭ – схемы питания контактной сети, длина фидерной зоны, мощность и напряжение на шинах ТП; параметры пути – сопротивление движению, уклоны; технические данные ЭПС – максимальная скорость, масса, мощность, потребляемый ток; параметры транспортного потока – дислокация поездов между ТП, интервалы между поездами, размеры движения, последовательность отправления поездов

различных категорий; прочие факторы – квалификация машинистов, погодные условия и т.д.

В настоящее время существуют такие пути уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети: применение СТЭ повышенного напряжения, накопителей электроэнергии, управление режимами СТЭ на базе информационных технологий, усовершенствование методов учета и контроля потерь электроэнергии, разработка энергоэффективных ГДП, регулирование транспортного потока (управление положением тяговых нагрузок).

Развитием управления режимами СТЭ занимались следующие ученые – В. Т. Доманский, Г. А. Доманская, В. Б. Землянов, В. В. Корниенко, В. Г. Кузнецов, К. Г. Марквардт, Р. И. Мирошниченко, А. Н. Митрофанов, Э. С. Почаевец; разработкой энергоэффективных ГДП, регулированием транспортного потока – А. А. Абрамов, М. А. Гаранин, Г. В. Евдомаха, А. Д. Каретников, Д. Ю. Левин, А. В. Никитин, В. В. Скалозуб, И. Н. Шапкин; применением накопителей электроэнергии – Д. А. Бут, Т. А. Заруцкая, Дж. Кернер, В. И. Омеляненко, М. И. Павелчик, М. В. Шевлюгин; регулированием напряжения на ТП, применением вольтодобавочных устройств – Б. А. Аржанников, В. М. Варенцов, Ю. П. Гончаров, Л. А. Добрусин, В. М. Лебедев, А. Н. Марикин, В. Г. Сыченко и др.

Вместе с тем в исследованиях отмеченных выше авторов не рассматривались задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора оптимальной дислокации поездов между ТП, последовательности отправления и интервалов между поездами. В настоящее время управление транспортным потоком на электрифицированных линиях осуществляется по графику движения, который не полностью учитывает влияние дислокации тяговых нагрузок на энергетические характеристики СТЭ. В результате неравномерный характер движения поездов различной массы по расчетному ГДП приводит к повышению потерь электроэнергии в тяговой сети.

Таким образом, задача уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок является актуальной для электрифицированного транспорта постоянного тока.

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

- Энергетическая стратегия Украины на период до 2030 г., утвержденная 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, утвержденная Постановлением Кабинета Министров Украины от 1 марта 2010 г. № 243 с изменениями, утверждёнными Постановлением Кабинета Министров от 27.04.2011 г. № 447 и от 25.01.2012 г. № 105;
- Постановление Кабинета Министров Украины от 23.04.1999 г. № 661 «О мероприятиях государственной поддержки железнодорожного транспорта»;
- «Разработка научных основ рациональных режимов системы тягового электроснабжения» (№ ГР 0110U000897).

Автор принимал участие в указанной научно-исследовательской работе как исполнитель.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является решение задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ современного состояния задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока.
2. Разработать модели СТЭ и транспортного потока.
3. Исследовать возможности уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок.
4. Разработать принципы уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем определения рациональных:
  - дислокации и интервалов между тяговыми нагрузками;
  - последовательности отправления поездов различных категорий.
5. Разработать программный комплекс для составления энергоэффективных ГДП.
6. Выполнить технико-экономическое обоснование предложенных энергосберегающих мероприятий.

*Объект исследования* – процесс потребления электроэнергии электротранспортом в СТЭ постоянного тока.

*Предмет исследования* – потери электроэнергии в тяговой сети СТЭ.

*Методы исследования.* Основные теоретические положения диссертации получены с помощью метода деформируемого многогранника (при определении оптимальной дислокации поездов между ТП), эвристических алгоритмов (при определении оптимальной последовательности отправления поездов). Также использованы методы исследования экспериментальных данных и математической статистики (при исследовании функций распределения интервалов между поездами и массы поездов).

**Научная новизна полученных результатов** заключается в следующем:

1. Впервые предложен принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок между тяговыми подстанциями. Это позволяет определять

оптимальные расстояния между тяговыми нагрузками для построения энергоэффективных графиков движения поездов.

2. Впервые предложен принцип определения оптимальной последовательности отправления поездов и интервалов между тяговыми нагрузками с применением эвристического алгоритма поиска минимума функции списка, который обеспечивает уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети.
3. Получила дальнейшее развитие математическая модель энергооптимальной дислокации тяговых нагрузок между тяговыми подстанциями на основе адаптированного метода деформируемого многогранника, который отличается от существующего процессом проектирования области допустимых значений. Это дает возможность выбирать схемы расположения тяговых нагрузок между тяговыми подстанциями на каждом шаге времени с минимальными потерями мощности в тяговой сети.

**Практическая значимость полученных результатов** состоит в следующем:

1. Разработанные научные принципы выбора рациональной последовательности отправления поездов позволяют уменьшить потери электроэнергии в тяговой сети до 23 % от существующего уровня. Использование принципов выбора рациональной дислокации и интервалов между тяговыми нагрузками позволяет уменьшить потери электроэнергии в тяговой сети до 27 % от существующего уровня.
2. Разработанный программный комплекс «Поток» для составления ГДП с учетом энергетических характеристик СТЭ дает возможность применения принципов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети дежурно-диспетчерским аппаратом, инженерами-графистами при организации перевозочного процесса и составлении ГДП.

3. Применение рациональной дислокации тяговых нагрузок на межподстанционной зоне дает возможность уменьшения потерь электроэнергии до 3 % от уровня расхода на тягу поездов. Чистый дисконтированный доход для электрифицированных участков Приднепровской ж.д. за 1 год составляет 1,4 млн грн.
4. Результаты диссертационной работы внедрены в службах электроснабжения Донецкой и Приднепровской железных дорог, Днепропетровской дирекции железнодорожных перевозок, учебном процессе Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна.

**Личный вклад соискателя.** Постановка цели и заданий исследований, планирование экспериментов и обсуждение результатов выполнено совместно с научным руководителем. Основные научные положения, результаты теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы получены автором самостоятельно. В печатных трудах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат: [123] – анализ интервалов между поездами; [124] – расчет наличной пропускной способности участка и показателей транспортного потока по условиям электроснабжения; [133] – проведение расчетов коэффициентов неравномерности транспортного потока; [91] – постановка задачи, определение показателей транспортного потока, обеспечивающих минимум потерь электроэнергии в тяговой сети; [148] – исследование зависимости величины потерь электроэнергии в тяговой сети от порядка отправления поездов различных категорий; [121,137] – исследования зависимости величины потерь мощности в тяговой сети от дислокации поездов и расстояния между поездами; [139] – выбор методов оптимизации для решения задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет регулирования транспортного потока; [144] – определение оптимальной дислокации поездов между ТП по критерию потерь мощности в тяговой сети; [146] – разработка рекомендаций по уменьшению потерь электроэнергии в тяговой сети; [88-90, 138, 147] – разработка основных направлений решения

задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет регулирования транспортного потока. Работы [143, 149] написаны без соавторов.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались: на 3–5-й Международных научно-практических конференциях «Электрификация железнодорожного транспорта Трансэлектро», г. Мисхор, г. Днепропетровск, 2009 – 2011 гг.; 2–4-й Международных научно-практических конференциях «Энергосбережение на железнодорожном транспорте», г. Воловец, г. Днепропетровск, 2011–2013 гг.; Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса Украины: образование, наука, производство», г. Ростов на Дону 2009 г.

В полном объеме диссертационная работа докладывалась:

- на научном семинаре кафедры «Электроснабжение железных дорог» ДНУЖТ, февраль 2013 г.;
- научном семинаре в Институте железнодорожного транспорта, г. Варшава, Польша, февраль 2013 г.;
- Международной научно-практической конференции «Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности», пгт Воловец, июнь 2013 г.;
- межкафедральном семинаре Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, сентябрь 2013 г.

**Публикации.** Результаты диссертационной работы опубликованы в 17 научных трудах, в том числе: 8 статей в специализированных научных изданиях, 1 статья в научном журнале, 8 тезисов докладов в материалах конференций, 1 свидетельство о регистрации авторского права на компьютерную программу. Статьи, опубликованные в научных изданиях, индексируются в таких наукометрических базах данных: Ulrich's Periodicals

Directory, DRIVER, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), РИНЦ, ResearchBib, American Chemical Society [149]; BazTech, Index Copernicus [143].

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, выводов, списка использованной литературы и трех приложений. Основной текст работы изложен на 134 страницах. Диссертация содержит 63 рисунка и 15 таблиц. Полный объем диссертации 185 страниц.

## РАЗДЕЛ 1

# АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАДАЧИ УМЕНЬШЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 1.1 Потери электроэнергии в системе тягового электроснабжения

В процессе электропотребления в СТЭ возникают потери электроэнергии в устройствах КС и ТП. В устройствах КС отдельно выделяют потери от уравнительных токов и потери от токов поездов, зависящие от неравенства ЭДС ТП, питающих МЗ. В ТП постоянного тока, имеющих две ступени трансформации, электроэнергия теряется в понизительных и преобразовательных трансформаторах, вентилях, РС-цепях, шунтах, реакторах сглаживающих устройств. Часть электроэнергии, перерабатываемой ТП, потребляется на собственные нужды. Фактические (отчетные) потери электрической энергии представляют собой разность между поступившей и отпущенной из сети электроэнергией [12, 14]. Они разделяются на следующие составляющие:

- технические потери электроэнергии, обусловленные физическими процессами, происходящими при ее передаче по элементам сети и выражающимися в преобразовании части электроэнергии в этих элементах в тепло;
- инструментальные потери электроэнергии, обусловленные инструментальными погрешностями ее измерения и получаемые расчетным путем на основе данных о метрологических характеристиках и режимах работы используемых приборов;

- коммерческие потери, обусловленные хищениями электроэнергии, несоответствием оплаты за электроэнергию потребителями реальному потреблению электроэнергии (по показанию счетчиков) и другими причинами в сфере организации контроля за потреблением электроэнергии.

Детальная структура отчетных потерь электроэнергии приведена на рис. 1.1 [12, 14].

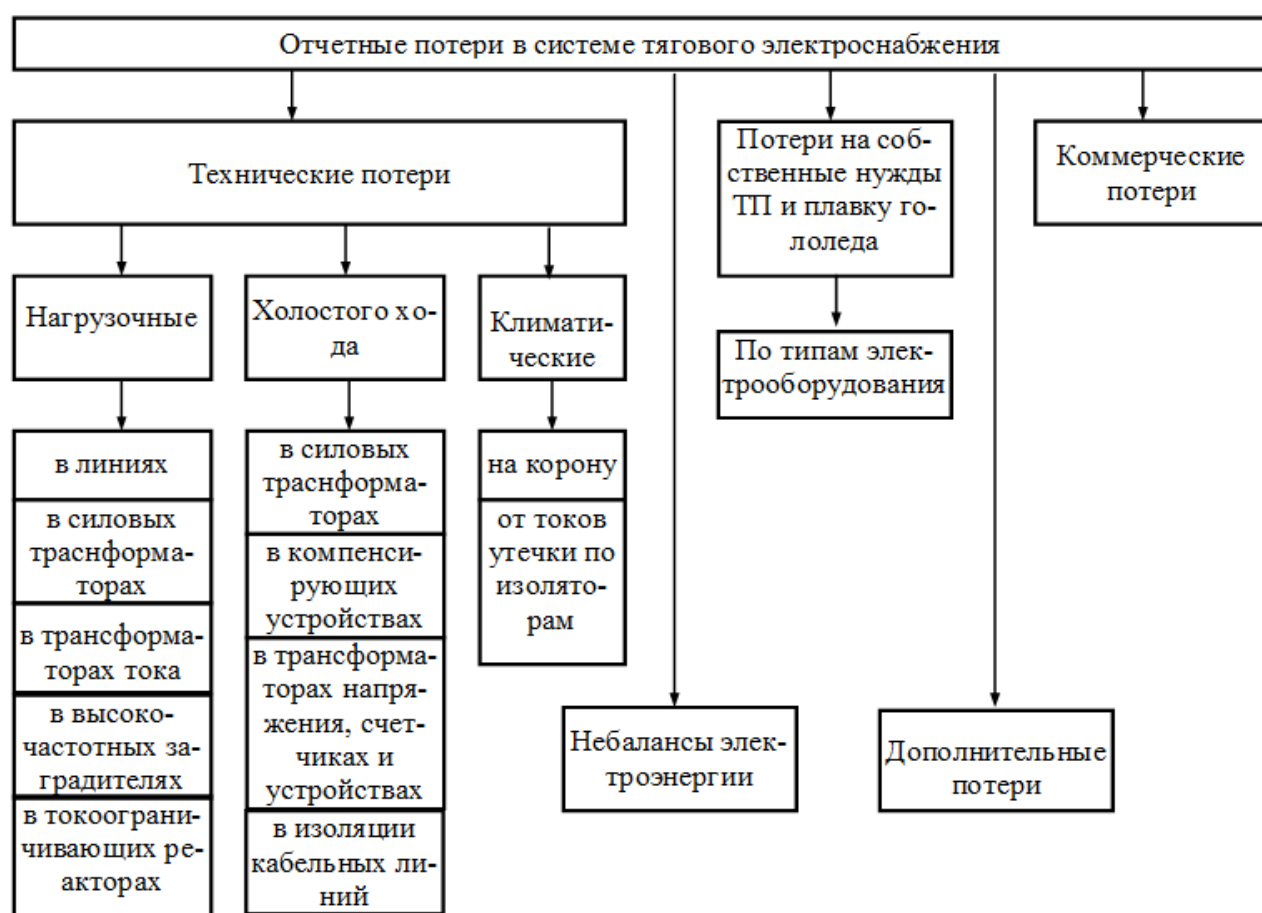


Рисунок 1.1 – Структура отчетных потерь электроэнергии

При определении потерь электроэнергии в тяговой сети необходимо учитывать особенности работы СТЭ железнодорожного транспорта, которые обуславливаются характером изменения нагрузок при движении поездов. В процессе движения поездов меняется их взаимное расположение на участках, ток и скорость поезда, так как каждый из них находится в данный момент на элементе профиля пути, оказывающем свое сопротивление движению, что

вызывает изменение нагрузок ТП. На величину потерь электроэнергии в тяговой сети влияют следующие факторы: параметры СТЭ – схемы питания контактной сети, длина фидерной зоны, мощность и напряжение на шинах ТП, площадь сечения контактной сети; параметры пути – сопротивление движению, уклоны; технические данные ЭПС – максимальная скорость, масса, мощность, потребляемый ток; параметры транспортного потока – дислокация поездов между ТП, размеры движения, интервалы между поездами, последовательность отправления поездов различных категорий; прочие факторы – квалификация машинистов, погодные условия и т.д. (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Взаимодействие факторов, определяющих величину потерь электроэнергии в тяговой сети

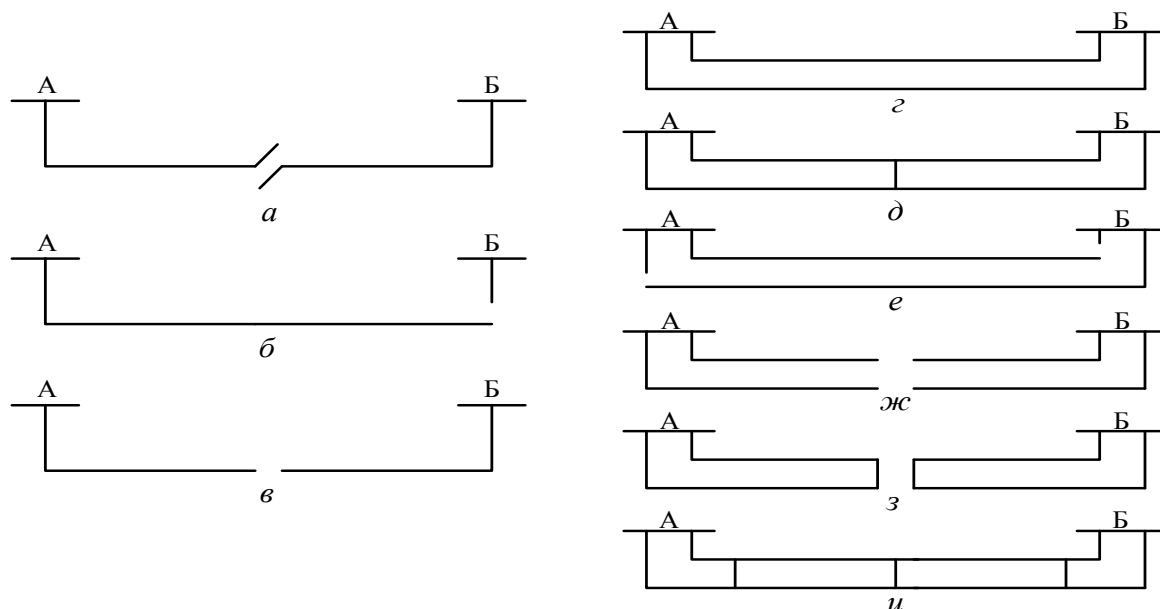
Задача уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока является составляющей проблемы энергосбережения на ж.д. транспорте.

Основными путями решения задачи уменьшения потерь электроэнергии в СТЭ являются [11-13, 60, 83]:

- 1) рациональное построение СТЭ при ее реконструкции, включающее в себя применение рациональных:
  - напряжений;
  - мощности и числа трансформаторов на ТП;
  - общего числа трансформаций;
  - места размещения ТП;
  - схемы электроснабжения;
  - компенсации реактивной мощности и др.;
- 2) уменьшение потерь электроэнергии в действующих СТЭ, включающее:
  - 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;
- 3) нормирование электропотребления, предполагающее наличие систем учета и контроля расхода электроэнергии, разработка научно обоснованных норм удельных расходов электроэнергии на единицу продукции;
- 4) составление электробалансов, которые осуществляют с отдельных энергоемких агрегатов и установок; выявление и анализ сверхнормативных небалансов электроэнергии;
- 5) организационно-технические мероприятия, разрабатываемые конкретно на каждом железнодорожном предприятии с учетом его специфики.

Для выяснения резервов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети необходимо проанализировать схемы питания КС (рис. 1.3). На однопутных участках применяются отдельная, консольная и встречно-

консольная схемы питания, на двухпутных – раздельная, узловая, параллельная, встречно-консольная, встречно-кольцевая схемы. Выбор схемы питания тяги поездов осуществляют по критериям надежности и экономичности.

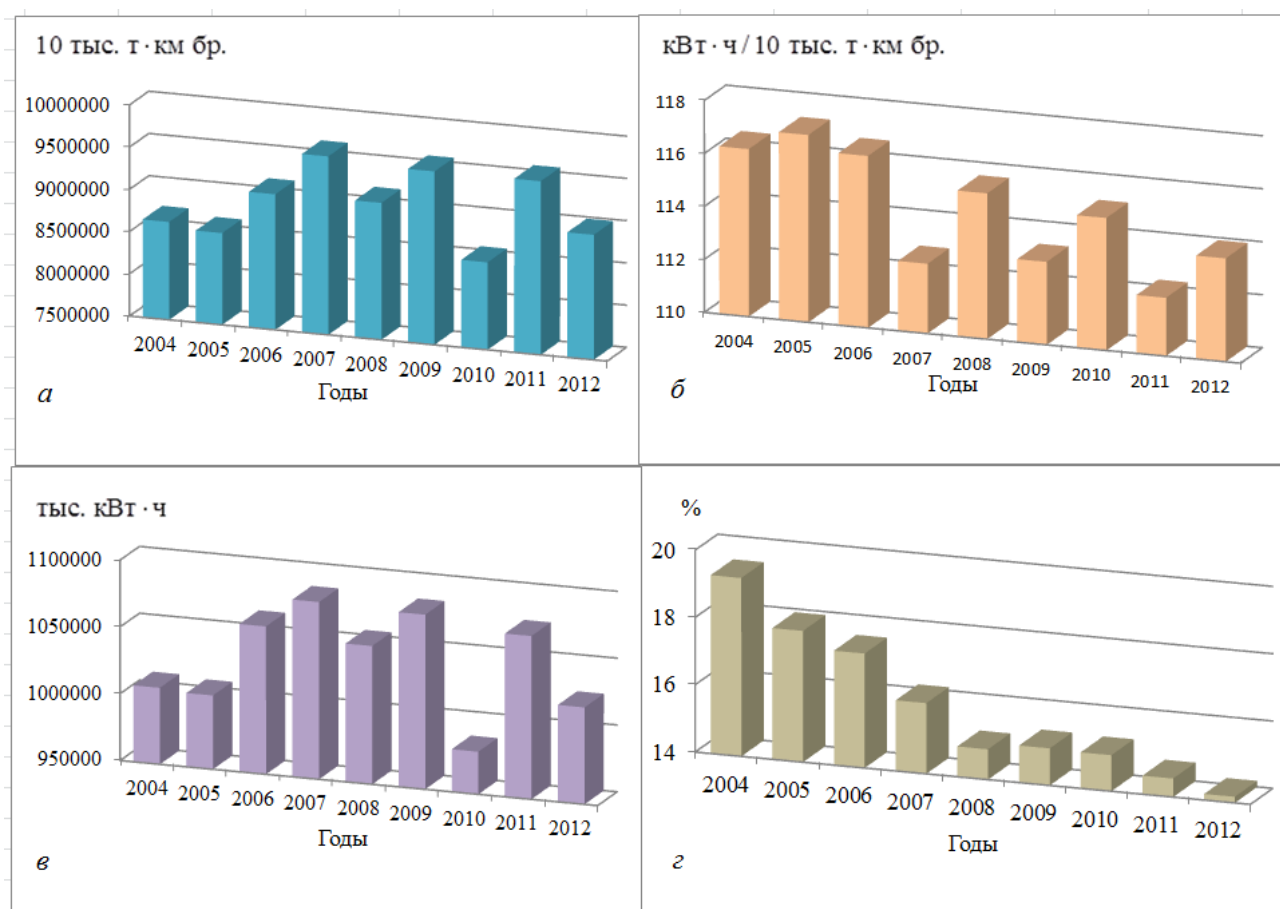


однопутный участок: *a* – раздельная, *b* – консольная, *v* – встречно-консольная; двухпутный участок: *z* – раздельная, *d* – узловая, *e* – консольная, *ж* – встречно-консольная, *з* – встречно-кольцевая, *и* – параллельная

Рисунок 1.3 – Схемы питания контактной сети

Применение поперечных соединений проводов КС приводит к выравниванию нагрузок в проводах. Это позволяет снизить потери электроэнергии в КС, уменьшить сечение проводов КС. Кроме того, поперечные соединения проводов КС улучшают условия рекуперации энергии, так как облегчают передачу энергии от рекуперирующего локомотива к локомотиву, следующему в тяговом режиме по другому пути. В реальных условиях соединение проводов КС двухпутного участка в середине при неизменном сечении проводов уменьшает потери энергии на 11-15 %. Если поперечные соединения расположены равномерно по длине фидерной зоны в трех точках, то экономия в потерях энергии достигает 21-24 %. Дальнейшее увеличение числа поперечных соединений малоэффективно [15].

В работе [7] проведен анализ показателей энергоэффективности работы Приднепровской ж.д. в период 2004-2012гг. при различных объемах выполненной тонно-километровой работы и удельного расхода электроэнергии на тягу поездов (рис. 1.4). Следует отметить уменьшение отчетных потерь электроэнергии с 19 до 14 %, что является результатом успешного выполнения Программы повышения энергоэффективности и Программы уменьшения потребеления энергоресурсов бюджетными организациями путем рационального использования в сферах транспорта.



*а* – перевозка электрической тягой, 10 тыс. т·км бр.; *б* – удельный расход электроэнергии на тягу поездов, кВт·ч/10 тыс. т·км бр.; *в* – потери электроэнергии в тяговой сети, тыс. кВт·ч; *г* – отчетные потери электроэнергии, %

Рисунок 1.4 – Динамика показателей энергоэффективности на Приднепровской ж.д.

Данные программы реализуются за счет выполнения мероприятий по приобретению новых локомотивов с улучшенными тягово-энергетическими характеристиками; модернизации существующего ЭПС; улучшения качественных показателей использования подвижного состава (масса поезда, нагрузка на ось грузового вагона, процент порожнего пробега вагона, участковая скорость и т. д.); увеличения объемов рекуперации электроэнергии; снижения уровня «условных» потерь электроэнергии в тяговой сети; сокращения энергоемких ограничений скорости движения поездов; уменьшения количества неграфиковых остановок поездов; резервного пробега локомотивов; времени введения поездов в график (нагона); снижения расходов электроэнергии в результате внедрения счетчиков с повышенным классом точности и АСКУЭ, а также внедрения современного энергосберегающего электроосветительного оборудования и автоматического управления внешним освещением; проведения энергоаудита предприятий [6–11].

Однако, несмотря на множество проводимых мероприятий и положительную динамику показателей энергоэффективности на предприятиях железнодорожного транспорта, в настоящее время недостаточное внимание уделяется задаче уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети СТЭ постоянного тока. Исследования, выполненные в работах [12, 13, 88-91], свидетельствуют о наличии резервов уменьшения потерь путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок, регулирования транспортного потока.

## **1.2 Пути уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока**

Уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети может быть достигнуто за счет (рис. 1.5):

- применения СТЭ повышенного напряжения [20, 86];

- применения накопителей электроэнергии [46-53];
- управления режимами СТЭ на базе информационных технологий [17-27, 54-61];
- усовершенствования методов учета и контроля потерь электроэнергии [62-81];
- разработки энергоэффективных ГДП, регулирования транспортного потока [28-45].

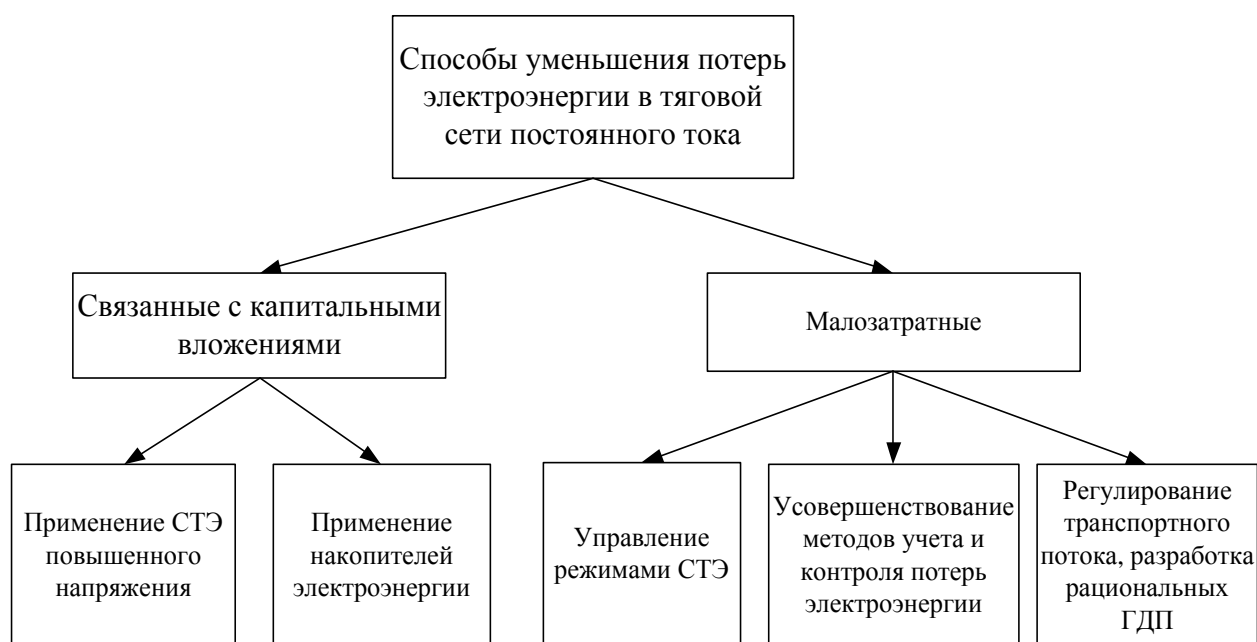


Рисунок 1.5 – Основные направления решения задач уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети

Ниже выполнен детальный анализ каждого из способов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети.

### 1.2.1 Управление режимами системы тягового электроснабжения

Одним из способов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети является рациональное управление режимами СТЭ, что предполагает оперативный анализ информации на различных уровнях реализации автоматизированного регулирования электропотребления, учета ЭС и принятие

решений, обеспечивающих минимизацию потерь электроэнергии. В [17] разработана стратегия достижения рационального электропотребления в тяговых сетях, базирующаяся на интегрированной системе управления устройствами электроснабжения с распределенным интеллектом и экспертной системе принятия решений. В [79] выявлены факторы, влияющие на составляющие электропотребления, получены обобщающие зависимости потерь электроэнергии, показаны пути автоматизации накопления баз знаний ЭС.

Современные информационные технологии позволяют интегрировать данные о реализации перевозочного процесса и соответствующем ему потреблении электроэнергии на тягу поездов. За счет этого они обеспечивают возможность распределения электропотребления в целях уменьшения стоимости электроэнергии. В работе [23] проведены соответствующие исследования на электрифицированном участке постоянного тока Приднепровской железной дороги, разработана структурная схема системы оперативного регулирования СТЭ (рис. 1.6).

Обобщенная схема оперативного регулирования СТЭ представлена в следующем виде:

$$Y = F(X^e, U, C), \quad X^e = (X^*, X_E), \quad U = f(X^e, Y^*, Z^*), \quad C = (c_1, \dots, c_m), \quad (1.1)$$

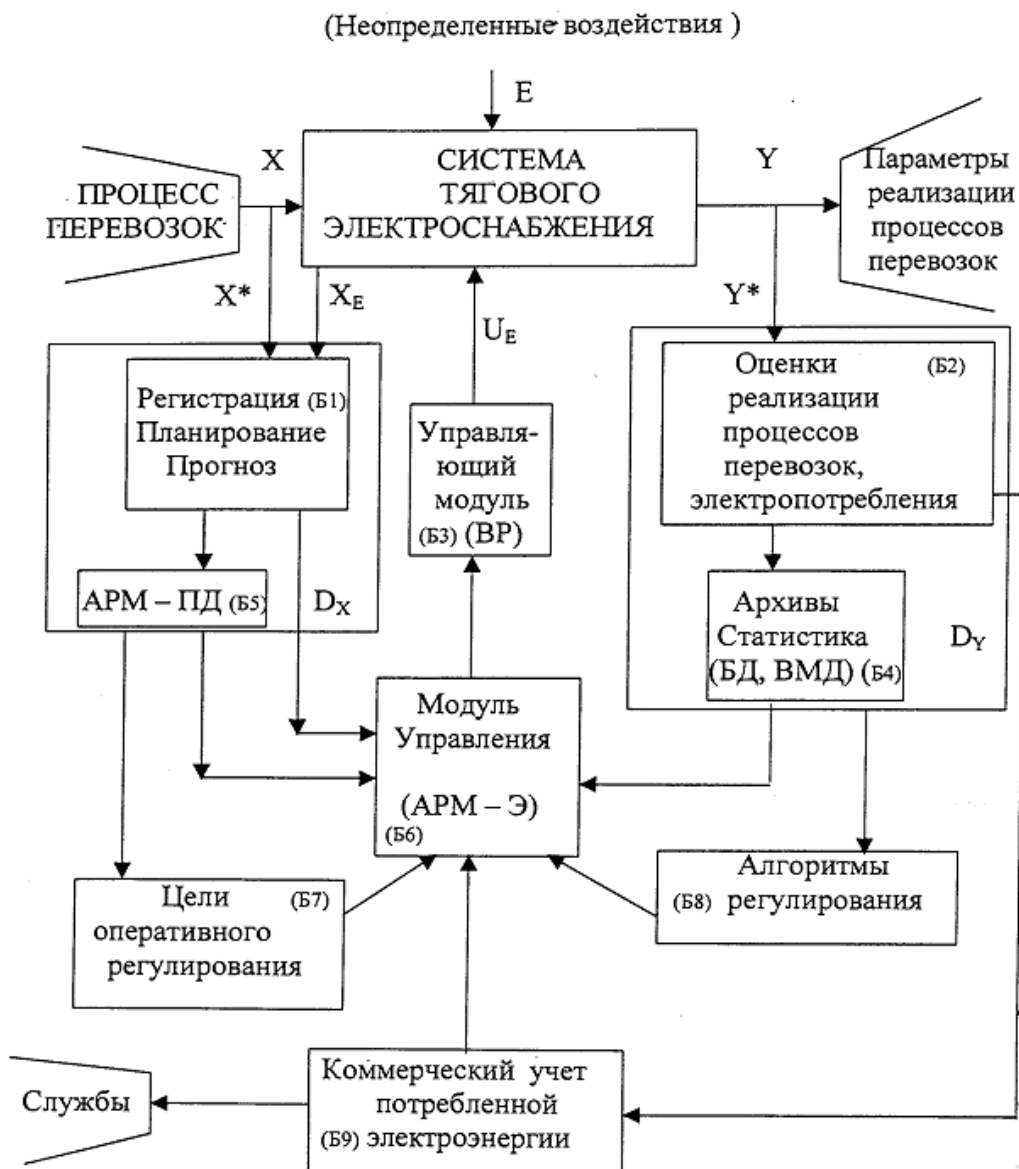
где  $F$  – оператор СТЭ как объекта управления, задающий алгоритм определения выхода системы  $Y$  по входной информации  $X^e$  и управляющим воздействиям  $U$ ;

$f(X^e, Y^*, Z^*)$  – алгоритм управления, учитывающий заданные цели управления и доступную информацию;

$C = (c_1, \dots, c_m)$  – вектор параметров СТЭ, необходимых для построения схемы системы регулирования электроснабжения.

В исследовании [22] решаются задачи по разработке комплексных информационных технологий, обеспечивающих реализацию

энергосберегающих режимов работы тяговых сетей электрифицированных линий железных дорог с учетом режимов работы ВСЭ, выполнен анализ режимов работы существующих и перспективных СТЭ и показаны пути реализации энергосберегающих технологий.



В [12] предложен метод определения рациональных режимов СТЭ на основе адаптированного генетического алгоритма (рис. 1.7). Такой подход позволяет рассчитывать регламент переключения оборудования ТП и МЗ в целях уменьшения затрат на потери электроэнергии в тяговой сети.

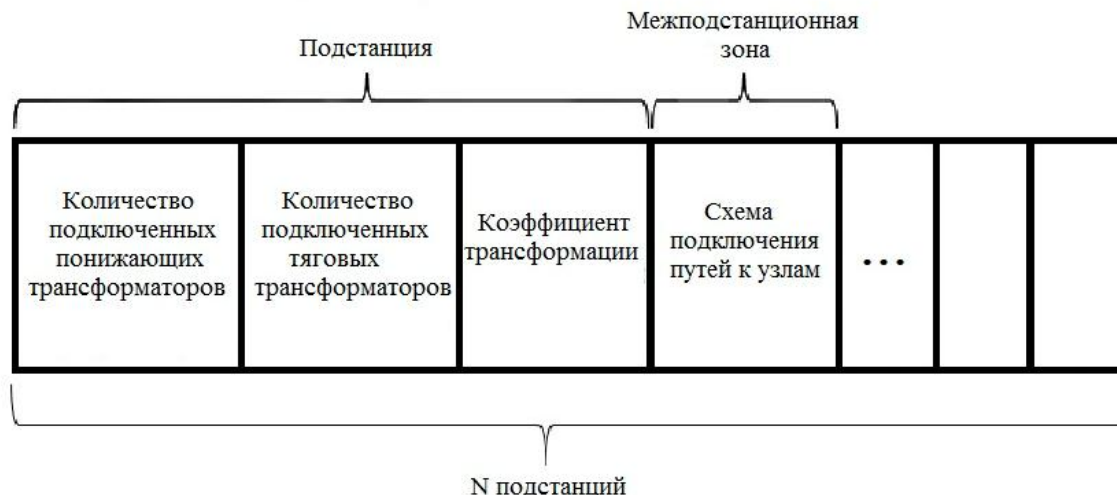


Рисунок 1.7 – Определение рациональных режимов СТЭ на основе адаптированного генетического алгоритма

От уровня напряжения зависит величина основных энергетических характеристик СТЭ – потерь электроэнергии в КС, ТП, ПСК и ППС [54-57]. Характер изменения напряжения на шинах ТП по-разному влияет на потери электроэнергии в элементах СТЭ. Если уровень напряжения снижается, то это вызывает уменьшение потерь и намагничивание в оборудовании ТП и ЭПС, в результате снижаются удельные расходы на тягу поездов, но одновременно возникают дополнительные потери электроэнергии в КС. В трудах [12, 13] предложено мероприятие по уменьшению потерь за счет применения рациональных уровней напряжения на шинах ТП.

Управляющими параметрами СТЭ являются положения переключателей ответвлений силовых трансформаторов, которые при фиксированной схеме электроснабжения определяют напряжение на токоприемниках ЭПС.

В случае применения вольтодобавочных устройств напряжение можно регулировать плавно в пределах 20 % от номинального. В [58-61] повышение эффективности СТЭ постоянного тока предложено путем перехода на повышенный уровень напряжения в тяговой сети, распределенную систему питания с продольной высоковольтной линией с использованием на ТП новых преобразовательных агрегатов вольтодобавочного типа, а также

комбинированной активной фильтрации гармоник в подсистемах тягового электроснабжения.

Одним из методов решения задач уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети является имитационное моделирование и прогнозирование режимов работы СТЭ [112-120].

Основу работы имитационных моделей составляет формирование и расчет мгновенных схем. Под расчетом мгновенных схем понимается расчет токораспределения схемы и определение мгновенных значений следующих параметров: токов фидеров, потерь напряжения в местах расположения нагрузки, потерь электроэнергии в тяговой сети и на ТП.

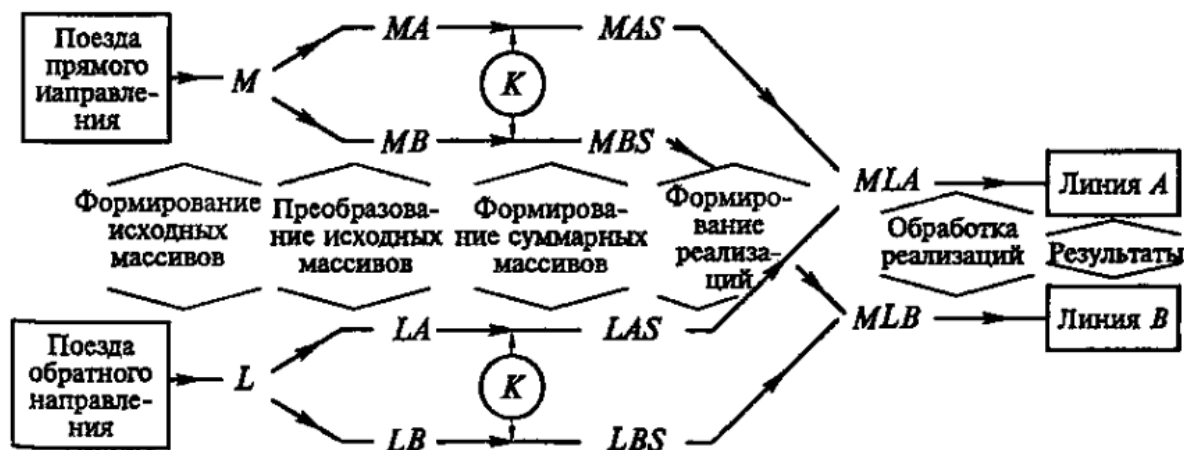
Величины тяговых нагрузок определяются на основе тяговых расчетов или экспериментально. При режимных расчетах используют исполненные, детерминированные и вероятностные ГДП. Детерминированные графики применяются при определении пропускной способности участка дороги по СТЭ. К моделированию на основе вероятностных графиков прибегают при проектировании СТЭ и определении потерь электроэнергии в ее элементах.

В работе [115] задача регулирования транспортного потока решается посредством подачи на объект управления процессом перевозок «регулирующего» ГДП, характер которого формируется исходя из прогнозного электропотребления. Управляющим параметром выступает межпоездной интервал движения поездов, значения которого выбираются с учетом нагрузочной способности СТЭ.

В исследовании [119] рассмотрена ситуация имитационного моделирования дислокации поездов на двухпутном участке с учетом потерь электроэнергии в тяговой сети. Схема алгоритма, реализующего анализ и моделирование энергетических характеристик СТЭ в виде массивов информации, представлена на рис. 1.8.

В [20] моделирование режимов работы СТЭ выполнено с учетом параметров ВСЭ. СТЭ представлена структурной схемой со следующими основными блоками (рис. 1.9):

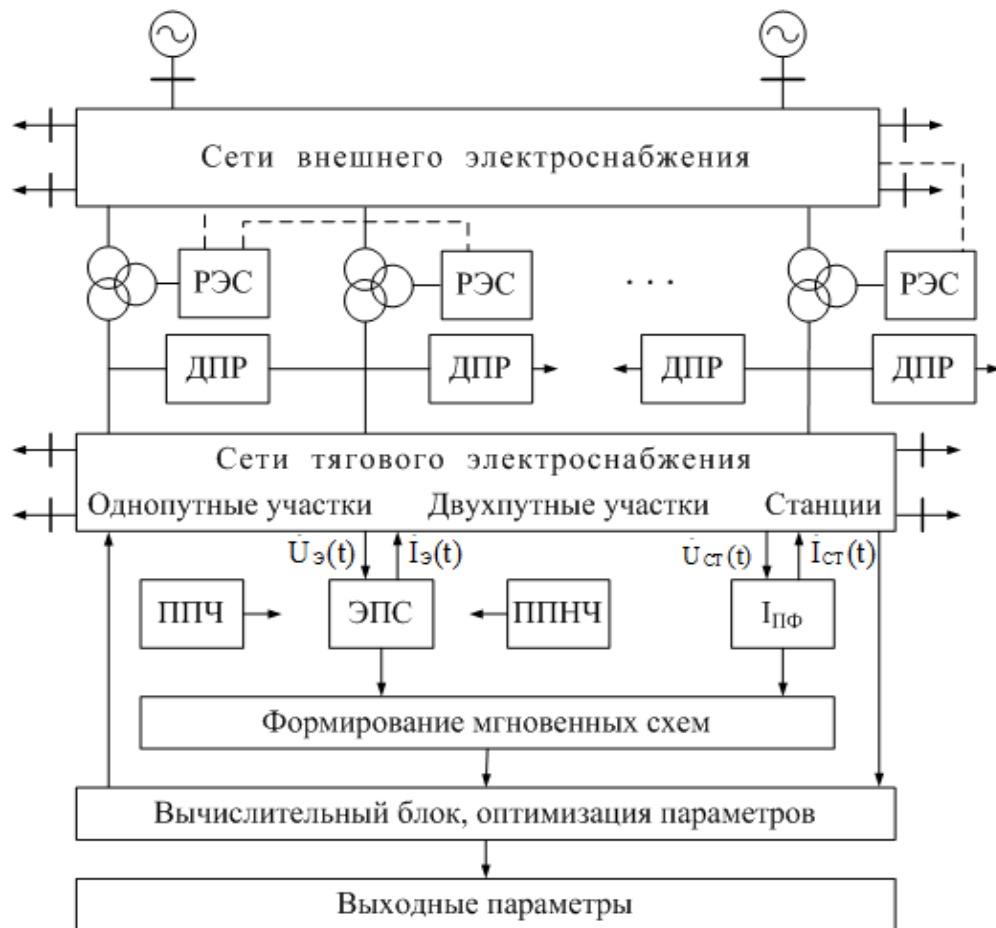
- трехфазная ВСЭ;
- однофазная СТЭ;
- РЭС нетяговых и нетранспортных потребителей;
- линии электропередач, выполненные по схеме ДПР.



$M, L$  – массивы поездов прямого и обратного (встречного) направлений;  
 $K$  – сдвиг массивов;  $MA, MB, LA, LB$  – преобразованные массивы;  $MAS, LAS,$   
 $MBS, LBS$  – суммарные массивы;  $MLA, MLB$  – реализации.

Рисунок 1.8 – Схема алгоритма, реализующего анализ и моделирование энергетических характеристик СТЭ при двустороннем питании участка

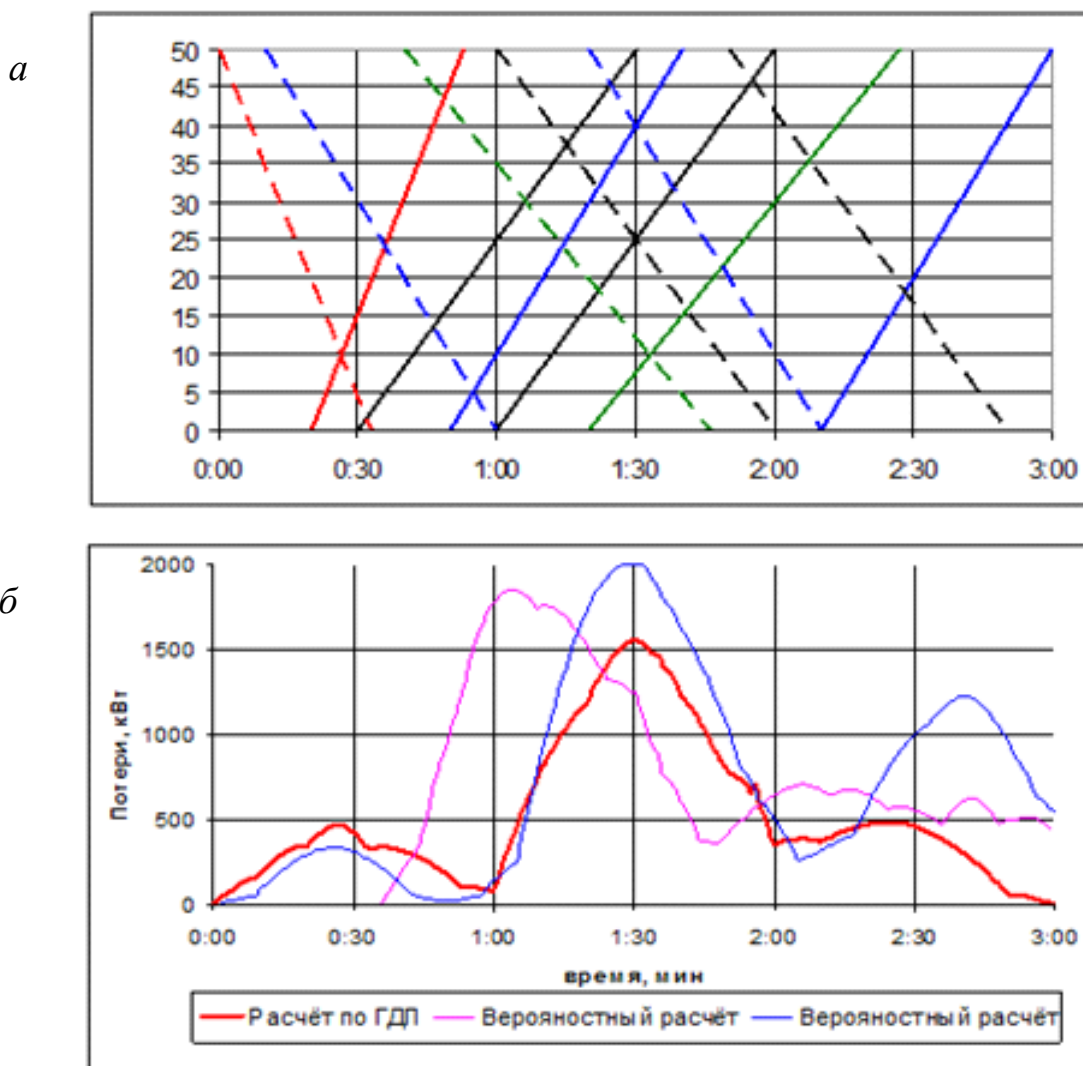
Применяемые в настоящее время программные средства и методы расчетов режимов СТЭ основываются на упрощенном представлении ВСЭ путем ее эквивалентирования. Так, в проектных организациях железнодорожного транспорта и службах электроснабжения железных дорог России широко применяется программный комплекс «Nord», разработанный ВНИИЖТом. В данной программе элементы СТЭ задаются соответствующими комплексными сопротивлениями, а тяговые нагрузки представляются источниками тока. Такой подход обеспечивает приемлемую точность только при достаточно мощной ВСЭ, когда однофазные тяговые нагрузки не приводят к существенной несимметрии на шинах питающего напряжения ТП.



ППЧ – поток поездов четного направления; ППНЧ – то же нечетного направления;  $I_{ПФ}$  – токи питающих фидеров

Рисунок 1.9 – Структурная схема имитационной модели

Существуют модели и программные средства расчета нагрузочной способности СТЭ, с помощью которых возможна оценка наличной пропускной способности участка методами имитационного моделирования («Кортэс»). В результате моделирования поездной ситуации с установленным межпоездным интервалом и т.д. рассчитываются параметры СТЭ с учетом напряжений на токоприемниках ЭПС, температуры проводов КС, расхода и потерь электроэнергии. С применением новых технических и программных средств в Днепропетровском органе сертификации железнодорожного транспорта Украины разработан аналогичный программный комплекс «Матрикс» [120], скриншоты работы которого представлены на рис. 1.10.



В последние годы в области электротехники, механики и т.д. появились программные продукты высокой степени универсальности, позволяющие осуществлять моделирование электротяговых сетей. К ним относится программа EWB (Electronics Workbench), достоинством которой является возможность моделирования потерь электроэнергии, пропускной способности, максимальных значений токов, перетоков мощности, работы коммутационной аппаратуры, релейной защиты.

Однако в настоящее время остается нерешенной задача моделирования порядка отправления поездов различных категорий, дислокации поездов между ТП, интервалов между поездами, взаимного расположения поездов на двухпутных участках с учетом потерь электроэнергии в тяговой сети.

### 1.2.2 Применение накопителей электроэнергии

Одним из перспективных направлений уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети является использование на ТП накопителей электроэнергии – реверсивных устройств, предназначенных для частичного или полного разделения во времени процессов выработки и потребления энергии [46-53]. С энергетической точки зрения идеальна установка накопителей на поездах, однако ввиду технической сложности реализации большее распространение получили стационарные накопители. Они не влияют на потоки электроэнергии в тяговой сети, но решают задачу сглаживания энергопотребления для ТП и первичной энергосистемы, а также обеспечивают возможность применения рекуперативного торможения на поездах. Имеется два варианта установки стационарных накопителей: на фидерах ТП или в середине фидерной зоны на ПСК.

Применение НЭ на ТП постоянного тока позволяет комплексно решить две проблемы, связанные с экономией электроэнергии:

- НЭ используется в качестве приемника избыточной части электроэнергии, возвращаемой поездами в сеть, которая не может быть использована другими поездами, работающими в тяговом режиме;
- НЭ используется в качестве аккумулятора энергии, который принимает электроэнергию от ВСЭ в период спада тяговой нагрузки или в период времени с действием низкого тарифа и передает ее в тяговую сеть при значительном увеличении тяговой нагрузки или в период действия высокого тарифа. Этим выравнивается режим потребления энергии от внешней системы, что приводит к уменьшению ее потерь (рис. 1.11)[52].

На рис. 1.12, (а) показано подключение НЭ к тяговой сети, на рис. 1.12, (б) – схема потоков электрической энергии в СТЭ при применении НЭ, на рис. 1.13 приведен график потребления мощности СТЭ, использующей НЭ [46, 51]. Функция НЭ в СТЭ состоит в том, чтобы запастись электроэнергией

в периоды суточного цикла и затем отдавать ее на покрытие утренних и вечерних пиков.

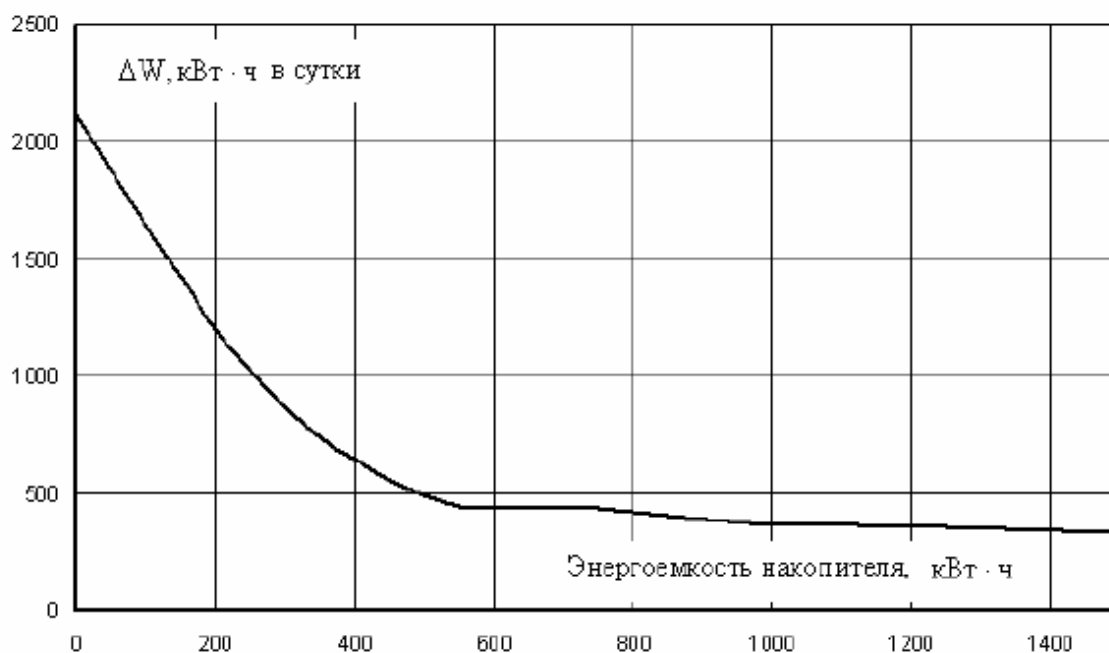
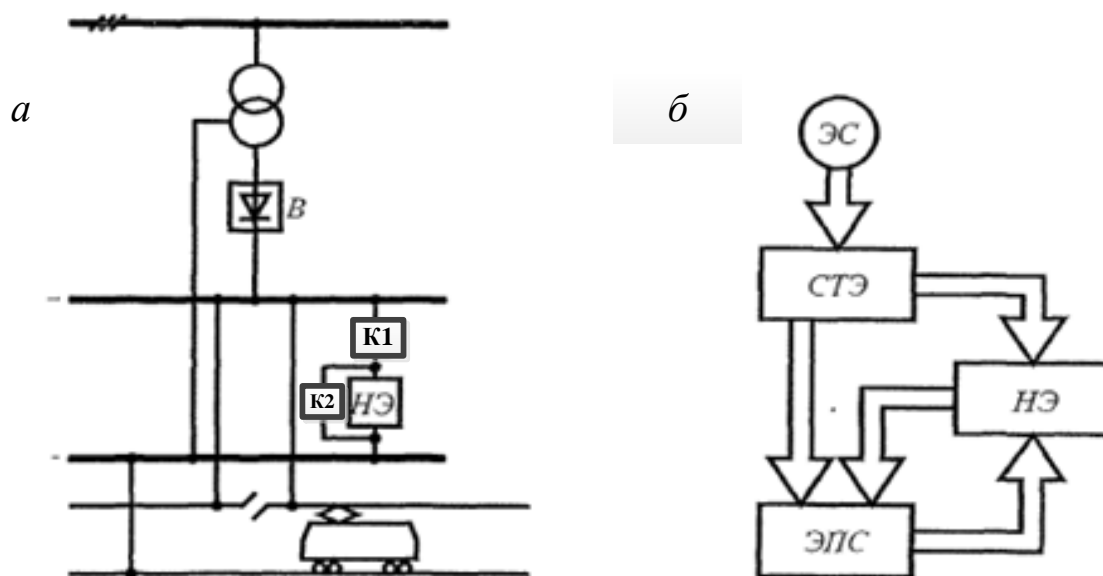
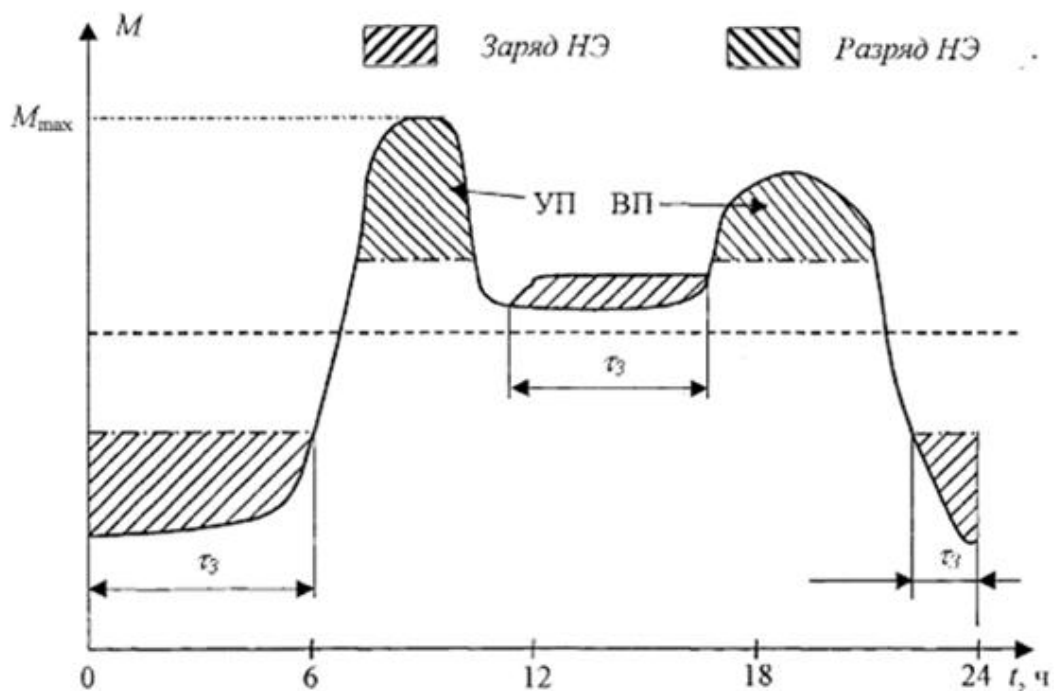


Рисунок 1.11 – Уменьшение потерь электроэнергии за счет применения НЭ для ТП Московской ж.д.



НЭ – накопитель энергии; К1, К2 – коммутационная аппаратура

Рисунок 1.12 – Подключение НЭ к тяговой сети (*а*) и схема потоков электрической энергии в СТЭ (*б*)



УП – утренний пик, ВП – вечерний пик

Рисунок 1.13 – График потребления мощности СТЭ, использующей НЭ

Однако установка накопителей электроэнергии, в отличие от малозатратных методов уменьшения потерь, имеет больший срок окупаемости капитальных вложений.

### 1.2.3 Применение систем тягового электроснабжения повышенного напряжения

В настоящее время базовыми СТЭ являются: СТЭ постоянного тока напряжением 3 кВ, СТЭ однофазного переменного тока промышленной частоты 50(60) Гц напряжением 25 кВ и 50 кВ и СТЭ однофазного переменного тока пониженной частоты 16 2/3, 25 Гц напряжением 15 кВ. Сети постоянного тока 3 кВ имеют резко переменную нагрузку ЭПС. Тяговая мощность современных скоростных поездов составляет 8 – 10 МВт, такая же мощность требуется для тяжеловесных поездов массой 5–6 тыс. т. Для обеспечения движения поездов повышенной массы 6–12 тыс. т и скоростного движения необходима реконструкция тяговых сетей. Режимы работы традиционной СТЭ переменного тока 25 кВ характеризуются нерациональными потоками

реактивной мощности, несимметричными параметрами, наличием транзита мощности из-за межсистемных перетоков, что приводит к дополнительным потерям электроэнергии в тяговой сети.

Одним из радикальных методов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети является применение СТЭ повышенного напряжения, представленных на рис. 1.14.



Рисунок 1.14 – Системы электрической тяги повышенного напряжения

В работах [86, 20, 21] показана возможность повышения напряжения передачи электроэнергии поездам на уровне 60, 90 и 110 кВ с сохранением напряжения на ЭПС 25 кВ, 50 Гц (автотрансформаторные системы) и напряжения непосредственно в контактной сети 50 кВ, 50 Гц с этим же напряжением на ЭПС. Режимы работы автотрансформаторных систем существенно снижают несимметричность тяговых нагрузок, а при повышении

напряжения питающего провода до 110 кВ практически исчезает неоднородность тяговых сетей переменного тока и ЛЭП энергосистем. Повышение напряжения в питающем проводе автотрансформаторных систем в диапазоне 35–110 кВ осуществляется путем увеличения коэффициента трансформации автотрансформатора. Повышение напряжения в питающем проводе до 65, 85, 110кВ позволит увеличить предельную массу поезда в 1,5 – 2 раза по сравнению с соответствующей системой 2×25 кВ.

СТЭ с повышенным до 50 кВ напряжением переменного тока в контактной сети реализованы в ЮАР, Канаде, США. При сохранении базовых объемов перевозок (напряжение – 25 кВ, минимальный интервал между поездами – 10 мин, средняя масса поезда – 3680 т) повышение напряжения в контактной сети до 50 кВ позволяет увеличить длину МЗ до 150 – 200 км и осуществлять питание от районных подстанций напряжением 220 – 330 кВ.

Таким образом, автотрансформаторная система имеет явные преимущества перед базовыми в отношении уровня напряжения и величины потерь электроэнергии в контактной сети, а также уровня мешающих воздействий на линии СЦБ и связи. Применение СТЭ повышенного напряжения позволяет вывести из эксплуатации ТП, требующие значительных эксплуатационных расходов, а также использовать большое число компонентов прежней системы. Внедрение новой СТЭ, по различным оценкам, обеспечивает экономию до 10 % электроэнергии.

#### 1.2.4 Усовершенствование методов учета и контроля потерь электроэнергии

Контроль электропотребления на предприятиях УЗ осуществляется с помощью нормирования расходов ТЭР, инструментальных средств и методических мероприятий.

Нормирование удельных затрат энергоресурсов осуществляется в целях рационального использования и экономии электроэнергии и является основой для применения экономических санкций за их нерациональное использование и внедрение экономических механизмов стимулирования энергосбережения [62].

Нормирование удельных расходов ТЭР осуществляется согласно постановлению Кабинета Министров Украины от 15 июля 1997 г. № 786 «О порядке нормирования удельных расходов топливно-энергетических ресурсов в общественном производстве» [62] и [63], Закону Украины «Об энергосбережении» [64]. В области нормирования энергозатрат стоит отметить работы [65-73].

К инструментальным мероприятиям относится применение портативных анализаторов мощности, счетчиков потерь и АСКУЭ. Счетчик потерь энергии, установленный на питающем фидере, регистрирует величину потерь в зависимости от: ампер-квадрат-часов; расчетного коэффициента потерь, постоянного для конкретного фидера; периода измерения потерь энергии; квадрата фактического коэффициента трансформации трансформатора тока фидера ТП.

К методическим мероприятиям относятся уменьшение небалансов и усовершенствование методов расчета потерь электроэнергии. Небалансы возникают вследствие неточной фиксации приборами составляющих баланса, а также наличия расходов, не фиксируемых приборами, технических потерь на объекте, определяемых расчетным путем, и коммерческих потерь, возникающих вследствие постороннего влияния. Вопросы определения причин небалансов и уменьшения уровня сверхнормативных небалансов рассмотрены в работах [74, 76].

В настоящее время потери электроэнергии в контактной сети определяются согласно «Инструкции по расчету технологических потерь электроэнергии в устройствах тягового электроснабжения», утвержденной приказом УЗ от 29. 08. 2003 г. № 342-ЦЗ. Однако этот способ дает весьма приблизительные значения, так как точное измерение потерь в контактной сети невозможно из-за того, что нагрузка носит стохастический характер. Повысить точность и эффективность контроля за потерями можно с помощью непрямых методов, рассмотренных в работах [77-80]. В работе [81] предложен усовершенствованный косвенный метод учета потерь электроэнергии в

контактной сети за счет учета дополнительных факторов: схемы питания участка, износа контактных проводов, количества поездов на расчетной зоне, температуры окружающей среды, скорости движения, тока электровоза. Такой подход позволяет повысить точность определения величины потерь электроэнергии на 6,9 % по сравнению с расчетом по действующей методике.

### 1.3 Управление положением тяговых нагрузок, разработка рациональных графиков движения поездов

В исследованиях [94-101] даны рекомендации по уменьшению потерь электроэнергии в тяговой сети за счет регулирования транспортного потока, разработки рациональных ГДП. В данных исследованиях потенциал уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети оценивается в пределах 2-5 % от уровня расхода электроэнергии на тягу поездов.

Регулирование транспортного потока на железнодорожном транспорте обеспечивается на основе движения поездов по графику, который позволяет планировать поездную работу как количественно, так и по времени [28, 32]. В ГДП предусмотрена технологическая увязка работы участков, станций, узлов, локомотивного парка, его совершенствование способствует уменьшению эксплуатационных расходов железных дорог [92, 93].

При организации перевозочного процесса должны учитываться технологические ограничения и условия, определяющие качество составления ГДП [28, 32]. Если на направлении, состоящем из  $m$  участков, требуется построить график на заданные размеры движения по каждому  $x$ -му участку и при этом обеспечить минимальные приведенные затраты на перевозки  $C$ , то целевая функция, отвечающая этим требованиям, будет определяться формулой

$$C = \sum_{x=1}^m (K_{x,\lambda} e_x^{\text{ост}} + T_x^{\text{пр}} + e_x^{\text{пчп}}) + \sum_{x=2}^m (T_{x,\lambda}^{\text{тех}} + t_{\text{ож}}^{\text{от}} N_{x,\lambda}^{\text{от}}) e_x^{\text{пчт}} + \sum_{x=2}^{m+1} t_{\text{ож}}^{\text{рф}} N_{x,\lambda}^{\text{пр}} e_x^{\text{сч}} \rightarrow \min, \quad (1.2)$$

где  $e_x^{\text{ост}}$ ,  $e_x^{\text{пчп}}$ ,  $e_x^{\text{пчт}}$ ,  $e_x^{\text{сч}}$  – приведенные затраты, связанные соответственно с одной остановкой на участке, поездо-часом простоя на промежуточных станциях, технических станциях и составо-часом в парках прибытия и отправления на сортировочных станциях, грн;

$K_{x,\lambda}$  – число остановок на участке;

$T_x^{\text{пр}}$ ,  $T_{x,\lambda}^{\text{тех}}$  – время простоя соответственно на промежуточных и технических станциях, поездо-ч.

В работе [30] разработана методика расчета наличной пропускной способности участков железных дорог, включающая аналитические зависимости для определения межпоездных интервалов, учитывающих параметры СТЭ, характер тяговой нагрузки и режимы движения поездов на расчетном участке. Результаты расчетов минимально возможных межпоездных интервалов для пропуска поездов дифференцированной массы по электрифицированному участку постоянного тока представлены на рис. 1.15.

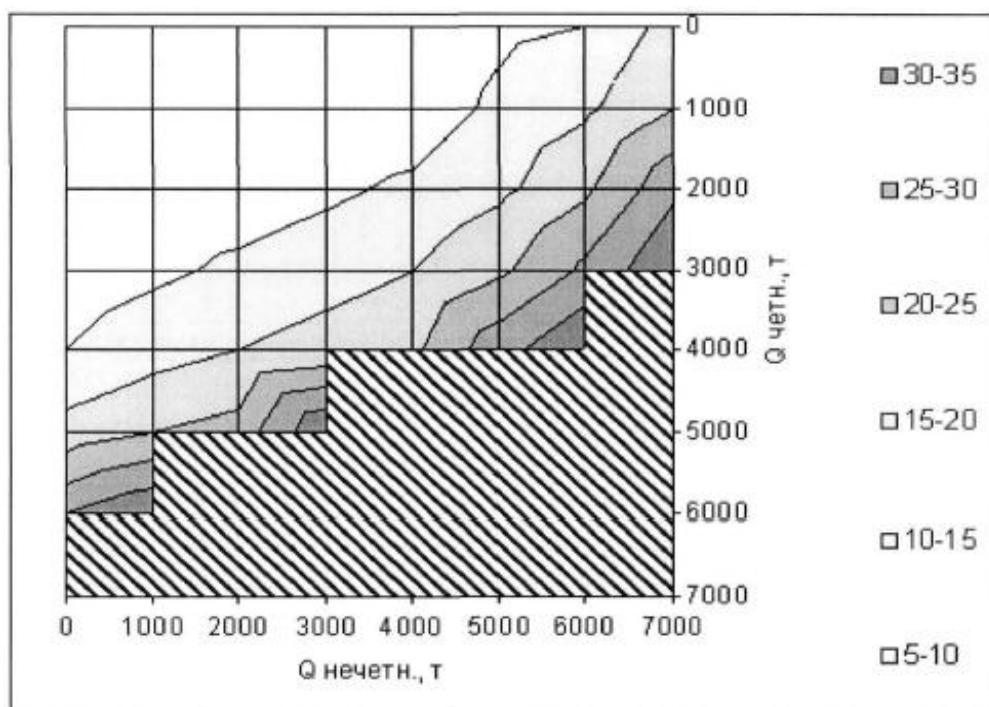


Рисунок 1.15 – Топограмма для определения минимально возможных межпоездных интервалов для пропуска поездов дифференцированной массы по электрифицированному участку постоянного тока

Следует отметить, что в работе [30] предложен ГДП, построение которого проводится с учетом максимальной нагрузки СТЭ с минимально возможными интервалами между поездами, однако вследствие неравномерности размеров движения, расчетные ГДП могут значительно отличаться от фактических [111]. В таких случаях возникает задача определения интервалов между поездами, соответствующих фактическим размерам движения, для решения которой необходимо развитие метода построения ГДП с учетом режимов работы СТЭ.

Основой повышения эффективности эксплуатационной работы железных дорог Украины в современных условиях является внедрение новых методов управления перевозочным процессом на базе информационных и управляющих технологий. Для решения указанной проблемы на предприятиях железнодорожного транспорта Украины используется система управления перевозочным процессом на базе технолого-экономической модели ТЕМП-УЗ. Сущность технолого-экономических принципов управления заключается в принятии предварительно экономически обоснованных организационных и технологических решений, которые позволяют минимизировать затраты и увеличить поступления денежных средств [102-105].

Реализация управления эксплуатационной работой на технолого-экономических принципах предусматривает:

- единство и конкретность понятий и определений количественных и качественных показателей эксплуатационной работы по технологическому содержанию, возможность их экономической оценки и простоту использования в качестве параметров управления при планировании, нормировании, оперативном управлении, учете и анализе для железнодорожного подразделения любого уровня управления;
- согласование централизованного управления отраслью и относительной территориальной самостоятельности подразделений, взаимодействие подразделений одного уровня, основанное на

технологическо-экономически обоснованных нормативах и оперативных решениях;

- качественную оценку и материальное стимулирование управленческого труда сотрудников диспетчерского аппарата в зависимости от обеспечения ими прироста прибыли от перевозок на полигоне подразделения любого уровня управления.

Оптимизация управления технологической системой состоит в том, чтобы наиболее рациональным образом изменять ее технологические параметры (интенсивность потока, скорость его продвижения, время обслуживания). Реализация технологическо-экономических принципов управления перевозками осуществляется при наличии у руководящего аппарата различных звеньев управления информационной управляющей системы ТЕМП-УЗ как инструмента, который не только обеспечивает информацией, но и планирует работу и предоставляет оптимальные (с точки зрения экономической целесообразности) варианты организации пропуска транспортного потока.

ТЕМП-УЗ имеет в своем составе информационные системы для обеспечения управления вагонопотоками, ТПС, локомотивными бригадами, инфраструктурой (пути, станции, перегоны, участки, полигоны, коридоры, железной дороги, и др.), автоматизированную систему планирования и нормирования работы железной дороги, автоматизированную систему расчета и анализа показателей работы железной дороги, а также систему моделирования работы железной дороги и систему моделирования и анализа грузопотоков. Эти системы базируются как на существующих моделях, системах и базах данных, так и новых, которые должны дополнить недостающие модели. Сбор первичной информации производится как в ручном режиме (через АРМы), так и с помощью новых систем (САПС-УЗ, МПЦ „Каскад” и др., которые предназначены для повышения уровня и степени достоверности информации). Структура информационного обеспечения ТЕМП-УЗ показана на рис. 1.16 [102-105].

В общем виде ТЕМП-УЗ представляет собой ряд взаимосвязанных, (с возможностью работать обособленно) информационных систем трех уровней. К первому уровню относятся информационные системы (АИС – автоматизированные информационные системы), ко второму уровню – системы планирования и расчета (АСП – автоматизированные системы планирования), к третьему уровню – системы моделирования и анализа (АСУ – автоматизированные системы управления). Системы третьего уровня направлены на обеспечение поддержки управленческих решений. К пользователям системы ТЕМП-УЗ относятся центры управления перевозками (ЦУП) различных уровней (рис. 1.17) [102-105].



Рисунок 1.16 – Информационное обеспечение ТЕМП-УЗ

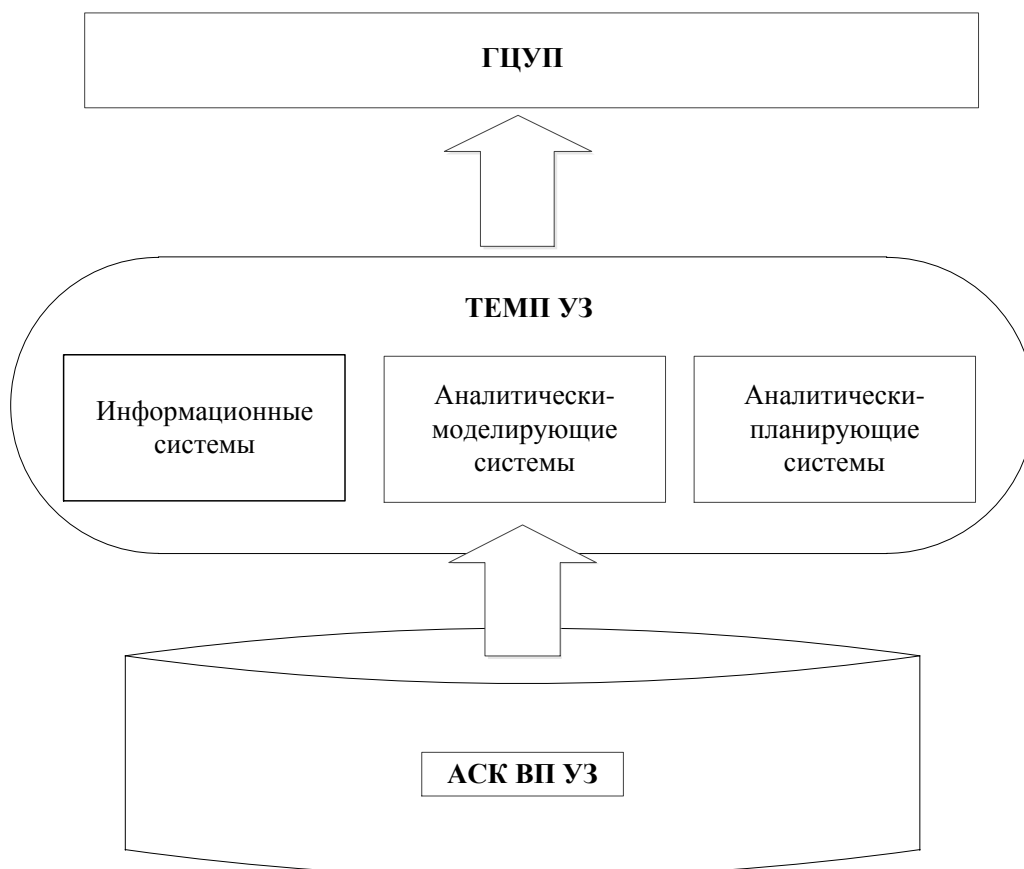


Рисунок – 1.17 Общая структура интегрированной информационно-управляющей системы технолого-экономического управления железными дорогами Украины (ТЕМП-УЗ)

Однако существующая система не учитывает влияния показателей транспортного потока на энергетические характеристики СТЭ, а именно потери электроэнергии в тяговой сети. В результате неравномерный характер движения поездов различного веса по расчетному ГДП приводит к повышению потерь электроэнергии в тяговой сети.

#### **1.4 Постановка задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок**

Анализ современного состояния задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети показал, что существуют дополнительные

резервы снижения потерь путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок:

- 1) дислокации поездов между ТП;
- 2) последовательности отправления поездов различных категорий;
- 3) интервалов между поездами.

В настоящее время управление транспортным потоком осуществляется по графику движения, который не учитывает влияние показателей транспортного потока на энергетические характеристики СТЭ. В результате неравномерный характер движения поездов различного веса по расчетному ГДП приводит к повышению потерь электроэнергии в тяговой сети.

В связи с вышеизложенным целью данной диссертационной работы является решение задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок, регулирования транспортного потока, оптимизации режимов СТЭ, составления энергоэффективных ГДП (рис. 1.18).

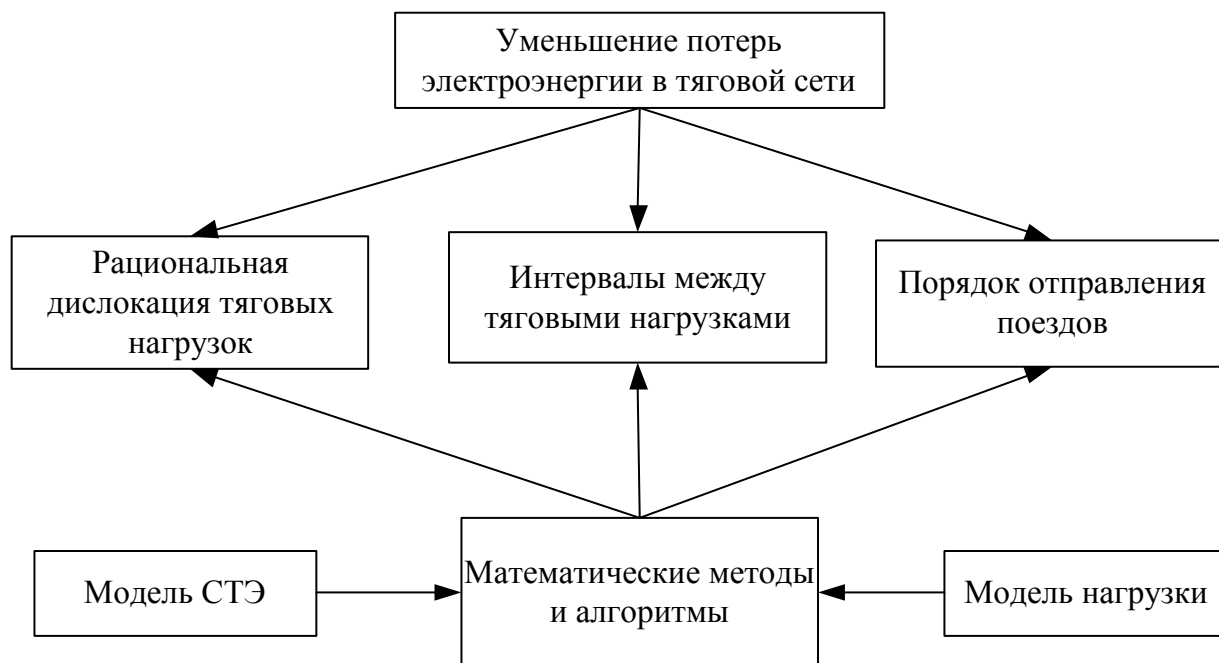


Рисунок 1.18 – Задача уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать модели СТЭ и транспортного потока.
2. Исследовать возможности уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок.
3. Разработать принципы уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем определения рациональных:
  - дислокации и интервалов между тяговыми нагрузками;
  - последовательности отправления поездов различных категорий.
4. Разработать программный комплекс для составления энергоэффективных ГДП.
5. Выполнить технико-экономическое обоснование предложенных энергосберегающих мероприятий.

## РАЗДЕЛ 2

### МОДЕЛИ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ НАГРУЗКУ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В данном разделе разработаны модели СТЭ и транспортного потока для решения задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети. Особенностью данных моделей является возможность исследования зависимостей энергетических характеристик СТЭ от дислокации тяговых нагрузок, показателей транспортного потока.

#### 2.1 Модель системы тягового электроснабжения постоянного тока

СТЭ состоит из технически сложных элементов, взаимодействующих друг с другом: тяговой сети, включающей рельсовую сеть, КС, питающие и отсасывающие линии; ТП, со всем комплексом оборудования; поперечных соединений КС – ПСК и ППС. Потери электроэнергии в тяговой сети образуются при протекании тока, потребляемого ЭПС, по КС и рельсам. Схема подключения ТП к ВСЭ для электрифицированного участка постоянного тока Приднепровской ж.д. приведена на рис. 2.1.

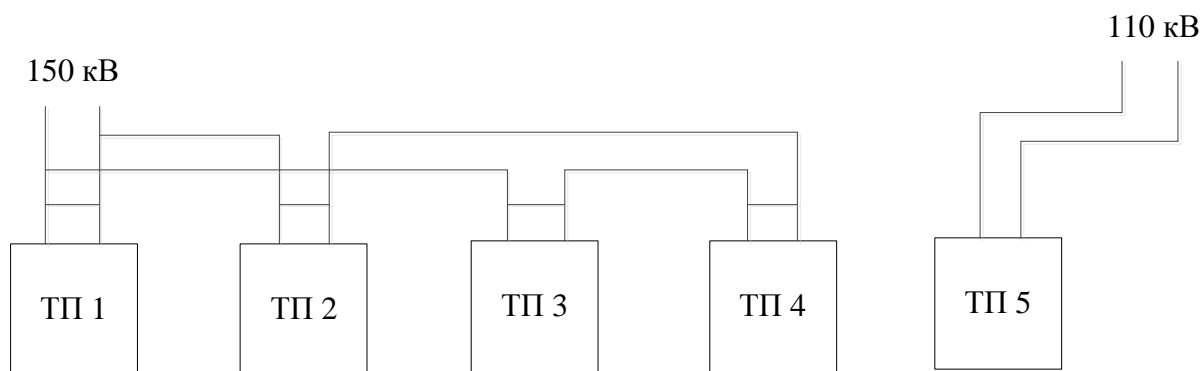


Рисунок. 2.1 – Схема подключения ТП к ВСЭ

Для уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока необходимо разработать модель СТЭ с соблюдением ряда допущений [106-109]:

- работа СТЭ рассматривается в «нормальном режиме»;
- износ КС не учитывается;
- влияние температуры окружающей среды на сопротивление тяговой сети не учитывается;
- режим электропотребления ЭПС задан величиной тока;
- токовые нагрузки и скорости поездов, определенные на основании тяговых расчетов, являются исходным материалом для электрических расчетов;
- удельное сопротивление рельсовой и тяговой сети принято постоянным на рассматриваемом участке;
- уравнильные токи в тяговой сети и рекуперация электроэнергии не учитываются;
- дополнительные потери не учитываются;
- напряжение на вводах ТП принято постоянным.

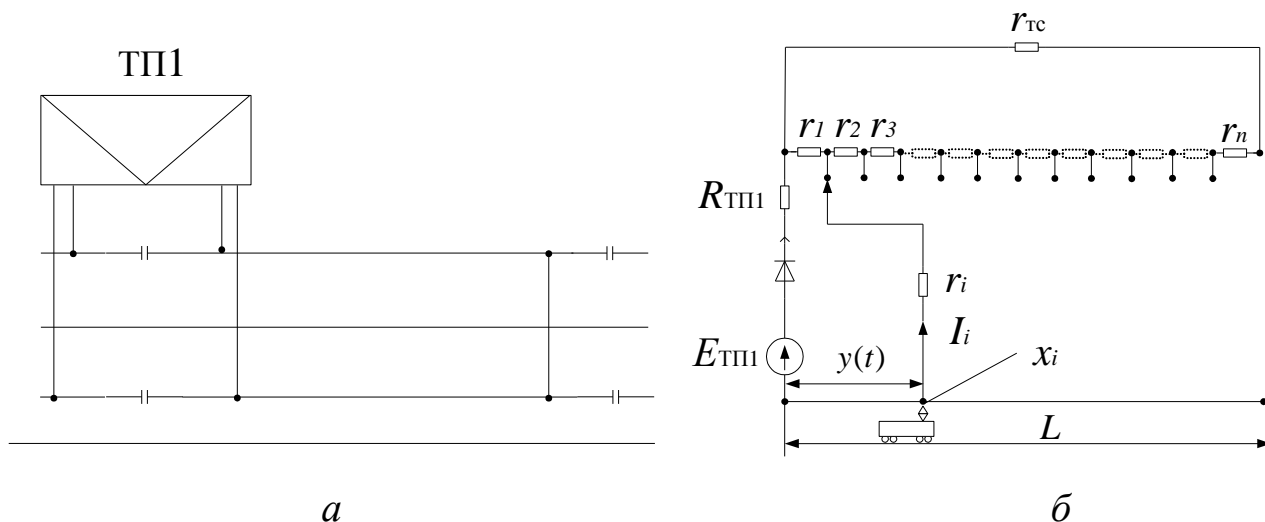
Данная модель должна обеспечивать определение потерь электроэнергии в тяговой сети при различных положениях ЭПС между ТП.

Разработаем модели СТЭ постоянного тока для различных схем питания контактной сети и рассмотрим принципы определения потерь мощности в тяговой сети для каждой из них.

Для расчета потерь мощности в тяговой сети в диссертационной работе использован метод, основанный на ГДП [16]. Суть этого метода заключается в выборе ряда характерных сечений ГДП с построением для них мгновенных схем нагрузок, при этом осуществляется редукция динамической модели к набору статических. Для выполнения моделирования исследуемый интервал разбивается на малые промежутки времени, внутри которых параметры СТЭ принимаются неизменными. Экспериментальные исследования СТЭ, а также

результаты компьютерного моделирования показывают, что такое допущение является вполне приемлемым [148, 91, 137].

На рис. 2.2 представлена модель СТЭ постоянного тока (при одном поезде между ТП) для консольной схемы питания, где сопротивление тяговой сети  $r_{тс}$  замещается множеством мгновенных сопротивлений тяговой сети  $r_n$  за время движения поезда между ТП [51, 81].



$R_{ТП}$  – сопротивление тяговой подстанции;  $E_{ТП}$  – ЭДС тяговой подстанции;  
 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$  – мгновенные сопротивления тяговой сети;  $r_{тс}$  – сопротивление  
 тяговой сети;  $r_i$  – сопротивление  $i$ -го поезда;  $I_i$  – ток  $i$ -го поезда;  $L$  –  
 расстояние между тяговыми подстанциями;  $x_i$  – дислокация  $i$ -го поезда между  
 ТП;  $y(t)$  – расстояние между тяговой подстанцией и  $i$ -м поездом

Рисунок 2.2 – Консольная схема питания контактной сети (а) и модель СТЭ (б)

При консольной схеме питания и одном поезде между ТП потери мощности в тяговой сети определяются по формуле [16, 81]

$$\Delta P(t) = r_0 \cdot y(t) \cdot I_{\phi}^2(t), \quad (2.1)$$

где  $r_0$  – удельное сопротивление контактной сети, Ом/км;

$y(t)$  – расстояние от шин ТП до нагрузки от  $i$ -го поезда, км;

$I_{\phi}$  – ток фидера, А.

Для консольной схемы питания мгновенное сопротивление за время движения поезда между ТП определяется по формуле [16, 81]

$$r(t) = r_0 \cdot y(t). \quad (2.2)$$

В свою очередь  $y(t) = \frac{L}{T} \cdot t$ , где  $L$  – расстояние между ТП, км,  $T$  – время движения поезда между ТП, ч.

На рис. 2.3 представлена модель СТЭ для двухсторонней схемы питания с несколькими нагрузками (два поезда между ТП). Потери мощности для двусторонней схемы питания в общем виде определяются суммой произведения квадратов токов фидеров на соответствующее сопротивление тяговой сети [16, 81]:

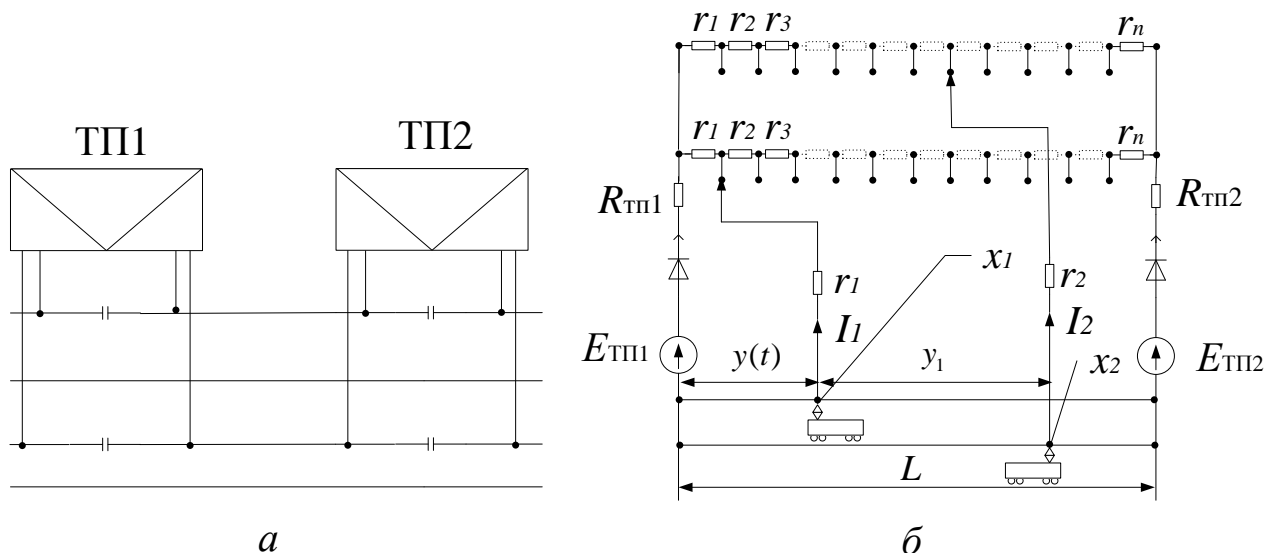
$$\begin{aligned} \Delta P(t) &= r_0 y(t) \left( I(t) \frac{L - y(t)}{L} \right)^2 + r_0 (L - y(t)) \left( I(t) \frac{y(t)}{L} \right)^2 = \\ &= r_0 \cdot I^2(t) \left[ y(t) \frac{(L - y(t))^2}{L^2} + (L - y(t)) \frac{y(t)^2}{L^2} \right], \end{aligned} \quad (2.3)$$

где  $I(t)$  – ток поезда в данный момент времени, А.

Мгновенное сопротивление для каждого фидера ТП для отдельной схемы питания контактной сети определяется по формулам [16, 81]

$$r_{\phi 1}(t) = \frac{r_0 I(t)^2 \frac{y(t)(L - y(t))^2}{L^2}}{I(t)^2 \frac{(L - y(t))^2}{L^2}} = r_0 y(t), \quad (2.4)$$

$$r_{\phi 2}(t) = \frac{r_0 I(t)^2 \frac{(L - y(t))y(t)^2}{L^2}}{I(t)^2 \frac{y(t)^2}{L^2}} = r_0 [L - y(t)]. \quad (2.5)$$



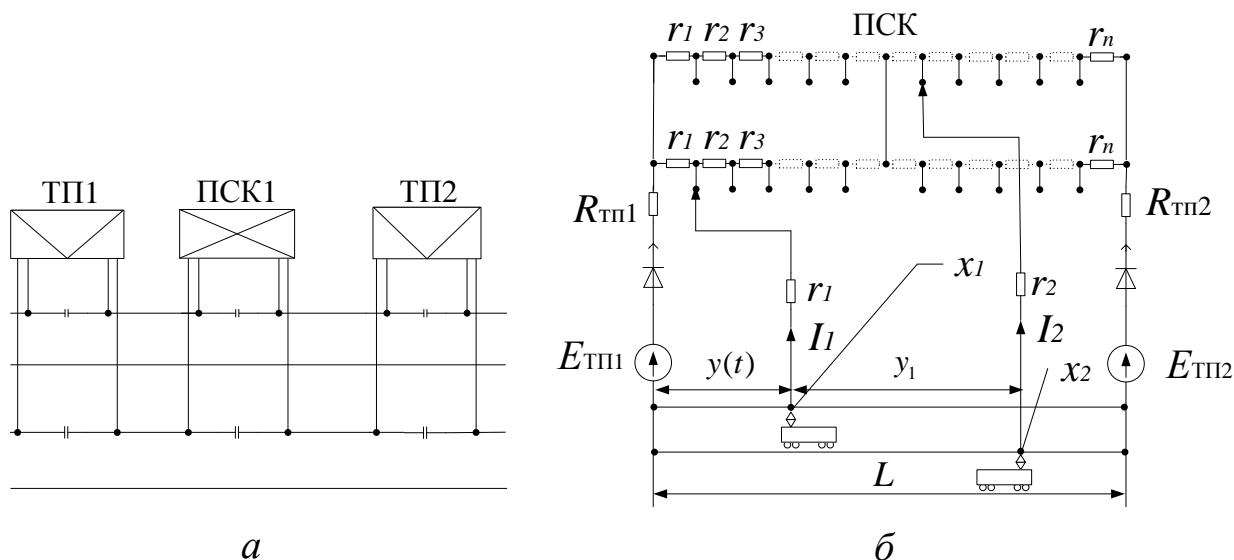
$R_{\text{ТП}}$  – сопротивление тяговой подстанции;  $E_{\text{ТП}}$  – ЭДС тяговой подстанции;  
 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$  – мгновенные сопротивления тяговой сети;  $r_1, r_2$  – сопротивления поездов;  
 $I_1, I_2$  – токи поездов;  $L$  – расстояние между тяговыми подстанциями;  
 $x_1, x_2$  – дислокация поездов между ТП;  $y(t)$  – расстояние между тяговой подстанцией и  $i$ -м поездом

Рисунок 2.3 – Двусторонняя схема питания контактной сети (а) и модель СТЭ (б)

Наиболее распространенными для нормального режима работы СТЭ являются узловая (рис. 2.4) и параллельная (рис. 2.5) схемы питания, которые имеют более сложные зависимости распределения токов между фидерами ТП.

При таких схемах питания контактной сети необходимо рассматривать варианты расположения поездов перед ПСК и после него. В общем виде потери мощности для узловой схемы питания определяются по формуле [16, 81]:

$$\Delta P(t) = r_0 I^2 \cdot \begin{cases} \left(1 - \frac{3y(t)}{2L}\right)^2 y(t) + \left(\frac{3y(t)}{2L}\right)^2 \left(\frac{L}{2} - y(t)\right) + 3\left(\frac{y(t)}{2L}\right)^2 \cdot \frac{L}{2} & \text{при } 0 \leq y \leq \frac{L}{2} \\ \frac{3}{4}\left(1 - \frac{y(t)}{L}\right)^2 \frac{L}{2} + \frac{9}{4}\left(1 - \frac{y(t)}{L}\right)^2 \left(y(t) - \frac{L}{2}\right) + \left(\frac{3y(t)}{2L} - \frac{1}{2}\right)^2 (L - y(t)) & \text{при } \frac{L}{2} \leq y \leq L. \end{cases} \quad (2.6)$$



$R_{ТП}$  – сопротивление тяговой подстанции;  $E_{ТП}$  – ЭДС тяговой

подстанции;  $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$  – мгновенные сопротивления тяговой сети;  $r_1, r_2$  – сопротивления поездов;  $I_1, I_2$  – токи поездов;  $L$  – расстояние между тяговыми подстанциями;  $x_1, x_2$  – дислокация поездов между ТП;  $y(t)$  – расстояние между тяговой подстанцией и  $i$ -м поездом;  $y_1$  – расстояние между поездами

Рисунок 2.4 – Узловая схема питания контактной сети (а) и модель СТЭ (б)

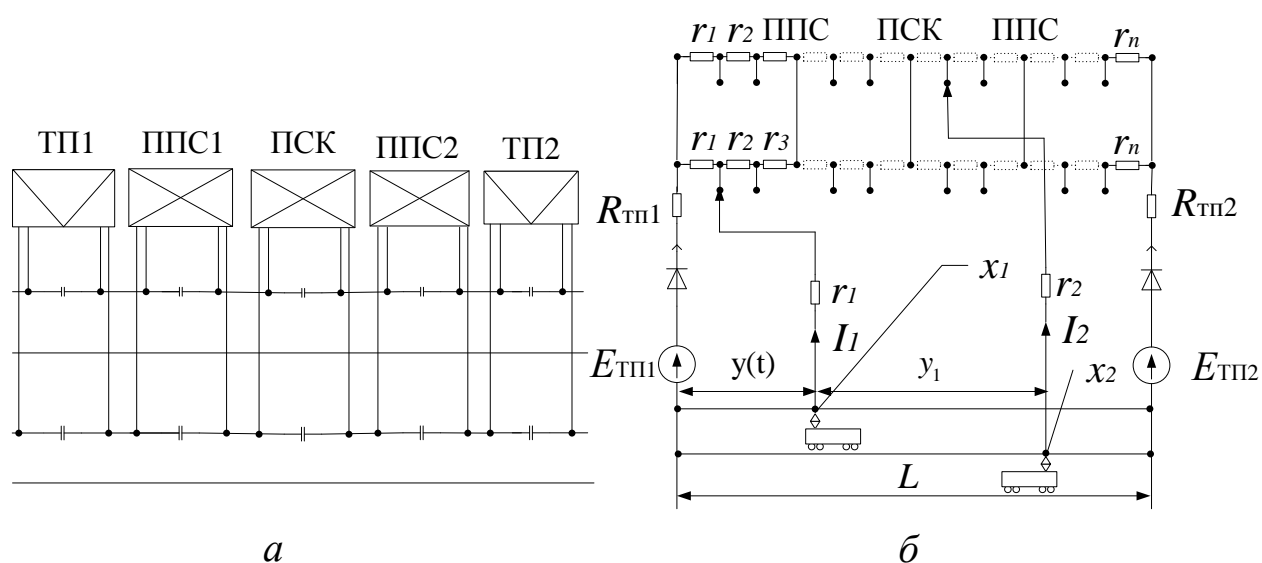
В общем виде потери мощности для параллельной схемы питания определяются по формуле [16, 81]

$$\Delta P(t) = r_0 I^2 \cdot \begin{cases} y(t) \left( L - \frac{y(t)}{2L} - \frac{y(t)}{2l_{П1}} \right), & 0 \leq y(t) \leq l_{П1}; \\ \frac{(l_{П1} - l_C - L) y(t)^2 + 2 \cdot L \cdot l_C \cdot y(t) - L \cdot l_C \cdot l_{П1}}{2 \cdot L \cdot (l_C - l_{П1})}, & l_{П1} \leq y(t) \leq l_C; \\ \frac{(L - l_C + l_{П2}) y(t)^2 - 2 \cdot L \cdot l_{П2} \cdot y(t) + L \cdot l_C \cdot l_{П2}}{2 \cdot L \cdot (l_C - l_{П2})}, & l_C \leq y(t) \leq l_{П2}; \\ \frac{(L - y(t))(2 \cdot L \cdot y(t) - l_{П2} \cdot y(t) - L \cdot l_{П2})}{2 \cdot L \cdot (l_C - l_{П2})}, & l_{П2} \leq y(t) \leq L. \end{cases} \quad (2.7)$$

где  $l_C$  – расстояние от ТП1 до ПСК;

$l_{П1}$  – расстояние от ТП1 до ППС1;

$l_{П2}$  – расстояние от ТП1 до ППС2.



$R_{ТП}$  – сопротивление тяговой подстанции;  $E_{ТП}$  – ЭДС тяговой подстанции;  
 $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$  – мгновенные сопротивления тяговой сети;  $r_1, r_2$  – сопротивления поездов;  $I_1, I_2$  – токи поездов;  $L$  – расстояние между тяговыми подстанциями;  
 $x_1, x_2$  – дислокация поездов между ТП;  $y(t)$  – расстояние между тяговой подстанцией и  $i$ -м поездом

Рисунок 2.5 – Параллельная схема питания контактной сети (а) и модель СТЭ (б)

Рассмотренные модели СТЭ позволяют определять потери электроэнергии в тяговой сети с учетом дислокации тяговых нагрузок между ТП.

## 2.2 Модель транспортного потока

Транспортный поток поездов определяет нагрузку СТЭ. От его показателей зависит необходимая мощность энергосистемы железнодорожного транспорта, технология работы станций, депо, участков, расчет плана

формирования и ГДП. Рациональное регулирование транспортного потока позволит уменьшить потери электроэнергии в тяговой сети постоянного тока.

Значение и пределы изменения тяговых нагрузок на электрифицированных участках зависят от таких показателей транспортного потока, как интенсивность – число поездов, пропущенных в единицу времени, плотность – количество поездов на единицу длины, интервалов между поездами, неравномерности движения поездов. Существенное влияние на СТЭ имеет масса поездов, сочетания массы поездов различных категорий, а на двухпутных участках — сочетание поездов (по числу и по массе) на обоих направлениях и, как следствие, изменение характера тяговой нагрузки. Данные факторы имеют случайный характер, и при исследовании закономерностей их изменения необходимо использовать методы теории вероятностей и случайных процессов.

В работе [122] выделены основные группы параметров, определяющих течение транспортного потока и характеризующих состояние в любой момент времени. Рассмотрим данные группы параметров применительно к задаче уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет регулирования транспортного потока:

- входные параметры  $X_i^{(0)} (i=1, \dots, n)$ , значения которых могут быть измерены, но возможность воздействия на них отсутствует (размеры движения, порядок прибытия поездов);
- управляющие параметры  $U_i (i=1, \dots, n)$ , на которые можно оказывать прямое воздействие в соответствии с теми или иными требованиями, что позволяет управлять процессом (интервалы между поездами, дислокация, ранжирование поездов);
- возмущающие параметры  $V_i (i=1, \dots, n)$ , значения которых случайным образом изменяются с течением времени и которые

недоступны для измерения (квалификация машинистов, погодные условия, ограничения скорости и т.д.);

- выходные параметры  $X_i^{(n)} (i=1, \dots, n)$ , величины которых определяются режимом процесса и которые характеризуют его состояние, возникающее в результате суммарного воздействия входных, управляющих и возмущающих параметров (размеры движения, порядок отправления поездов).

Рассмотрим ж.д. станцию как трансформатор транспортного потока, модель которого представлена на рис. 2.6.

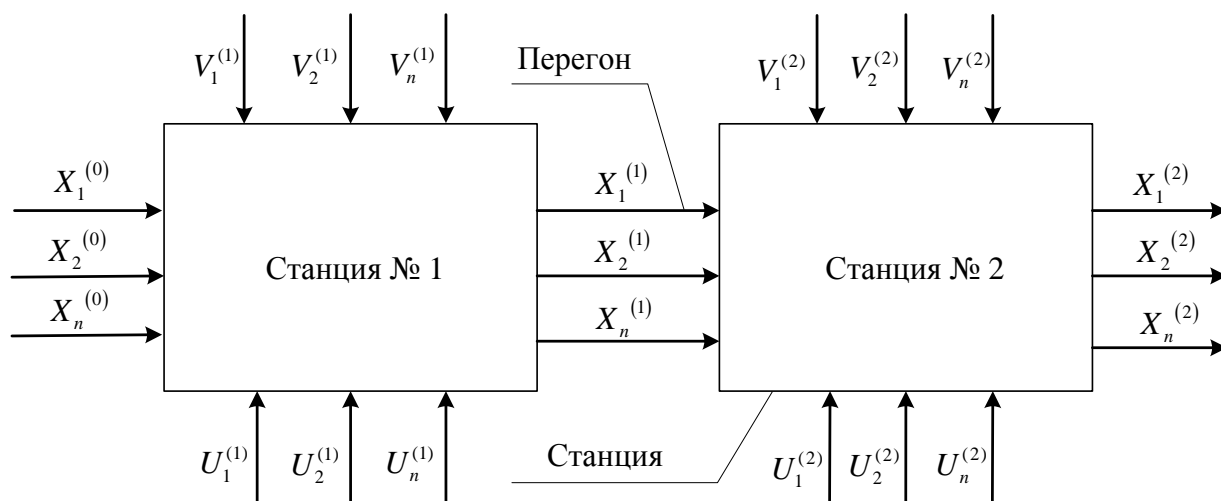


Рисунок 2.6 – Модель транспортного потока

Изменение параметров потока под воздействием таких операций, как прием поездов на станцию, их обработка, расформирование, образование новых составов, окончание формирования, подготовка к отправлению, отправление, т.е. под воздействием фаз обслуживания потока, принято называть трансформацией потока [94]. Если поток прошел через  $k$  фаз, то с потоком произошла  $k$ -кратная трансформация. В выражении (2.8) число трансформаций обозначается индексом  $j$ . Трансформация потока может приводить к существенным изменениям его параметров. Положив для исходного потока

$j = 0$  и обозначив трансформацию потока на фазе его обработки  $\rightarrow$ , последовательность видоизменений параметров потока запишем в виде

$$\begin{aligned}
 N_0 &= N_0 \{(\tau_0, \lambda_0, J_0, n_0, k_{n0}, l_0, L'_0 \dots)\} \rightarrow \\
 &\rightarrow N_1 = N_1 \{(\tau_1, \lambda_1, J_1, n_0, k_{n1}, l_1, L'_1 \dots)\} \rightarrow \\
 &\rightarrow N_2 = N_2 \{(\tau_2, \lambda_2, J_2, n_2, k_{n2}, l_2, L'_2 \dots)\} \rightarrow \\
 &\rightarrow N_j = N_j \{(\tau_j, \lambda_j, J_j, n_j, k_{nj}, l_j, L'_j \dots)\}.
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

где  $\tau$  – интенсивность транспортного потока;

$\lambda$  – плотность транспортного потока;

$J$  – интервалы между поездами;

$n$  – количество поездов между ТП;

$k_n$  – коэффициент неравномерности движения поездов;

$l$  – расстояние между поездами;

$L'$  – последовательность отправления поездов.

При этом на регулирование транспортного потока и изменение его параметров накладываются ограничения, регламентируемые нормативными документами [135, 136]:

$$T \leq T_{\text{норм}}, \tag{2.9}$$

где  $T$ ,  $T_{\text{норм}}$  – соответственно фактический и нормативные сроки доставки грузов.

От параметров транспортного потока зависит напряжение на шинах ТП и на токоприемнике ЭПС:

$$U_{\text{эпс}}^{\min} \leq U_{\text{эпс}} \leq U_{\text{эпс}}^{\max}, \tag{2.10}$$

где  $U_{\text{эпс}}$ ,  $U_{\text{эпс}}^{\min}$ ,  $U_{\text{эпс}}^{\max}$  – фактический и нормативные уровни напряжения на токоприемнике ЭПС;

$$U_{\text{тп}}^{\min} \leq U_{\text{тп}} \leq U_{\text{тп}}^{\max}, \tag{2.11}$$

где  $U_{\text{ТП}}$ ,  $U_{\text{ТП}}^{\min}$ ,  $U_{\text{ТП}}^{\max}$  – фактический и нормативные уровни напряжения на шинах ТП.

На украинских ж.д. уровень напряжения на токоприемнике ЭПС должен быть не менее 2,7 кВ и не более 4 кВ при постоянном токе [135]. Для интеграции в европейское пространство, развития транзитных перевозок и повышения уровня интероперабельности (эксплуатационной совместимости) необходимо учитывать европейские требования к уровню напряжения на токоприемнике ЭПС и шинах ТП. В настоящее время, согласно директивам ЕС, электрифицированные линии разделяются на интероперабельные и неинтероперабельные.

Рассмотрим требования к уровню напряжения на токоприемнике ЭПС и шинах ТП, предъявляемые к неинтероперабельным линиям постоянного тока (рис. 2.7):

- минимальное напряжение на пантографе ЭПС не может быть меньше 2 000 В без ограничений по времени ( $U_{\min 1}$ );
- продолжительность периода времени при напряжении на пантографе ЭПС 3 600-3 900 В не должно превышать 5 мин;
- в нормальных условиях эксплуатации напряжение на пантографе ЭПС должно быть в пределах 2 600-3 900 В;
- напряжение на шинах ТП при отсутствии нагрузки от ЭПС должно быть не более 3 600 В ( $U_{\max 1}$ );
- допускается увеличение напряжения на шинах ТП при отсутствии нагрузки от ЭПС не более 3 900 В в течение 5 мин ( $U_{\max 2}$ ), и не более 5 075 В ( $U_{\max 3}$ ) в течение 20 мс при условии, что в случае появления ЭПС, напряжение на его пантографе снизится до 3 600 В.

Интероперабельные электрифицированные линии постоянного тока должны соответствовать всем требованиям, предъявляемым к

неинтероперабельным линиям, и дополнительным требованиям к уровню напряжения на токоприемнике ЭПС и шинах ТП (рис. 2.8):

- минимальное напряжение на пантографе ЭПС не может быть меньше 2 000 В без ограничений по времени ( $U_{\min 1}$ );
- допускается снижение напряжения на пантографе ЭПС в течение 10 мин до 1 800 В ( $U_{\min 2}$ );
- допускается увеличение напряжения на пантографе ЭПС в течение 2 с до 4 050 В ( $U_{\max 3}$ ), в течении 20 мс до 5075 В ( $U_{\max 4}$ ), в течение 1 мс до 14 кВ ( $U_{\max 5}$ ).

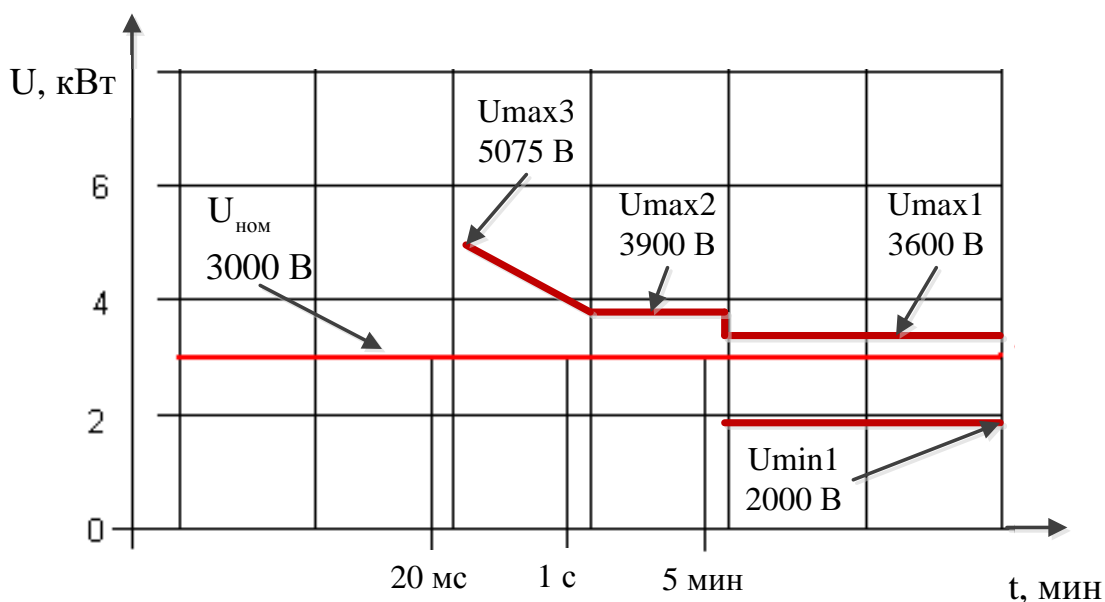


Рисунок 2.7 – Требования к неинтероперабельным линиям постоянного тока

Параметры потока под воздействием трансформации могут в значительной степени отличаться от параметров исходного потока. Воздействие этапов обработки потока может снижать или повышать его неравномерность, воздействия на различных фазах могут взаимно компенсироваться, погашаться или наоборот усиливаться. Поэтому для решения задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет регулирования транспортного потока необходимо исследовать закономерности и пределы изменения его показателей.

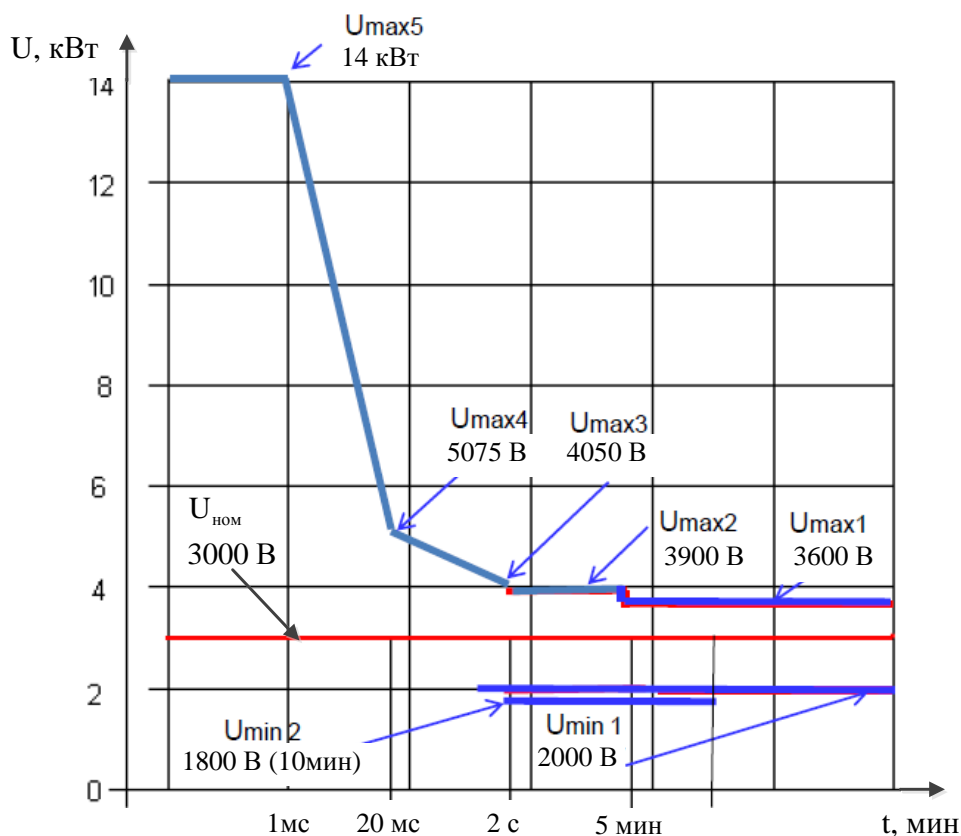


Рисунок 2.8 – Требования к интероперабельным линиям постоянного тока

Максимальные показатели транспортного потока ограничиваются наличной пропускной способностью участка  $n_{\text{н}}$  – 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 [134]. Все величины, входящие в формулы определения пропускной способности, считаются постоянными. Например, пропускная способность на двухпутных линиях:

$$n = \frac{(1440 - t_{\text{техн}}) \alpha_{\text{н}}}{J_{\text{п}}}, \quad (2.12)$$

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;

$\alpha_n$  – коэффициент, учитывающий влияние отказов в работе технических устройств на наличную пропускную способность перегонов;

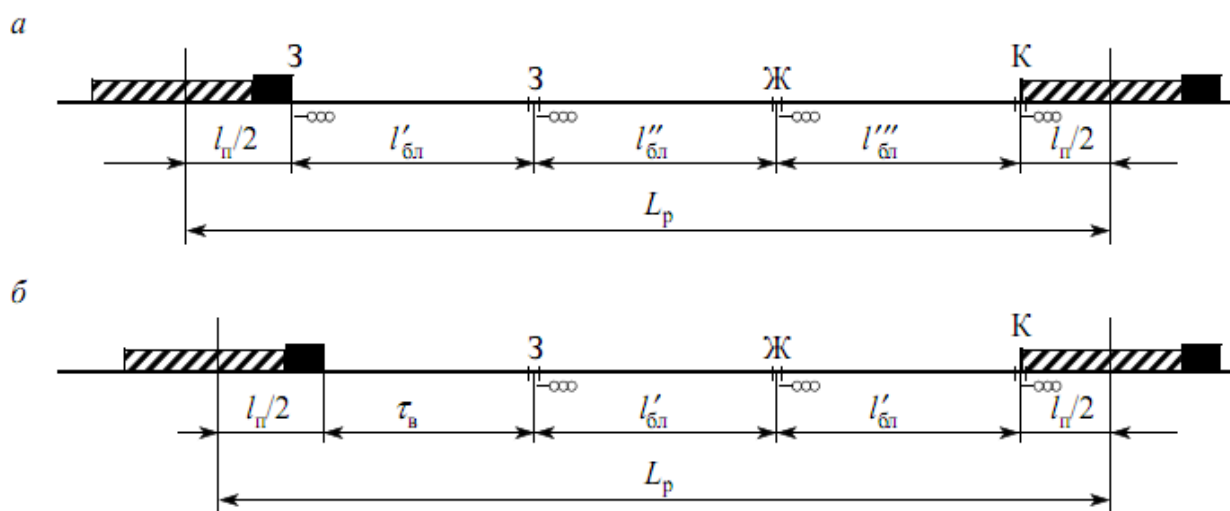
$J_p$  – расчетный межпоездной интервал, мин.

В следующих пунктах данного раздела проведен анализ пределов изменения показателей транспортного потока.

### 2.2.1 Закономерности изменения интенсивности движения поездов и интервалов между поездами

Вследствие неравномерности движения поездов фактические размеры движения не всегда превышают пропускную способность участка. В ГДП появляется резерв свободного времени, которое дает возможность регулирования межпоездного интервала в определенных пределах. Рассмотрим, в каких пределах можно регулировать межпоездной интервал.

Магистральные электрифицированные линии, как правило, оборудованы автоблокировкой с трехзначной сигнализацией, при которой возможны два режима езды: на зеленый сигнал (нормальный режим движения) и под зеленый на желтый сигнал (рис. 2.9).



*a* – при езде на зеленый сигнал; *б* – при езде на желтый сигнал

Рисунок 2.9 – Минимальные расстояния между попутными поездами на участках, оборудованных автоблокировкой

Наименьшая величина интервала между поездами в пакете должна обеспечивать следование поездов без снижения скорости движения [135]. Исходя из этого, минимальный интервал  $J_{\min}$  между поездами в пакете определяется по следующим формулам:

при езде на зеленый сигнал:

$$J_{\min} = 0,06 \frac{L_p}{V_x} = 0,06 \frac{l'_{\text{бл}} + l''_{\text{бл}} + l'''_{\text{бл}} + l_{\text{п}}}{V_x}, \quad (2.13)$$

при езде на желтый сигнал:

$$J_{\min} = 0,06 \frac{2l_{\text{бл}} + l_{\text{п}}}{v} + t_{\text{п}}, \quad (2.14)$$

где 0,06 – коэффициент для перевода размерности скорости в метры за мин;

$L_p$  – расчетное расстояние, м;

$V_x$  – средняя ходовая скорость на рассматриваемой части перегона, км/ч;

$l'_{\text{бл}} + l''_{\text{бл}} + l'''_{\text{бл}}$  – длина первого, второго и третьего блок-участков соответственно, м (если они равны, то в числителе можно принять  $3l_{\text{бл}}$ );

$l_{\text{п}}$  – длина поезда, м;

$t_{\text{п}}$  – время на восприятие машинистом изменения показания сигнала, которое при расчетах можно принять равным 0,5 мин. В числителе приведенных формул даны выражения минимального расстояния между центрами тяжести или головами двух поездов попутного следования, имеющих одинаковые скорости движения.

По условиям надежности работы рельсовых цепей длина блок-участка  $l_{\text{бл}}$  не должна превышать 3 км и согласно [135] должна быть не менее 1000 м. В соответствии с этим при полезной длине станционных путей, например 1050 м, и наименьшей длине блок-участка (1 000 м) величина расчетного интервала при трехблочном разграничении поездов выражается формулой:

$$J = 0,06 \frac{1000 \cdot 3 + 1000}{v} = \frac{240}{v} \text{ мин.}, \quad (2.15)$$

а при наибольшей длине блок-участка (3000 м):

$$J = 0,06 \frac{3000 \cdot 3 + 1000}{v} = \frac{600}{v} \text{ мин.} \quad (2.16)$$

Таким образом, для определенной величины расчетного интервала  $J$  значение его находится в границах ходовой скорости:

$$v = \frac{240}{J_p} \div v = \frac{600}{J_p}. \quad (2.17)$$

Минимальное значение интервала между поездами по условиям работы СТЭ рассчитывается с учетом ограничений [101]:

- мощность оборудования ТП;
- нагревание проводов контактной подвески;
- напряжение на токоприемнике ЭПС.

Объединив выражения для расчета минимального допустимого межпоездного интервала, можно записать условие [30]:

$$j = \min(j_p, j_I, j_U), \quad (2.18)$$

$$\text{где } j_p = t_{x1} \frac{\sum_{f \in F} I_{\phi f} \frac{N_f}{\sum_{f \in F} N_f}}{I_{\text{ЭТП}}}, \quad (2.19)$$

$$j_I = t_{x2} \cdot I_{\phi f} / (I_{df} - K_{\alpha} I_{\phi f}), \quad (2.20)$$

$$j_U = t_{x3} \frac{I_{\Pi 1} (r_1 + r_2) + I_{\Pi 2} \cdot r_3}{U_{\text{ХХ}} - \rho \cdot I_{\text{ПСТ}} - U_{\text{доп}} + I_{\Pi} \cdot r_2}, \quad (2.21)$$

где  $j_P, j_I, j_U$  – межпоездные интервалы по допустимым нагрузкам силового оборудования ТП, по нагреву проводов контактной подвески и по напряжению на токоприемниках ЭПС соответственно;

$t_{x1}, t_{x2}, t_{x3}$  – время хода поезда по зоне питания ТП, зоне питания фидера и МЗ соответственно;

$I_{\phi f}$  – ток фидера;

$F$  – количество фидеров ТП;

$N_f$  – число поездов в сутки на пути, питаемом фидером  $f$ ;

$I_{\text{ЭТП}}$  – эффективный ток ТП;

$I_{df}$  – длительно допустимый ток контактной подвески;

$K_\alpha$  – коэффициент, учитывающий неравномерность потребления тока поездами;

$U_{\text{доп}}$  – минимальный допустимый уровень напряжения в КС;

$r_1, r_2, r_3$  – сопротивление тяговой сети при расчете потери напряжения соответственно: от тока поезда, находящегося на расчетном расстоянии, от токов остальных поездов, находящихся на том же пути, и от токов поездов на соседних путях участка, имеющего поперечные соединения контактных подвесок путей;

$U_{\text{ХХ}}$  – напряжение холостого хода на шинах ТП;

$\rho$  – внутреннее сопротивление ТП;

$I_{\text{П1}}, I_{\text{П2}}$  – средний ток поезда на МЗ 1-го и 2-го пути соответственно;

$I_{\text{ПСТ}}$  – средний ток ТП.

Закон распределения интервалов между поездами содержит информацию об интенсивности движения, численно равной обратной величине среднего межпоездного интервала. На основе закона распределения межпоездных интервалов можно найти закон распределения интенсивности движения. Межпоездные интервалы времени и скорость движения как непрерывные

случайные величины характеризуются соответствующими интегральными и дифференциальными функциями распределения.

Для исследования показателей транспортного потока проведен анализ ГДП Чаплинского участка Приднепровской железной дороги [123]. Схема исследуемого участка представлена на рис. 2.10. Анализ показателей транспортного потока проводился на входе участка: для нечетных поездов – по ст. «Чаплино», для четных поездов – по ст. «Блок-пост 239км».

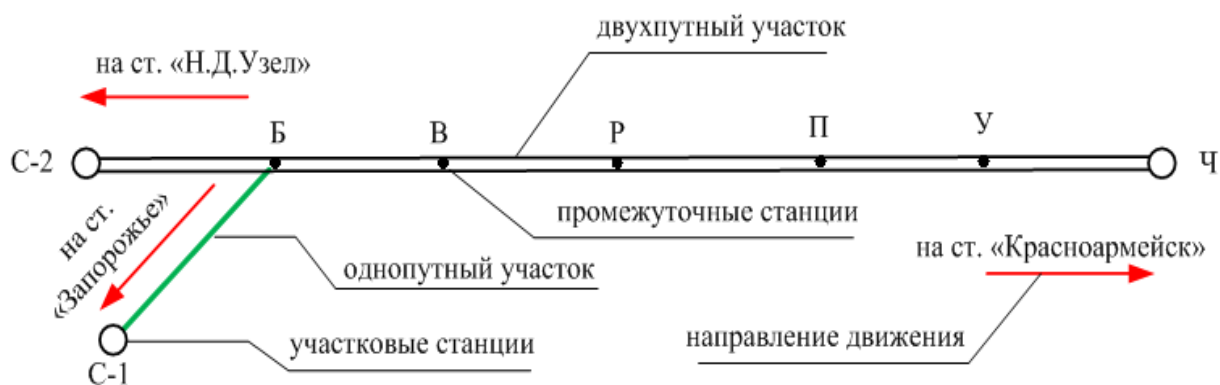
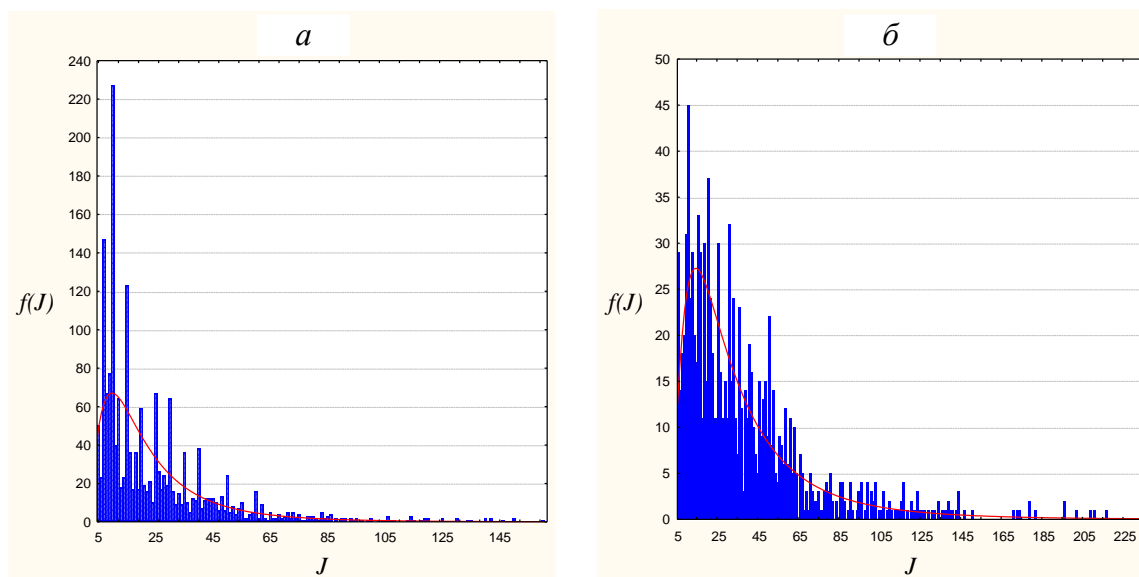


Рисунок 2.10 – Схема Чаплинского участка Приднепровской железной дороги

График движения характеризует процесс изменения по времени интервалов между следующими друг за другом поездами. Пространственное распределение интервалов между поездами является одновременным фиксированием их расположения на участке (вертикальное сечение исполненного ГДП). Распределение временных интервалов между поездами определялось в поперечнике (горизонтальное сечение исполненного ГДП). В процессе исследования было установлено, что распределение интервалов  $J$  подчиняется логнормальному закону, возможные значения интервалов находятся в пределах  $j_{\min} \leq j \leq \infty$ . На рис. 2.11 приведены гистограммы распределения интервалов между поездами. Расчеты выполнены в пакете программ Statistica, исходные данные приведены в прил. А.



*a* – нечетное направление; *б* – четное направление

Рисунок 2.11 – Гистограммы распределения интервалов между поездами для Чаплинского участка Приднепровской железной дороги

В работе [124] определена максимальная интенсивность транспортного потока, лимитирующая пропускную способность данного участка по условиям электроснабжения, которая составляет 7,68 поезда/час.

### 2.2.2 Закономерности изменения плотности и массы поездов

Пространственной характеристикой транспортного потока является его плотность – число поездов, приходящееся на единицу длины линии. На железнодорожном участке в каждый момент времени будет находиться  $N_i$  поездов. Таким образом, плотность потока на момент  $t_i$  [35, 94]:

$$\lambda = \frac{N_i(t_i)}{l}, i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (2.22)$$

где  $l$  – длина участка, км.

Поскольку на каждый момент времени  $t_i$  поезда на участке распределены неравномерно, с изменением  $i$  изменяется и плотность  $\lambda(t_i)$ . Поэтому рассчитывают среднюю плотность на некотором временном интервале:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda(t_i)}{n}. \quad (2.23)$$

Повышение массы поездов, интенсификация технологий является прогрессивным направлением развития железнодорожного транспорта особенно для грузонапряженных линий. Например, если участок пропускает в среднем за сутки 57 грузовых поездов со средней массой 3134 т с интенсивностью 2,38 поезда в час со средним интервалом между грузовыми поездами 25,3 мин, при росте массы поезда до 4 500 т число грузовых поездов  $N$  уменьшится до 40 поездов:

$$N = \frac{57 \cdot 3134}{4500} = 40, \quad (2.24)$$

а средний интервал увеличится до 36 мин.

Увеличение массы поезда уменьшает интенсивность транспортного потока. В данном случае средняя интенсивность транспортного потока уменьшилась с 2,38 поезда в час до 1,67 при одной и той же массе перевезенного груза. Увеличение массы и длины поездов сокращает также плотность транспортного потока. В данном случае при длине участка 73 км, массе поезда 3 134 т и участковой скорости 40 км/ч, плотность потока составит:

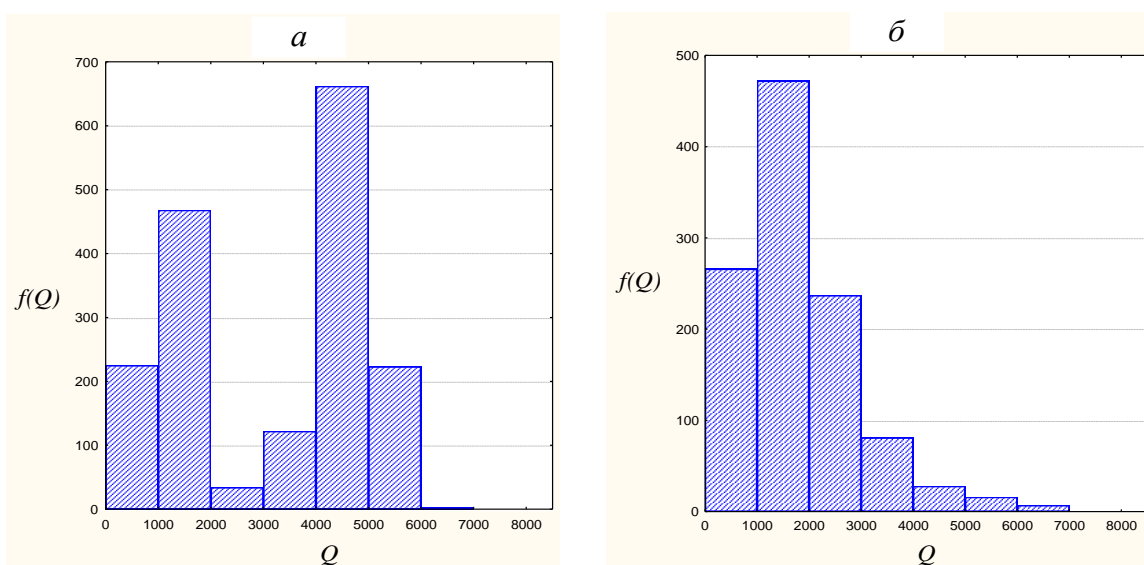
$$\lambda_{3134T} = \frac{(73 / 40) \cdot 2,38}{73} = 0,06 \text{ поезда/км}, \quad (2.25)$$

то есть на каждых 100 км линии в среднем приходится 6 одновременно находящихся на участке поездов. При массе поезда 4 500 т и тех же исходных данных плотность транспортного потока составит:

$$\lambda_{4500T} = \frac{(73 / 40) \cdot 1,67}{73} = 0,04 \text{ поезда/км}, \quad (2.26)$$

то есть на каждых 100 км линии – 4 одновременно находящихся на участке поезда. Это создает лучшие условия для уменьшения влияния поездов друг на друга в процессе движения, повышения надежности их пропуска и

улучшения управления транспортным потоком на участках. Сочетание массы разных поездов, ее распределение непосредственно влияет и на энергосистему железной дороги. На рис. 2.12 представлена гистограмма распределения массы поездов. Расчеты выполнены в пакете программ Statistica, исходные данные приведены в прил. А.



*а* – нечетное направление; *б* – четное направление

Рисунок 2.12 – Гистограммы распределения массы поездов для Чаплинского участка Приднепровской железной дороги

В работе [124] определена максимальная плотность транспортного потока, лимитирующая пропускную способность Чаплинского участка Приднепровской ж.д. по условиям электроснабжения, которая составляет 0,128 поездов/км. При данном значении плотности транспортного потока реализуется максимальная интенсивность движения на участке.

### 2.2.3 Закономерности изменения неравномерности движения поездов

Развитие транспортных систем связано с определением перспективных нагрузок – прогнозированием транспортных потоков. В случае, если неизвестен закон распределения транспортного потока, при его расчете используется коэффициент неравномерности  $K_n$ :

$$K_{\text{н}} = \frac{N_{\text{max}}}{N}, \quad (2.27)$$

где  $N_{\text{max}}$  – максимальное число транспортных единиц (поездов, вагонов), которое должно быть пропущено за расчетный период, как правило, сутки;

$N$  – среднее число транспортных единиц за этот же период.

Коэффициент неравномерности может рассчитываться за год (внутригодовая неравномерность), за месяц (внутримесячная неравномерность) и другие периоды. Например, внутригодовой коэффициент неравномерности:

$$K_{\text{нг}} = \frac{N_{\text{max}}}{N}, \quad (2.28)$$

где  $N_{\text{max}}$  – размеры движения максимального (по объему перевозок) месяца года.

За прошедший (ретроспективный) период времени размеры движения рассчитываются по статистическим (учетным) данным. Труднее определить объемы работы на перспективные периоды (5, 10, 15, 20 лет). Для этого используются различные методы прогнозирования, научно обоснованные вероятностные оценки возможных значений транспортного потока.

Причины возникновения неравномерности, исследованные в работах [31, 34, 128-130], разделяются по 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 струй 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).

Все вместе взятые причины неравномерности движения определяют одно из свойств транспортного потока – неопределенность. Также основными свойствами транспортного потока являются конечность и пространственно-временное состояние. Конечность характеризуется одномерностью длин поездов и железнодорожных линий, которая проявляется при их взаимодействии, например, при возникновении препятствий движению и скоплении поездов на участках. Скорость движения поездов также является конечной величиной. Она зависит как от характеристик участков, так и от различных категорий поездов. Скорость движения впереди идущего поезда определяет режимы движения поездов, следующих за ним. Исследования, в которых условие конечности игнорируется, нельзя считать достаточно приближенными к реальности. Особенно важно это учитывать при моделировании движения поездов.

В работе [101] потери мощности в тяговой сети  $\Delta P$  предложено определять по аналитическим формулам. Для двухстороннего питания фидерной зоны

$$\Delta P = \frac{rI_0^2 n_0^2}{12} \left( k_{\text{сп}}^2 + \frac{2k_{\text{эс}}^2 - 1}{n_0} \right), \quad (2.29)$$

где  $r$  – сопротивление 1 км тяговой сети, ом;

$l$  – расстояние между ТП, км;

$I_0$  – средний ток одного поезда;

$n_0$  – среднее количество поездов между ТП;

$k_{\text{сп}}$  – отношение коэффициентов  $k_{\text{эс}} / k_{\text{сп}}$  или  $k_{\text{эс}} / k_{\text{эт}}$ ;

$k_{\text{эс}}$  – 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;

$k_{э0}$  – коэффициент эффективности одного поезда.

При узловой схеме питания

$$\Delta P = \frac{r l l_0^2 n_0^2}{32} \left( k_{сн}^2 + \frac{4k_{э0}^2 - 1}{n_0} \right). \quad (2.30)$$

Как известно, при протекании колеблющейся нагрузки в проводах КС, а также в обмотках трансформаторов на ТП возникают потери энергии, которые определяются по среднеквадратичному (эффективному) току  $I_э$ , величина которого рассчитывается по формуле

$$I_э = \sqrt{\frac{\int_0^T i^2 dt}{T}}, \quad (2.31)$$

где  $i$  – мгновенное значение тока, а;

$T$  – период протекания тока.

Коэффициент эффективности  $k_э$  выражается следующим уравнением:

$$k_э = \frac{I_э}{I}, \quad (2.32)$$

где  $I$  – среднее значение тока за период  $T$ .

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

$$k_{э0} = 1,04 \sqrt{\frac{t}{t_m}}, \quad (2.33)$$

$$t = \frac{\sum \alpha_p A_p}{\sum \frac{\alpha_p A_p}{t_p}}, \quad (2.34)$$

где  $\alpha_p$  – 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.

$$\alpha_p = \frac{n_i}{n_{пр}}, \quad (2.35)$$

где  $n_i$  – количество поездов каждой категории;

$n_{пр}$  – приведенное количество поездов.

$$n_{пр} = \sum n_{гр} + \varepsilon' n_{пс} + \varepsilon'' n_{сб}, \quad (2.36)$$

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

$\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  – соответственно коэффициент съема пассажирского и сборного поездов.

$$t_m = \frac{\sum \alpha_p A_p}{\sum \frac{\alpha_p A_p}{t_{mp}}}, \quad (2.37)$$

где  $\alpha_p$  – доли поездов разных категорий;

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

$t_m$  – время хода поезда под током.

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

$$I_o = \frac{1}{Ul} \sum \alpha_p A_p v_p = \frac{1}{U} \sum \frac{\alpha_p A_p}{t_p}, \quad (2.38)$$

где  $l$  – 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.

Для исследования пределов изменения коэффициентов, характеризующих неравномерность движения поездов, проведен анализ ГДП на двухпутном участке Приднепровской железной дороги [133]. В ходе исследования установлены следующие значения:

$$k_{эс} = 1,09 \dots 1,3;$$

$$k_{ип} = 1,55 \dots 2,2;$$

$$k_{эт} = 1,005 \dots 1,18;$$

$$k_{эп} = 1,01 \dots 1,03;$$

$$k_{сп} = 1,08 \dots 1,26.$$

Проанализированы пределы изменения потерь мощности в тяговой сети МЗ постоянного тока при изменении коэффициента  $k_{сп}$ .

Исходные данные для расчета:

$r$ , Ом/км.....0,058

$l$ , км.....12

$I_0$ , А.....1360

$n_0$ ,.....2

$k_{эо}$ .....1,25

На рис. 2.13 представлен график изменения потерь мощности в тяговой сети на МЗ при двухстороннем питании и при узловом режиме питания. При принятых исходных данных потери мощности в тяговой сети на МЗ могут

изменяться на 18,9 % для схемы двухстороннего питания и на 11,1 % для узловой схемы питания в зависимости от величины коэффициента  $k_{сп}$ , который характеризует неравномерность транспортного потока на участке.

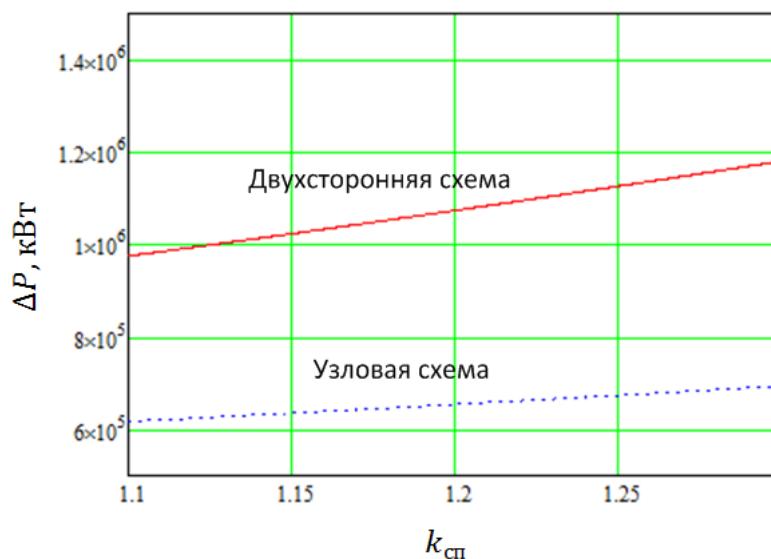


Рисунок 2.13 – Зависимость потерь мощности в тяговой сети на МЗ от коэффициента  $k_{сп}$

Таким образом, установлены зависимости изменения величины потерь мощности в тяговой сети от неравномерности транспортного потока.

### 2.3 Исследование возможностей уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок

На основе анализа существующих ГДП установлены факторы, влияющие на возможность регулирования показателей транспортного потока в целях уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети: неравномерность движения поездов, неполное заполнение пропускной способности участка, обгон грузовых поездов пассажирскими, выполнение работ по ремонту пути, контактной сети, «отказ» в работе различных устройств и т.д. С учетом данных

факторов принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети заключается в решении задачи построения энергоэффективных ГДП путем выбора рациональных: последовательности отправления поездов, дислокации и интервалов между тяговыми нагрузками (рис. 2.14).

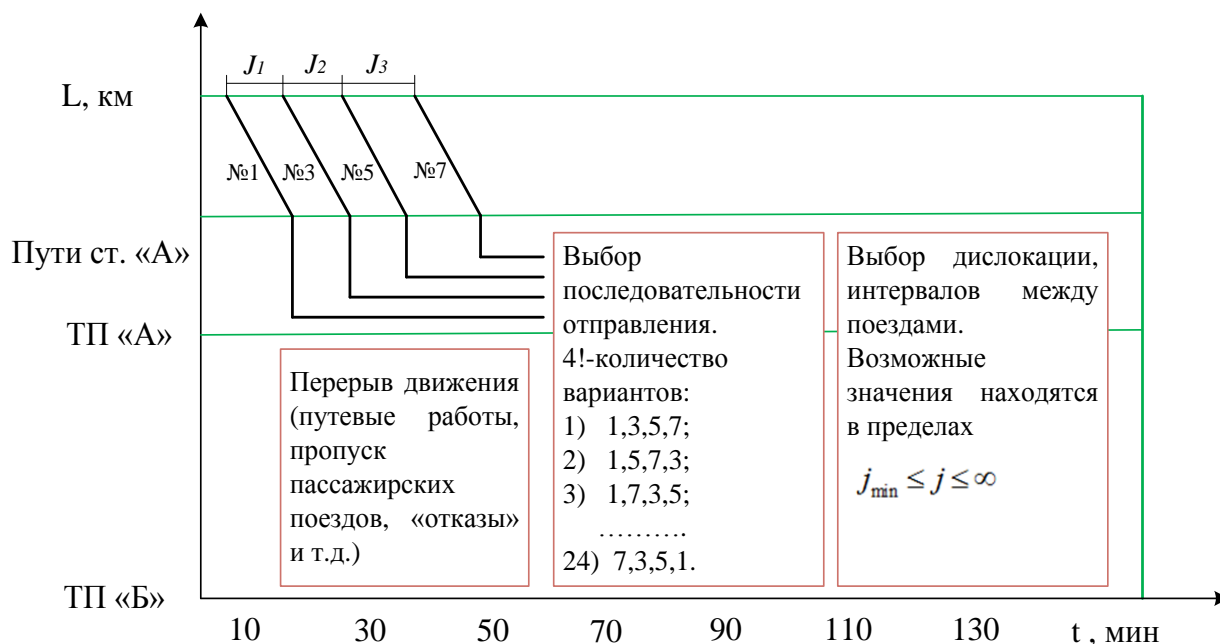


Рисунок 2.14 – Принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок

Для расчета потерь электроэнергии в тяговой сети рассмотрим один из существующих (исполненных) ГДП (рис. 2.15) на участке Приднепровской железной дороги со следующими исходными данными [91]:

- длина МЗ – 18 км;
- токи, потребляемые поездами  $I(S)$ ,  $S \in [S_n, S_k]$ ;
- скорости движения поездов  $V(S)$ ,  $S \in [S_n, S_k]$ ;
- показатели транспортного потока;
- удельное сопротивление тяговой сети  $r_0 = 0,07$  Ом/км;
- сечение проводов КС – 412 мм<sup>2</sup>;
- схема питания – узловая.

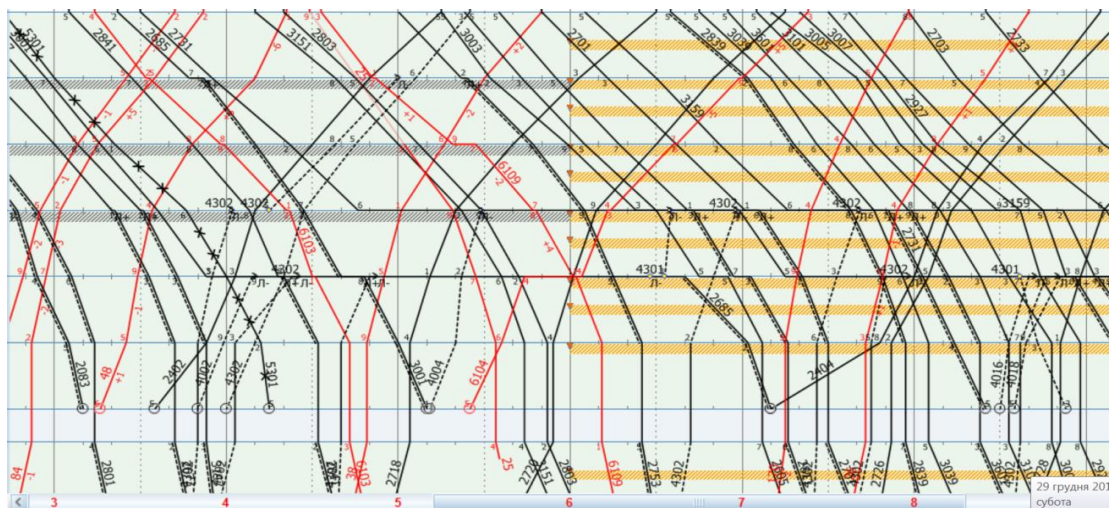


Рисунок 2.15 – Исполненный ГДП электрифицированного участка Приднепровской ж.д.

Применяя модель транспортного потока, методом имитационного моделирования определены потери мощности в тяговой сети для исполненного ГДП (исходный вариант) и энергооптимального ГДП. При этом принято допущение, что все поезда одинакового типа, масса брутто – 4 200 т. Результаты расчетов с учетом показателей транспортного потока представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Показатели транспортного потока и потери электроэнергии для исполненного ГДП

Показатели	Варианты		
	1	2	3
Межпоездной интервал $J$ , мин	6	8,6	15
Интенсивность $\tau$ , поездов/час	10	7	4
Плотность $\lambda$ , поездов/км	0,19	0,13	0,07
Коэффициент неравномерности $K$	1	1,4	2,5
Коэффициент использования пропускной способности $\gamma$		0,7	0,4
Потери электроэнергии $\Delta W$ , кВт·ч	1 338,1	1 040,7	454,85
Суммарные потери электроэнергии за время моделирования $\sum \Delta W$ , кВт·ч	2 833,65		

По приведенным данным потери энергии в тяговой сети варьируются в пределах 450...1340 кВт·ч. Значение потерь энергии в тяговой сети при пропуске 21 поезда за 3 часа составляет 2 833,6 кВт·ч.

В работах [32, 94, 95] для рационального управления транспортным потоком с учетом работы СТЭ даны рекомендации по уменьшению неравномерности движения. Для рассматриваемого примера с однотипными поездами, для уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети решение задачи сводится к применению равномерного ГДП с параметрами, представленными в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Показатели транспортного потока, при которых значение потерь электроэнергии в тяговой сети будет минимальным

Показатели	Варианты		
	1	2	3
Межпоездной интервал $J$ , мин	8,6		
Интенсивность $\tau$ , поездов/час	7		
Плотность $\lambda$ , поездов/км	0,13		
Коэффициент неравномерности $K$	1,4		
Коэффициент использования пропускной способности $\gamma$	0,7		
Потери электроэнергии $\Delta W$ , кВт·ч	736,6	925,7	925,7
Суммарные потери электроэнергии за время моделирования $\sum \Delta W$ , кВт·ч	2 588,1		

По результатам расчетов, представленных в табл. 2.2, значение потерь электроэнергии в тяговой сети при пропуске 21 поезда за 3 часа составило 2 588,1 кВт·ч, что на 8,7 % меньше исходного варианта (табл. 2.1).

На рис. 2.16 приведены зависимости мгновенных потерь мощности для рассмотренных вариантов пропуска поездов по участку. Максимальные значения потерь мощности составляют 2 814,4 и 1 337,2 кВт соответственно для каждого из вариантов.

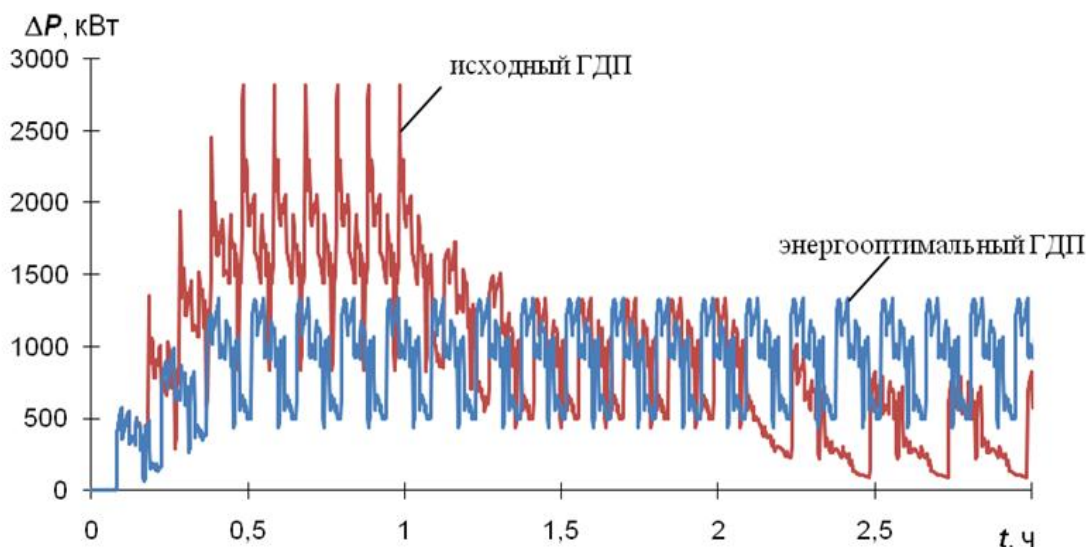


Рисунок 2.16 – Потери мощности в тяговой сети при различных ГДП

Таким образом, при управлении транспортным потоком необходимо регулировать его показатели в целях создания равномерной нагрузки на ТП и уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети.

### Выводы к разделу 2

1. С использованием разработанной модели СТЭ установлена возможность регулирования интервалов между поездами в целях уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети. В результате исследований, проведенных для Чаплинского участка Приднепровской ж.д., установлено, что величина потерь электроэнергии в тяговой сети изменяется в пределах от 2 588,1 до 2833,6 кВт·ч при изменении интервала между поездами в пределах от 6 до 15 мин, разница составляет 8,7 % от уровня потерь. Установлен потенциал уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем уменьшения неравномерности транспортного потока (для схемы двухстороннего питания величина потерь изменяется на 18,9 %; для узловой схемы питания на 11,1 %).
2. Разработанная модель транспортного потока позволяет установить пределы изменения его показателей. В данной модели ж.д. станция представлена как трансформатор транспортного потока, что дает

возможность при расчетах потерь электроэнергии в тяговой сети учитывать влияние показателей транспортного потока на величину потерь.

3. Установлены предельные показатели транспортного потока по условиям работы СТЭ. В результате исследований, проведенных для Чаплинского участка Приднепровской ж.д., определена максимальная интенсивность транспортного потока – 7,68 поезда/час, максимальная плотность транспортного потока – 0,128 поезда/км. Таким образом, при управлении транспортным потоком необходимо регулировать его показатели в целях создания равномерной нагрузки на ТП и уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети.

## РАЗДЕЛ 3

### НАУЧНЫЕ ПРИНЦИПЫ УМЕНЬШЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПУТЕМ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОЙ ДИСЛОКАЦИИ ТЯГОВЫХ НАГРУЗОК

В данном разделе разработаны научные принципы уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок и описание метода построения энергоэффективного ГДП. При этом рациональные расстояния между поездами рассчитываются на основе метода деформируемого многогранника, последовательность отправления и временные интервалы – на основе эвристического алгоритма.

#### **3.1 Математическая модель энергооптимальной дислокации тяговых нагрузок между тяговыми подстанциями**

С развитием спутниковых систем навигации и их внедрением в работе железнодорожного транспорта появляется возможность регулирования транспортного потока не только с помощью временных интервалов между поездами, но и за счет контроля дислокации поездов. Под дислокацией поездов будем понимать расположение поездов между ТП в данный момент времени [131, 132].

В работах [133, 137-139] установлено, что одно и то же количество поездов может проследовать по участку с различными потерями мощности в тяговой сети в зависимости от дислокации и расстояния между поездами на МЗ, что приводит к задаче определения оптимальных расстояний между тяговыми нагрузками по критерию минимума потерь мощности в тяговой сети.

С учетом ограничений, приведенных в разделе 2, для решения данной задачи построим ее математическую модель [143].

Определим целевую функцию следующим образом:

$$C = f(\Delta P) \rightarrow \min. \quad (3.1)$$

Потери мощности в тяговой сети определяются по формуле [16, 140]:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta U_i I_i, \quad (3.2)$$

где  $n$  – общее количество поездов, находящихся на участке;

$\Delta U_i$  – падение напряжения до токоприемника  $i$ -го поезда;

$I_i$  – ток  $i$ -го поезда.

Падение напряжения до токоприемника  $i$ -го поезда для двухсторонней схемы питания определяется по формулам [16, 140] (рис. 3.1)

$$\Delta U(x) = \begin{cases} \Delta U_A(x) & \text{при } 0 \leq x \leq x_m, \\ \Delta U_B(x) & \text{при } x_m \leq x \leq L_0, \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\Delta U_A(x) = \int_0^x r(x) I_A(x) dx, \quad (3.4)$$

$$\Delta U_B(x) = \int_x^L r(L-x) I_B(x) dx, \quad (3.5)$$

где  $\Delta U_A$  – падение напряжения в тяговой сети на отрезке от ТП А до точки токораздела;

$\Delta U_B$  – падение напряжения в тяговой сети на отрезке от точки токораздела до ТП Б;

$x$  – дислокация поезда;

$x_m$  - расстояние от начала участка до точки токораздела;

$I_A, I_B$  – токи фидеров подстанций А и В соответственно;

$L$  - расстояние между ТП;

$r$  – удельное сопротивление тяговой сети.

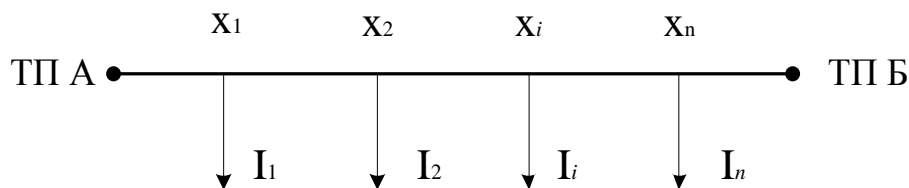


Рисунок 3.1 – Мгновенная схема положения поездов между ТП и потребляемые ими токи

Ток фидера подстанции А:

$$I_A = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n I_i (L - l_i) \pm \left| \frac{U_A - U_B}{r \cdot L} \right|, \quad (3.6)$$

где  $l_i$  – расстояние между началом участка и  $i$ -тым поездом;

$U_A, U_B$  – напряжения на шинах ТП А и В.

Ток фидера подстанции В:

$$I_B = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n I_i \cdot l_i \pm \left| \frac{U_A - U_B}{r \cdot L} \right|. \quad (3.7)$$

С учетом выражений (3.2)–(3.7) целевую функцию поставленной задачи можно записать так:

$$C = f \left( \sum_{i=1}^n I_i \cdot r \cdot \begin{cases} \left( \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n I_i (L - l_i) \pm \left| \frac{U_A - U_B}{r \cdot L} \right| \right) \cdot l_i & \text{при } 1 \leq i \leq m \\ \left( \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n I_i \cdot l_i \pm \left| \frac{U_A - U_B}{r \cdot L} \right| \right) \cdot (L - l_i) & \text{при } m \leq i \leq n \end{cases} \right) \rightarrow \min, \quad (3.8)$$

где  $n$  – общее количество поездов, находящихся на участке;

$m$  – количество поездов до точки токораздела.

Падение напряжения  $\Delta U(x)$  и потребляемые токи  $I(x)$  зависят от местоположения поездов на участке. Таким образом, целевую функцию потерь мощности в тяговой сети можно определить как функцию от показателей

$$\Delta P = f(l_1, Y_0) \quad l_1 \in [0, L], \quad (3.9)$$

где  $l_1$  - дислокация первого поезда;

$Y_0 = [y_1, \dots, y_i]$  - вектор расстояний между поездами ( $y_i$  - расстояние между  $(i-1)$ -м и  $i$ -м поездами).

Таким образом, получим:

$$C = f(l_1, Y_0) \rightarrow \min. \quad (3.10)$$

Т.е. для заданного участка с длиной  $L$  целевая функция  $C$  является функцией расстояний между поездами  $Y_0$ , которые должны обеспечивать минимум целевой функции  $C \rightarrow \min$ .

Обозначим местоположение первого поезда как  $l_1 = y_0$ , а межпоездные расстояния  $l_{i,i+1} = y_i$ . Тогда целевая функция примет вид:

$$C = f(y_0, y_1, y_2, \dots, y_i) \rightarrow \min. \quad (3.11)$$

Теперь определим ограничения, при которых имеет физический смысл данная задача.

*Ограничение 1.* В целях соблюдения безопасности движения минимальное расстояние между поездами должно быть больше или равно нормированному значению, определяемому [135]

$$\min_{1 \leq i \leq n-1} y_i \geq l_{\min}, \quad (3.12)$$

$l_{\min}$  - минимально допустимое расстояние между поездами с учетом безопасности движения.

*Ограничение 2.* При заданных местоположении первого поезда  $y_0$  и расстояниях между поездами местоположение последнего поезда  $l_N$  должно быть меньше или равно длине рассматриваемого участка:

$$l_i = y_0 + \sum_{i=1}^{n-1} y_i \leq L, \quad (3.13)$$

Вид модели определяет метод или методы, используемые для построения оптимального решения. В нашем случае потери мощности в тяговой сети являются функцией, аналитическое представление которой неизвестно, т.е. минимизируемый показатель  $C$  определяется только алгоритмически и более того, он равен минимуму по местоположению первого поезда.

Прямые методы, или методы нулевого порядка, не требуют знания целевой функции в явном виде [141, 142]. Они не требуют регулярности и непрерывности целевой функции и существования производных. Это является существенным достоинством при решении сложных технических и экономических задач.

При реализации прямых методов существенно сокращается этап подготовки решения задачи, так как нет необходимости в определении первых и вторых производных. К прямым методам относится целый ряд алгоритмов, которые отличаются по своей эффективности. Такие методы носят в основном эвристический характер их преимуществом является возможность оптимизации функций, аналитическое представление которых неизвестно, т.е. эти функции определяются только алгоритмически.

Прямые методы предназначены для решения безусловных задач оптимизации вида

$$\min_{\bar{x} \in E^n} f(\bar{x}). \quad (3.14)$$

К методам нулевого порядка относятся:

- алгоритм покоординатного спуска;
- алгоритм Хука и Дживса;

- метод вращающихся координат;
- симплексный метод Нелдера-Мида или поиск по деформируемому многограннику.

Отметим особенность задачи, поставленной в диссертационной работе, оказывающую влияние на выбор метода ее решения и накладывающую определенные требования к алгоритму поиска минимума  $\Delta P_{\min}$ . Кроме того что функция недифференцируема, ее область допустимых значений – расстояния между поездами – существенно зависит от местоположения первого поезда  $x_1$ . Учесть эту особенность позволяет метод деформируемого многогранника. Поэтому в основу метода полагаем идею метода деформируемого многогранника с учетом ограничений (3.12), (3.13).

Прежде всего введем понятие симплекса  $S$  в  $k$ -мерном евклидовом пространстве  $E_k$ .

Пусть  $A_1, A_2, \dots, A_k, A_{k+1}$  – точки в  $E_k$ , не лежащие в одной гиперплоскости, тогда минимальная выпуклая оболочка, натянутая на эти точки, называется симплексом  $S_k$ . Например, на плоскости  $E_2$  берем три точки  $A_1, A_2, A_3$ , не лежащие на одной прямой, тогда  $S_2$  будет представлять собой треугольник с вершинами в этих точках. В пространстве  $E_3$  симплекс  $S_3$  представляет собой пирамиду и т.д.

Рассмотрим построение правильного симплекса с ребром, равным единице, и центром масс в начале координат. Для его построения необходимо два радиуса:

- радиус вписанной сферы:

$$r = \sqrt{\frac{1}{2k(k+1)}}, \quad (3.15)$$

- радиус описанной сферы:

$$R = \sqrt{\frac{k}{2(k+1)}}. \quad (3.16)$$

Так, на плоскости  $E_2$   $r$  – радиус вписанной окружности, а  $R$  – радиус описанной окружности.

Пусть  $x_0$  некоторая начальная точка, тогда строим симплекс с центром в этой точке и длиной ребра, равной величине  $a$ . Если этот симплекс обозначить через  $Y$ , то координаты вершин его вычисляются по формуле:

$$Y[i, j] = x_0[j] + a \cdot A[i, j], \quad i = \overline{1, k+1}, j = \overline{1, k}. \quad (3.17)$$

Далее вычисляем значения минимизируемой функции в вершинах этого симплекса.

Пусть  $y_1, y_2, y_{k+1}$  – значения минимизируемой функции в вершинах симплекса  $Y$ . Среди полученных значений  $y_i, i = \overline{1, k+1}$  определяем такую вершину, в которой значение функции максимально, т.е. решаем задачу

$$y_{j_0} = \max_{1 \leq i \leq k+1} \{y_i\}. \quad (3.18)$$

Тем самым определяем номер  $j_0$  вершины симплекса  $Y$ , от которой необходимо уходить.

Пусть, к примеру, в вершине  $Y_1$  значение функции  $y_1$  максимальное. Тогда отражаем вершину  $Y_2$  относительно  $Y_3 Y_2$  и получаем новую точку  $\bar{Y}_1$ . Т.е. двигаемся от вершины с  $\max C$  к противоположной грани (рис. 3.2). Эту точку вносим в симплекс  $Y$  вместо вершины  $Y_1$ , вычисляем значение  $\bar{y}_1$  в новой вершине, заменяем  $y_1$  на  $\bar{y}_1$  и данный процесс продолжаем  $n$  раз.

После этого определяем центр масс последнего симплекса и строим новый симплекс с центром в этой точке, но меньшего размера, положив:

$$a := \lambda a, \quad (3.19)$$

при  $0 < \lambda < 1$ .

И данный процесс оканчиваем, когда размер симплекса  $a$  становится меньше заданной величины  $\varepsilon$ .

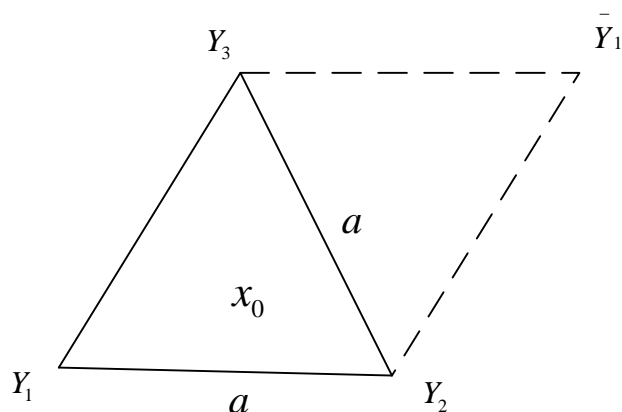


Рисунок 3.2 – Общий вид симплекса на плоскости

Описанный процесс применяется в том случае, когда на возможные значения  $(x_1, x_2)$  не накладываются никакие ограничения. В рассматриваемой задаче имеют место ограничения (3.12), (3.13), поэтому описанную процедуру необходимо дополнить процедурой проектирования.

Обозначим  $D : \underline{CE}_2$  – область допустимых значений  $(x_1, x_2)$ , тогда в случае получения точки  $\bar{Y}$ , не принадлежащей области  $D$ , необходимо выполнить проектирование точки  $\bar{Y}$  на область  $D$ .

Пусть  $Y$  является проекцией  $\bar{Y}$  на  $D$ , т.е. удовлетворяет условию

$$\rho(Y, \bar{Y}) = \min_{Y \in D} \rho(Y, \bar{Y}), \quad (3.20)$$

где  $\rho(X, \bar{X})$  – расстояние между точками  $X$  и  $\bar{X}$ .

В случае расстановки двух поездов между ТП с учетом ограничений (3.12), (3.13) получим:

$y_0 = l_1$  – расстояние между началом участка и 1 поездом;

$y_1 = l_2 - l_1$  – расстояние между 1 и 2 поездом (рис. 3.3).

Построим область допустимых значений межпоездных расстояний с учетом ограничений.

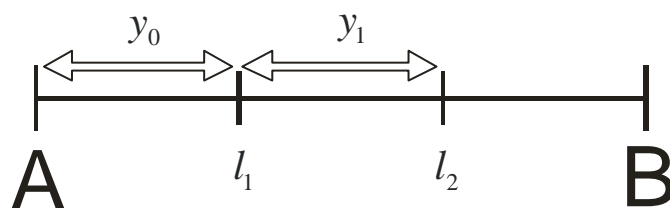


Рисунок 3.3 – Дислокация двух поездов между ГП

Полагаем местоположение первого поезда  $y_0 = l_1$  заданным. Оптимизацию проводим по одному показателю – расстоянию между первым и вторым поездами. Исследуемая область – прямая  $y_1$ . Область допустимых значений  $D$  – множество значений  $y_1 \in [l_{\min}; L - y_0]$ . В данном одномерном евклидовом пространстве симплекс состоит из двух вершин и представляет собой отрезок. Графически исследуемая область допустимых значений  $D$  и симплекс  $Y$  показаны на рис. 3.4.

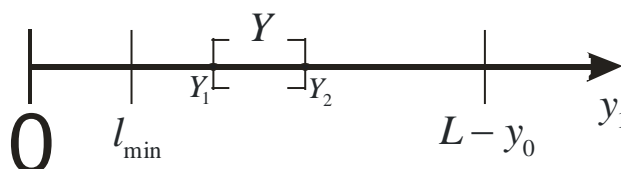


Рисунок 3.4 – Область допустимых значений в одномерном евклидовом пространстве

На заданной области необходимо найти минимум функции  $\Delta P = f(y_1) \rightarrow \min$ .

Процедура построения одномерного симплекса на заданной области следующая.

**Шаг 1.** Строим правильный симплекс с ребром, равным единице, и центром в начале координат. На прямой получаем единичный отрезок  $A_1A_2$  с вершинами  $A_1 \left( -\frac{1}{2} \right)$  и  $A_2 \left( \frac{1}{2} \right)$ .

**Шаг 2.** Определяем начальную точку  $x_0$  и длину ребра симплекса  $a$ .

При расстановке на участке двух поездов расстояние между ними, как правило, колеблется около 3 км. Поэтому в качестве центра исходного симплекса возьмем точку  $x_0(y_1^0)$  с координатой  $y_1^0 = 3$ .

Начальную длину ребра симплекса необходимо выбрать равной или приближенной к минимально возможному расстоянию между двумя поездами. В данном примере примем значение  $a = 0,7$ .

**Шаг 3.** Строим симплекс на заданной области  $D$  с помощью данных, полученных ранее (на шаге 1 и шаге 2).

Обозначим симплекс на ограниченной области через  $Y$ . Координаты его вершин в данном случае вычисляются по формуле:

$$Y[i] = y_1^0 + a \cdot A, \quad i = \overline{1,2}. \quad (24)$$

где  $y_1^0$  – центр симплекса.

Получаем отрезок  $Y_1Y_2$  (рис. 3.5), в котором:

$$Y_1 = 3 + 0,7 \cdot (-0,5) = 2,65$$

$$Y_2 = 3 + 0,7 \cdot 0,5 = 3,35$$

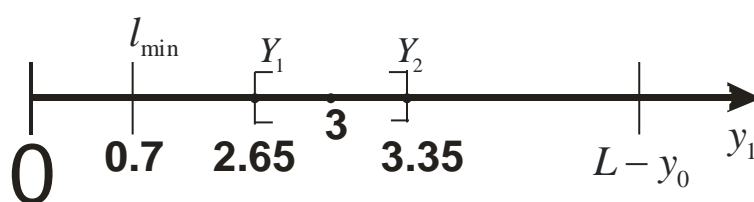


Рисунок 3.5 – Определение оптимальных расстояний для двух поездов между  
ТП

**Шаг 4.** Проверяем построенный симплекс на принадлежность к области допустимых значений. Исходный симплекс полностью принадлежит области  $D$  и в проектировке не нуждается.

Если какая-либо из вершин симплекса окажется вне области  $D$ , необходимо произвести деформацию симплекса – выполнить проектирование этой вершины на интервал допустимых значений переменной.

Процедура проектирования в одномерном эвклидовом пространстве заключается в следующем (рис. 3.6):

1. Если значение точки  $Y_1$  окажется меньше минимального допустимого расстояния между поездами  $l_{\min}$ , тогда ее проекция будет  $\bar{Y}_1(l_{\min})$ ;
2. Если значение точки  $Y_2$  окажется больше максимально возможного межпоездного расстояния с учетом длины участка и местоположения первого поезда  $y_0$ , то ее проекция будет  $\bar{Y}_2(L - y_0)$ .



Рисунок 3.6 – Процедура проектирования в одномерном Эвклидовом пространстве

После построения симплекса необходимо вычислить значение функции в каждой вершине.

### **3.2 Принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора оптимальной дислокации поездов между тяговыми подстанциями**

Принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора оптимальной дислокации поездов между ТП можно сформулировать

следующим образом: на каждом шаге времени выбираем такую дислокацию поездов, при которой потери мощности в тяговой сети минимальны.

Рассмотрим принципы уменьшения потерь электроэнергии за счет выбора оптимальной дислокации различного количества поездов между ТП по критерию минимума потерь мощности в тяговой сети на примере Чаплинского участка Приднепровской железной дороги со следующими исходными данными [144]:

Расстояние между ТП  $L = 18$  км.

Количество поездов  $n = 2$ .

Минимальное расстояние между поездами  $l_{\min} = 1$  км.

Схема питания – двухсторонняя.

Сопrotивление тяговой сети  $r = 0,07$  Ом/км.

Дислокация первого поезда  $y_0 = 0,1$  км.

Дислокация второго поезда  $y_0 + y_1 = 2,75$ .

Ток первого поезда 964 А.

Ток второго поезда 1823 А.

В результате расчетов получены следующие данные:

Токи фидеров  $I_A = 2503$  А,  $I_B = 284$  А.

Падения напряжения  $\Delta U_1 = 17,52$  В,  $\Delta U_2 = 303$  В.

Потери мощности в тяговой сети  $\Delta P(Y_1) = 569,3$  кВт,  $\Delta P(Y_2) = 615$  кВт, при векторе расстояний между поездами  $[0,1; 2,65]$ .

Далее определяем вершину, в которой значение функции потерь мощности будет максимально. Т.е. решаем задачу

$$C_j = \max_{1 \leq i \leq 2} \{ \Delta P(Y_i) \},$$

$$C_j = \max \{ \Delta P(Y_1), \Delta P(Y_2) \}.$$

В данном случае нужно уходить от вершины  $Y_2$ . Отражаем ее относительно  $Y_1$  и получаем новую точку  $\bar{Y}_2(1,95)$ . Формируем новый симплекс  $Y_1\bar{Y}_2$  и проверяем принадлежность новой точки области  $D$ . В данном примере  $\bar{Y}_2(1.95) \in D$  и деформировать симплекс нет необходимости.

Определяем значение  $\Delta P(\bar{Y}_2)$  в новой вершине:  $\Delta P(\bar{Y}_2) = 295$  кВт. Далее снова решаем задачу  $C_j = \max_{1 \leq i \leq 3} \{\Delta P(Y_i)\}$  и уходим от новой вершины с  $\max \Delta P$ .

Этот процесс продолжаем  $n$  раз. В данном примере мы взяли число отражений  $n = 3$ .

Затем определяем центр масс последнего симплекса и строим новый симплекс с центром в этой точке, но меньшего размера, положив:  $a := \lambda \cdot a$ , где  $0 < \lambda < 1$ .

В данном примере мы взяли параметр уменьшения симплекса  $\lambda = 0,9$ .

Процесс оптимизации оканчиваем, когда размер симплекса  $a$  становится меньше заданной величины  $\varepsilon$ . В нашем случае она принята равной 1.

В результате для примера с 2 поездами на участке и дислокацией первого поезда, равной 0,1 км от подстанции А, с помощью симплекс-метода поиска минимума функции потерь мощности были получены следующие результаты: минимальные потери мощности в тяговой сети  $\Delta P_{\min} = 84$  кВт. Они достигаются при расстоянии между поездами  $y_1 = 1,1$  км и векторе расстояний между поездами  $Y = [0,1; 1,1]$ .

Рассмотрим поездную ситуацию, когда между ТП находится три поезда. Дислокация поездов и потребляемые ими токи приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Дислокация 3 поездов на участке и потребляемые токи

Дислокация поездов	Расстояние $l_i$ , км	Токи $I(l_i)$ , А
$l_1 = y_0$	0,1	964
$l_2 = y_0 + y_1$	1,25	1460
$l_3 = y_0 + y_1 + y_2$	2,54	1721

Пусть на участке три поезда находятся на расстояниях от начала  $l_1, l_2, l_3$ . Обозначим через  $y_i$  расстояние между  $i$ -м и  $(i+1)$ -м поездами. Тогда:

$y_1 = l_2 - l_1$  – расстояние между 1-м и 2-м поездом;

$y_2 = l_3 - l_2$  – расстояние между 2-м и 3-м поездом;

и  $y_0 = l_1$  – расстояние между началом участка и 1-м поездом (рис. 3.7).

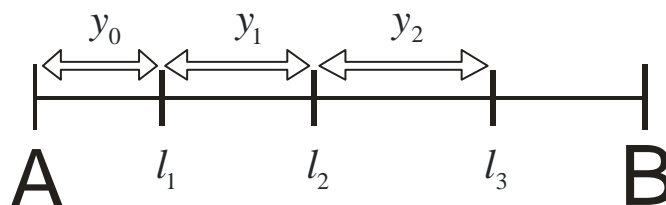


Рисунок 3.7 – Дислокация 3 поездов между тяговыми подстанциями

Построим область допустимых значений расстояний между поездами с учетом ограничений (3.12), (3.13).

Полагаем местоположение первого поезда  $y_0 = l_1$  заданным. Будем откладывать по оси  $OX$  расстояния между 1-м и 2-м поездом  $y_1$ , а по оси  $OY$  – расстояния между 2-м и 3-м поездом  $y_2$ . Значения  $y_1$  и  $y_2$  не могут быть меньше минимального расстояния между поездами по условиям безопасности движения –  $l_{\min}$ , что на графике отражают прямые  $y_1 = l_{\min}$  и  $y_2 = l_{\min}$ . Кроме того, сумма расстояний между 1-м, 2-м и 3-м поездами не должна превышать длины участка  $L$ . Получаем:

$$\sum_{i=1}^2 y_i \leq L - y_0, \quad (3.21)$$

$$y_1 + y_2 \leq L - y_0. \quad (3.22)$$

Так как зависимость между  $y_1$  и  $y_2$  линейная, для построения ограничения достаточно двух точек.

Пусть  $y_2 = l_{\min}$ , тогда  $y_1 = L - y_0 - l_{\min}$ . Получаем точку  $C_1(y_1^1, y_2^1)$ .

Пусть  $y_1 = l_{\min}$ , тогда  $y_2 = L - y_0 - l_{\min}$ . Получаем точку  $C_2(y_1^2, y_2^2)$ .

Через полученные точки проводим прямую, пересекающую координатные оси в точках  $y_1 = L - y_0$  и  $y_2 = L - y_0$  (рис. 3.8, а). Область допустимых значений расстояний между поездами  $D$  показана на рис. 3.8, б.

На указанной области необходимо найти минимум функции  $\Delta P = f(y_1, y_2) \rightarrow \min$ .

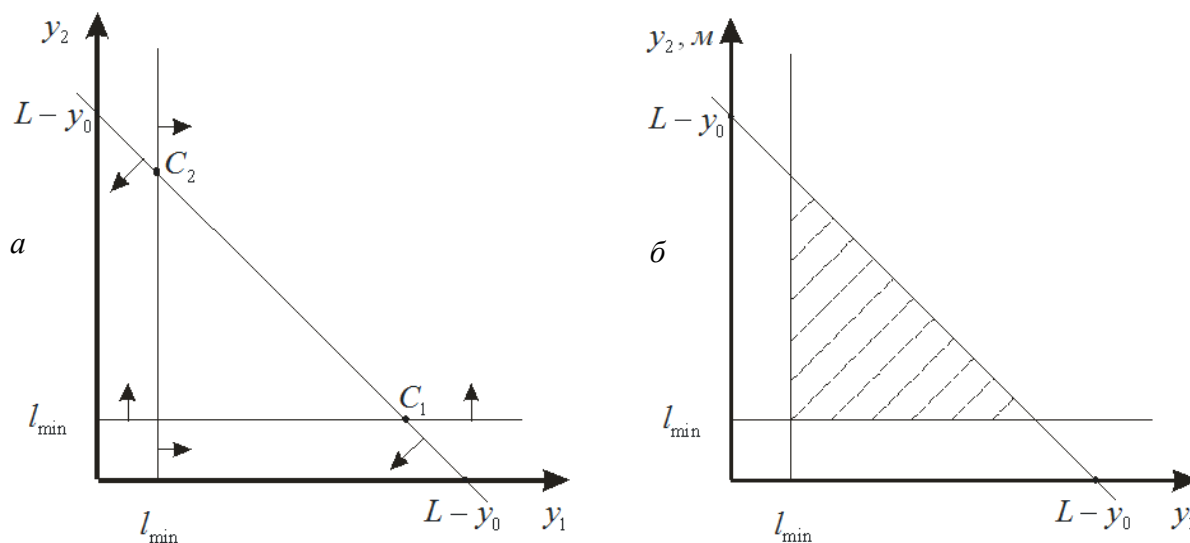


Рисунок 3.8 – Принцип построения симплекса (а) и область допустимых значений (б) для трех поездов между тяговыми подстанциями

Для построения симплекса на заданной области двумерного евклидова пространства  $E^2$  необходимо выполнить несколько шагов:

**Шаг 1.** Строим правильный симплекс с ребром, равным единице, и центром масс в начале координат. На плоскости для его построения необходимы значения радиуса вписанной и описанной около равностороннего треугольника окружностей:

$$r_2 = \frac{\sqrt{3}}{6} a, \quad (3.23)$$

$$R_2 = \frac{\sqrt{3}}{3} a, \quad (3.24)$$

где  $a = 1$  – длина стороны треугольника  $\Delta A_1 A_2 A_3$ .

Используя процедуру расчета координат вершин симплекса получаем результаты, приведенные в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Координаты вершин симплекса

	$y_1$	$y_2$
$A_1$	$-r_1$	$-r_2$
$A_2$	$R_1$	$-r_2$
$A_3$	0	$R_2$

где  $r_1$  и  $R_1$  – радиусы одномерного симплекса с ребром, равным 1. Эти радиусы равны  $\frac{1}{2}$ .

Определяем координаты вершин симплекса; вычисленные значения приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3 – Значения координат вершин симплекса

	$y_1$	$y_2$
$A_1$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}$
$A_2$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6}$
$A_3$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3}$

**Шаг 2.** Определяем начальную точку  $x_0$  и длину ребра симплекса  $a$ .

В качестве центра исходного симплекса принимаем точку  $x_0(y_1^0, y_2^0)$  с координатами  $y_1^0 = 1,5$  и  $y_2^0 = 1,5$ .

Начальную длину ребра принимаем равной  $a = 0,7$ .

**Шаг 3.** Строим симплекс на заданной области с помощью данных, полученных ранее (на шаге 1 и шаге 2).

Обозначим симплекс на ограниченной области через  $Y$ . Координаты его вершин вычисляются по формуле

$$Y[i, j] = y_0[j] + a \cdot A[i, j], \quad i = \overline{1, 3}, j = \overline{1, 2}.$$

Получаем матрицу  $Y$ , в которой  $i$  – номер вершины ( $A_1$ ,  $A_2$  или  $A_3$ ),  $j$  – номер координаты ( $y_1$  или  $y_2$ ).

Для трех поездов на участке получим следующий исходный симплекс:

$$Y[1,1] = 1,5 + 0,7 \cdot \left(-\frac{1}{2}\right) = 1,15;$$

$$Y[1,2] = 1,5 + 0,7 \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{6}\right) = 1,298;$$

$$Y[2,1] = 1,5 + 0,7 \cdot \frac{1}{2} = 1,85;$$

$$Y[2,2] = 1,5 + 0,7 \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{6}\right) = 1,298;$$

$$Y[3,1] = 1,5 + 0,7 \cdot 0 = 1,5;$$

$$Y[3,2] = 1,5 + 0,7 \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{3}\right) = 1,904.$$

Таким образом, получаем координаты точек на плоскости для построения исходного симплекса (рис. 3.9):  $Y_1(1,15; 1,298)$ ,  $Y_2(1,85; 1,298)$   $Y_3(1,5; 1,904)$ .

**Шаг 4.** Проверяем построенный симплекс на принадлежность области допустимых значений. Исходный симплекс полностью принадлежит области  $D$  и в проектировке не нуждается.

В дальнейшем, если необходимо, после отображения деформируем симплекс таким образом, чтобы он не выходил из области допустимых значений расстояний между поездами.

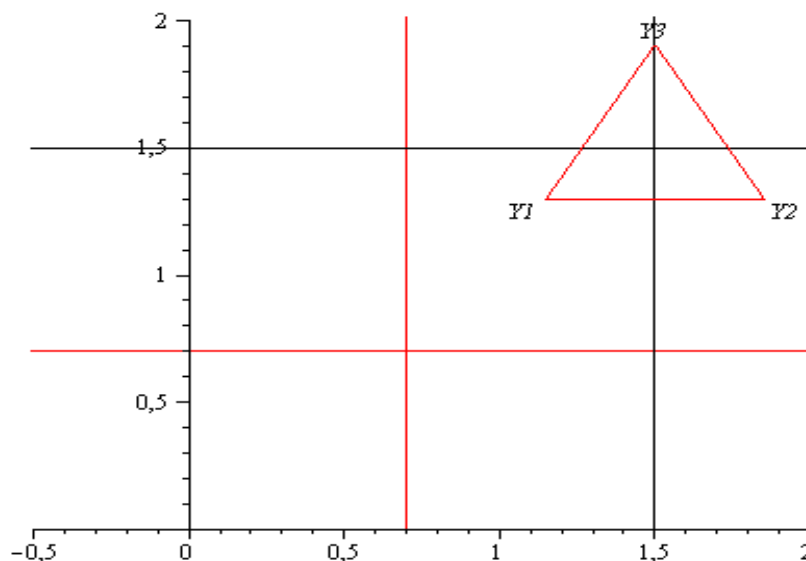


Рисунок 3.9 – Принцип построения исходного симплекса для 3 поездов между тяговыми подстанциями

Если при построении симплекса была получена точка  $Y1$ , не принадлежащая заданной области, необходимо выполнить проектирование.

Проекция точки  $Y1$  должна удовлетворять условию:

$$\rho(Y, Y1) = \min_{Y \in D} \rho(Y, Y1), \quad (3.25)$$

где  $\rho(Y, Y1)$  – расстояние между точками  $Y$  и  $Y1$ ;

$D$  – область допустимых значений  $(y_1, y_2)$ .

Процедура проектирования заключается в следующем.

Область, находящаяся за рамками области  $D$ , условно разбивается на 6 частей (рис. 3.10). Каждая точка  $Y1(y_1, y_2) \notin D$  анализируется и, в зависимости от области (части плоскости, в которой она находится), выполняется проектирование:

1. Если точка  $Y1(y_1, y_2)$  находится в секторе «1», то ее проекция будет иметь координаты  $Y(l_{\min}, l_{\min})$

2. Если точка  $Y1(y_1, y_2)$  находится в секторе «2», то ее проекция будет иметь координаты  $Y(y_1, l_{\min})$
3. Если точка  $Y1(y_1, y_2)$  находится в секторе «3», то ее проекция будет иметь координаты  $Y(L - y_0 - l_{\min}, l_{\min})$
4. Если точка  $Y1(y_1, y_2)$  находится в секторе «4», то ее проекция будет иметь координаты  $Y(\bar{y}_1, \bar{y}_2)$ , где  $\bar{y}_1 = \frac{L - y_0 + y_1 - y_2}{2}$ ;  $\bar{y}_2 = \frac{L - y_0 + y_2 - y_1}{2}$
5. Если точка  $Y1(y_1, y_2)$  находится в секторе «5», то ее проекция будет иметь координаты  $Y(l_{\min}, L - y_0 - l_{\min})$
6. Если точка  $Y1(y_1, y_2)$  находится в секторе «6», то ее проекция будет иметь координаты  $Y(l_{\min}, y_2)$ .

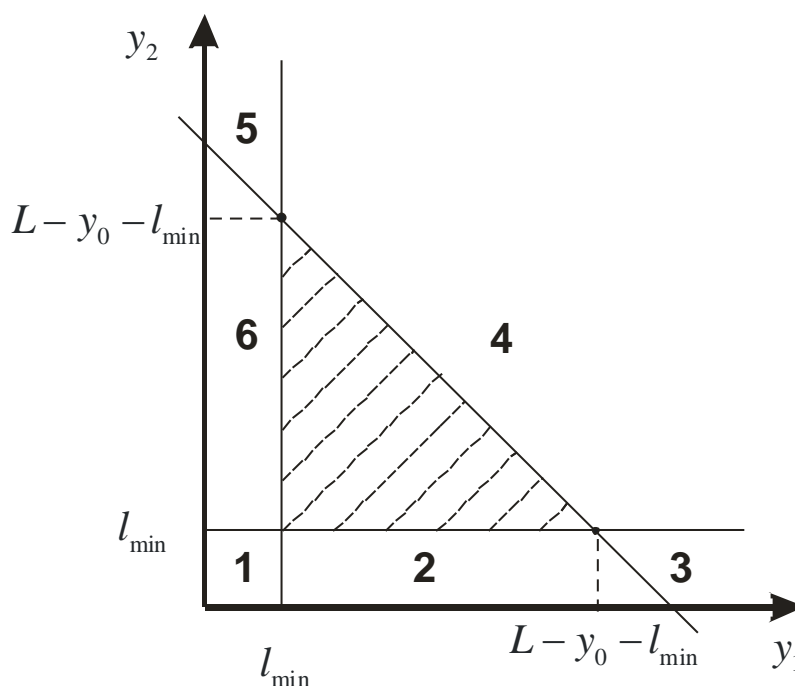


Рисунок 3.10 – Процесс проектирования симплекса для трех поездов между тяговыми подстанциями

После построения симплекса необходимо определить значение функции потерь мощности в каждой вершине. В результате расчетов по методике [16] получены следующие данные:

- токи фидеров  $I_A = 3\,804\text{ А}$ ,  $I_B = 341\text{ А}$ ;
- падения напряжения  $\Delta U_1 = 26,6\text{ В}$ ,  $\Delta U_2 = 306\text{ В}$ ,  $\Delta U_3 = 369,6\text{ В}$ .
- потери мощности в тяговой сети  $\Delta P(Y_1) = 1\,109\text{ кВт}$ ,  
 $\Delta P(Y_2) = 1\,682\text{ кВт}$ ,  $\Delta P(Y_3) = 1\,628\text{ кВт}$ .

Далее определяем такую вершину, в которой значение функции потерь мощности в тяговой сети будет максимально. Т.е. решаем задачу

$$C_j = \max_{1 \leq i \leq 3} \{\Delta P(Y_i)\},$$

$$C_j = \max\{1109000; 1682000; 1628000\}.$$

Тем самым определяем номер  $j$  вершины симплекса  $Y$ , от которой необходимо уходить. В нашем случае это будет вершина  $Y_2$ , в которой мгновенные потери мощности составляют 1682 кВт при дислокации поездов - 1,85 км между 1 и 2; 1,29 км между 2 и 3. Первый поезд находится на расстоянии 0,1 км от начала участка.

Вершину  $Y_2$  отражаем относительно  $Y_1Y_3$  и получаем новую точку  $\bar{Y}_{22}(0,8;1,9)$  (рис. 3.11, а).

Данная точка не принадлежит области допустимых значений, т.к. ее первая координата показывает, что расстояние между первым и вторым поездом равно 0,8 км, что меньше минимально допустимого.

Выполним новое проектирование. Согласно правилам проектирования, описанным выше, координаты новой точки будут следующими:

$$\bar{Y}_2(l_{\min}; y_2) = \bar{Y}_2(1; 1,9)$$

Получаем новый симплекс (рис. 3.11, б).

В новой вершине значение  $\Delta P(\bar{Y}_2) = 995\text{ кВт}$ .

Далее снова решаем задачу  $C_j = \max_{1 \leq i \leq 3} \{\Delta P(Y_i)\}$  и уходим от новой вершины с  $\max \Delta P$ . Этот процесс продолжаем  $n$  раз. В данном примере мы взяли число отражений  $n = 3$ .

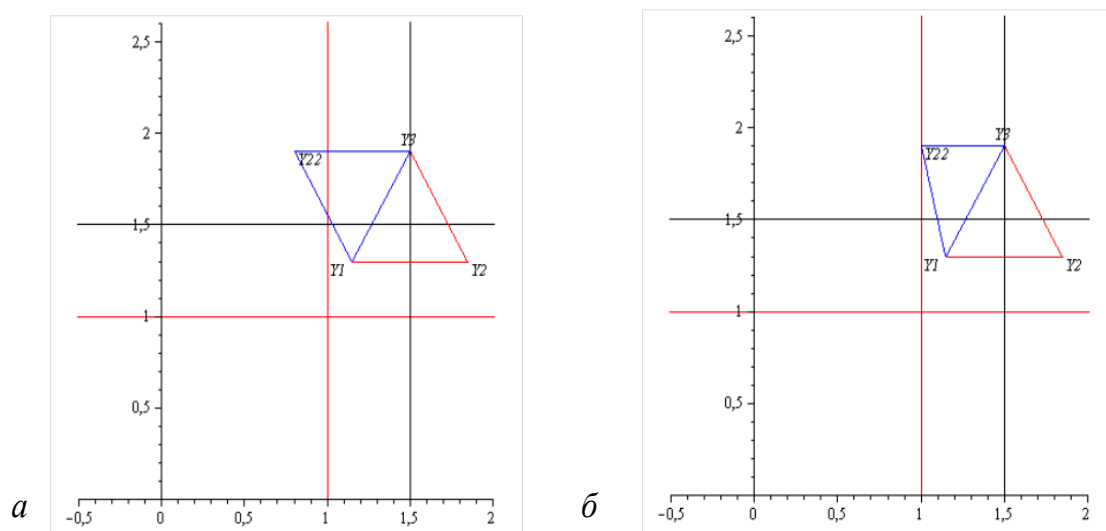


Рисунок 3.11 – Принцип проектирования симплекса для трех поездов между тяговыми подстанциями

Затем определяем центр масс последнего симплекса и строим новый симплекс с центром в этой точке, но меньшего размера (рис. 3.12), при условии:

$$a := \lambda \cdot a, \quad (3.26)$$

где  $0 < \lambda < 1$ .

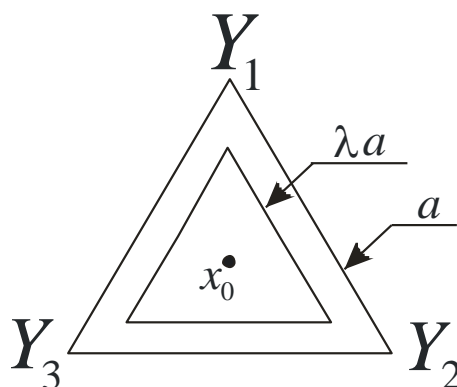


Рисунок 3.12 – Условие окончания проектирования

В этом примере мы взяли параметр уменьшения симплекса  $\lambda = 0,9$ . Данный процесс оканчиваем, когда размер симплекса  $a$  становится меньше заданной величины  $\varepsilon$  (в нашем случае она принята равной 1 км).

Для примера с 3 поездами между ТП и дислокацией первого поезда, равной 0,1 км от подстанции А, с помощью симплекс-метода поиска минимума функции потерь мощности были получены следующие результаты: минимальные потери мощности в тяговой сети составляют  $\Delta P_{\min} = 656$  кВт. Они достигаются при расстояниях  $y_1 = 1$  км и  $y_2 = 1,2$  км. Т.е. вектор расстояний между поездами имеет вид  $Y = [0,1;1;1,2]$ .

Далее, изменяя местоположение первого поезда и используя симплекс-метод, мы расставляем три поезда на участке таким образом, чтобы суммарные потери мощности в тяговой сети были минимальными.

Рассмотрим поездную ситуацию, когда между ТП находится четыре поезда со следующими исходными данными (табл. 3.4)

Таблица 3.4 – Дислокация 4 поездов на участке и потребляемые токи

Дислокация поездов	Расстояние $l_i$ , км	Токи $I(l_i)$ , А
$l_1 = y_0$	0,1	964
$l_2 = y_0 + y_1$	1,25	1460
$l_3 = y_0 + y_1 + y_2$	2,54	1721
$l_4 = y_0 + y_1 + y_2 + y_3$	3,9	1771

В случае одновременного нахождения на участке 4 поездов получаем (рис. 3.13):

$y_0 = l_1$  – расстояние между началом участка и 1-м поездом;

$y_1 = l_2 - l_1$  – расстояние между 1-м и 2-м поездом;

$y_2 = l_3 - l_2$  – расстояние между 2-м и 3-м поездом;

$y_3 = l_4 - l_3$  – расстояние между 3-м и 4-м поездом.

Ограничения (3.12), (3.13) в пространстве представляют собой плоскости. Областью допустимых значений будет часть пространства, ограниченная данными плоскостями (рис. 3.14).

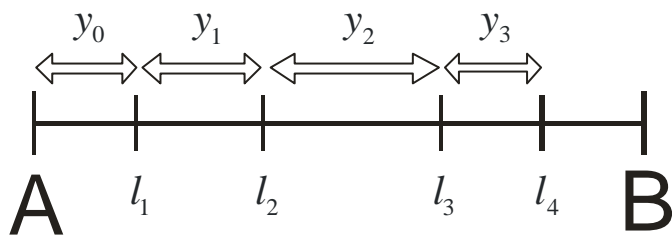


Рисунок 3.13 – Дислокация 4 поездов между тяговыми подстанциями

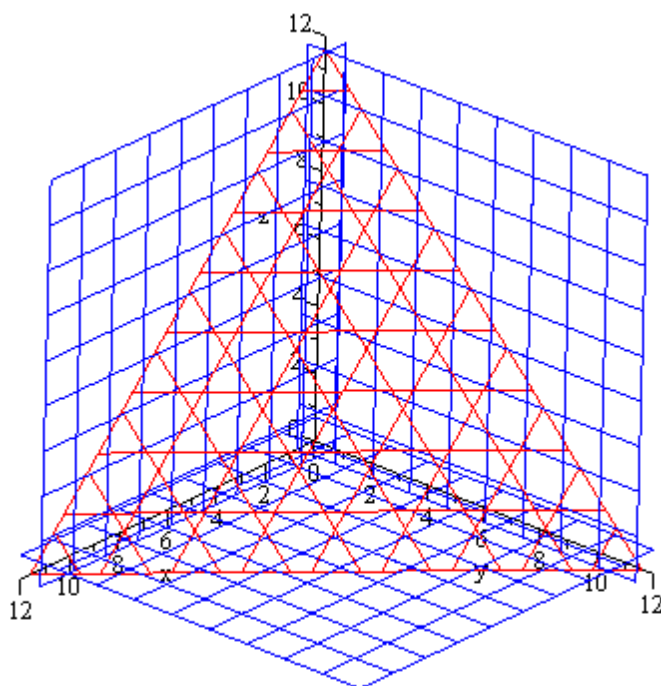


Рисунок 3.14 – Область допустимых значений расстояний между 4 поездами в трехмерном пространстве

Уравнения плоскостей имеют вид:

$$(L - y_0 - l_{\min})y + l_{\min}^2 + y_0 - L \cdot l_{\min} = 0 \text{ или } y = l_{\min};$$

$$(L - y_0 - l_{\min})x + l_{\min}^2 + y_0 - L \cdot l_{\min} = 0 \text{ или } x = l_{\min};$$

$$(L - y_0 - l_{\min})z + l_{\min}^2 + y_0 - L \cdot l_{\min} = 0 \text{ или } z = l_{\min};$$

$$x + y + z + y_0 - L = 0;$$

$$16,9y - 16,9 = 0 \text{ или } y = 1;$$

$$16,9x - 16,9 = 0 \text{ или } x = 1;$$

$$16,9z - 16,9 = 0 \text{ или } z = 1;$$

$$x + y + z - 17,9 = 0.$$

Симплекс на данной области будет представлять собой правильный тетраэдр с ребром  $a = 0,7$  и центром в точке  $x_0(1,5; 1,5; 1,5)$ .

Координаты вершин симплекса вычисляются по формуле

$$Y[i, j] = y_0[j] + a \cdot A[i, j], \quad i = \overline{1, 4}, j = \overline{1, 3}. \quad (3.27)$$

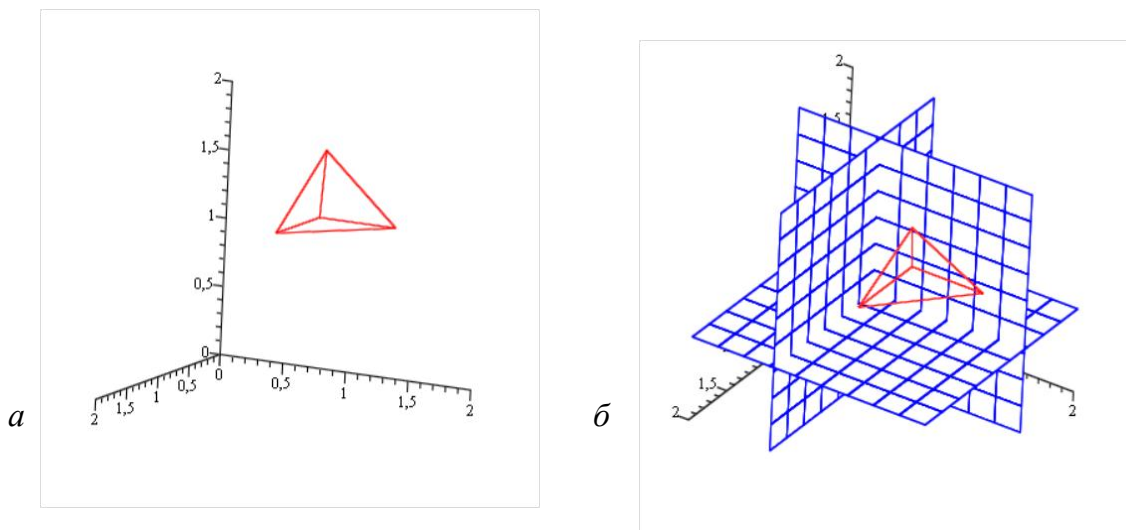
В результате вычислений получаем координаты 4 вершин для построения исходного симплекса (рис. 3.15):

$$Y_1(1,15; 1,2979; 1,3571);$$

$$Y_2(1,85; 1,2979; 1,3571);$$

$$Y_3(1,5; 1,9042; 1,3571);$$

$$Y_4(1,5; 1,5; 1,9287).$$



*a* – исходный симплекс; *б* – симплекс с учетом ограничений

Рисунок 3.15 – Принцип построения симплекса для 4 поездов между тяговыми подстанциями

Полученный исходный симплекс полностью принадлежит области  $D$ . После построения симплекса необходимо определить значение функции в

каждой вершине. В результате расчетов по методике [16] получены следующие данные:

- токи фидеров  $I_A = 5\,183\text{ А}$ ,  $I_B = 733\text{ А}$ ;
- падения напряжения  $\Delta U_1 = 36,28\text{ В}$ ,  $\Delta U_2 = 453,51\text{ В}$ ,  $\Delta U_3 = 921,54\text{ В}$ ,  
 $\Delta U_4 = 723,47\text{ В}$ ;
- потери мощности в тяговой сети при расстояниях между поездами  $[0,1; 1,15; 1,29; 1,36]$   $\Delta P(Y_1) = 3\,565\text{ кВт}$ ,  $\Delta P(Y_2) = 4\,851\text{ кВт}$ ,  
 $\Delta P(Y_3) = 4\,523\text{ кВт}$ ,  $\Delta P(Y_4) = 4\,611\text{ кВт}$ .

Максимальное значение функции достигается в вершине  $Y_2(1,85; 1,2979; 1,3571)$ . Т.е. при данных расстояниях между поездами потери мощности в тяговой сети будут максимальными.

Далее отражаем вершину  $Y_2$  относительно плоскости  $Y_1Y_3Y_4$  и получаем новую точку  $\bar{Y}_2$ . Схематично процесс проектирования показан на рис. 3.16.

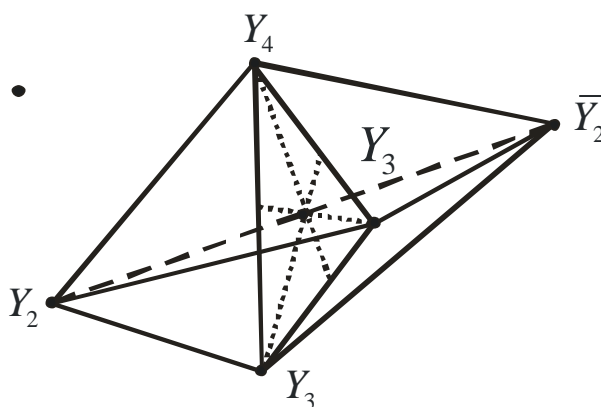


Рисунок 3.16 – Процесс проектирования симплекса для 4 поездов между тяговыми подстанциями

Для нового симплекса  $Y_1\bar{Y}_2Y_3Y_4$  выполняем следующие операции:

1. Проверка симплекса на принадлежность области  $D$ .
2. Вычисление значений функции в вершинах симплекса.
3. Нахождение вершины, в которой значение функции максимально.
4. Построение проекции этой вершины.

5. Замена в симплексе вершины с максимальным значением функции на ее проекцию и возврат к п.1.

Данные операции повторяются заданное количество раз. В данном примере  $n = 3$ . Затем симплекс уменьшается на 10 %. Когда размер симплекса станет меньше заранее заданного параметра  $\varepsilon = 1$ , вычисления завершаем.

Для примера с 4 поездами между ТП и месторасположением первого поезда, равным 0,1 км от подстанции А, с помощью симплекс-метода поиска минимума функции потерь мощности были получены следующие результаты: минимальные потери мощности в тяговой сети составляют  $\Delta P_{\min} = 2\,716$  кВт. Они достигаются при расстояниях  $y_1 = 1,1$  км,  $y_2 = 1,1$  км,  $y_3 = 1,6$  км. Вектор расстояний между поездами имеет вид  $Y = [0,1; 1,1; 1,1; 1,6]$ .

Расчет оптимальных расстояний между поездами в среде Maple и промежуточные результаты приведены в прил. Б.

### **3.3 Принципы уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора оптимальной последовательности отправления и интервалов между поездами**

Принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора оптимальной последовательности отправления поездов можно сформулировать так: из возможных вариантов отправления поездов различных категорий необходимо выбрать такую последовательность, которой соответствует минимальное значение потерь электроэнергии в тяговой сети.

Принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора оптимальных интервалов между поездами формулируется следующим образом: из множества возможных значений интервалов между поездами необходимо выбрать такие, при которых значение потерь электроэнергии в тяговой сети будет минимальным.

В условиях оперативного управления движением поездов возникает необходимость применения такого метода оптимизации, который позволяет быстро осуществлять выбор большого количества возможных ГДП в зависимости от регулирования следующих параметров [95, 146, 147]:

- последовательности отправления поездов различных категорий;
- интервалов между поездами;
- взаимного расположения поездов на двухпутных участках.

В процессе движения поездов оптимальные расстояния между поездами изменяются в каждый момент времени. Для построения ГДП необходимо определить временные интервалы между поездами, при котором потери энергии в тяговой сети будут минимальны. Если  $v_{cp}$  – средняя скорость движения, то оптимальный межпоездной интервал определяется из условия:

$$J_{\text{опт}} = \frac{l_{\text{опт}}}{v_{\text{cp}}}, \quad (3.28)$$

Для решения задачи воспользуемся эвристическим алгоритмом поиска минимума функции.

Пусть необходимо пропустить по участку  $n$  поездов различных категорий. Введем понятие категории поезда, которое представляет собой поезда с различной массой, серии электровоза и тип поезда. Для каждого варианта последовательности пропуска поездов различных категорий определяются потери электроэнергии  $\Delta W$  [16]. Возникает задача определения такой последовательности пропуска поездов, при которой достигается минимум функции потерь электроэнергии в тяговой сети:

$$C = f(\Delta W) \rightarrow \min. \quad (3.29)$$

В работе [145] введено понятие функции последовательности, которое заключается в том, что некоторой последовательности  $[w_1, w_2, \dots, w_n]$  по определенному правилу  $F$  сопоставляется действительное число.

Так, если  $w_i$  –  $i$ -я категория поезда и  $i = \overline{1,4}$ , то в данном случае всего последовательностей пропуска поездов будет  $n! = 24$  варианта, а каждому варианту пропуска поездов сопоставляется определенное значение величины потери электроэнергии в тяговой сети:

$$\left. \begin{aligned} [w_1, w_2, w_3, w_4] &\rightarrow \Delta W_1, \\ [w_2, w_1, w_3, w_4] &\rightarrow \Delta W_2, \\ &\dots \\ [w_4, w_3, w_2, w_1] &\rightarrow \Delta W_{24}. \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

Основой эвристического алгоритма является элементарная операция вариации последовательности (списка).

Пусть задан список  $L' = [w_1, \dots, w_n]$ , тогда элементарную операцию можно записать в виде

$$L' \otimes (i, j), \quad (3.31)$$

где элементы  $w_i, w_j$  меняются местами.

Например, для списка, состоящего из 4 различных элементов  $L' = [w_1, w_2, w_3, w_4]$ , используя вариацию списка  $(i, j) = (1, 3)$ , получаем новый список:

$$[w_1, w_2, w_3, w_4] \otimes (1, 3) = [w_3, w_2, w_1, w_4]. \quad (3.32)$$

В соотношении (3)  $i$  можем принимать значения в общем случае от 1 до  $n-1$ ,  $j$  – от 2 до  $n$ . Тогда элементарных вариаций будет  $\frac{n(n-1)}{2}$ .

В табл. 3.5 показана сводная информация о количестве элементарных операций и общем числе вариаций списка для двух вариантов списков.

Как видно из табл. 3.5, в случае  $n \approx 4 \div 5$  минимум можно найти непосредственным перебором, но когда  $n = 10$ , то всего вариантов будет  $N = 3628800$ , тогда для решения данной задачи появляется необходимость

применения эвристического алгоритма поиска минимума функции последовательности.

Таблица 3.5 – Количество элементарных операций и общее число вариаций списка для двух вариантов списков

Показатель	$n = 4$	$n = 10$
Общее количество элементарных вариаций	$\frac{n(n-1)}{2} \Big _{n=4} = 6$	$\frac{n(n-1)}{2} \Big _{n=10} = 45$
Общее количество вариаций последовательности	$n! = 24$	$n! = 3628800$

Содержание эвристического алгоритма:

1. Задаем первоначальную последовательность  $L' = [w_1, \dots, w_n]$ . Для нее определяем значение целевой функции  $F(L') = \Delta W$ . Заносим эти данные в ячейки:

$$\left. \begin{aligned} f_{\min} &= F(L'), \\ L'_{\min} &= L'. \end{aligned} \right\} \quad (3.33)$$

2. При помощи операции (3.33) получаем из списка  $L' = [w_1, \dots, w_n]$  набор последовательностей  $L'_1$ . Например, для списка  $L' = [w_1, w_2, w_3, w_4]$  получаем набор  $L'_1$ , состоящий из 6 списков:

$$\left. \begin{aligned} 1, & [2, 1, 3, 4], \\ 2, & [3, 2, 1, 4], \\ 3, & [4, 2, 3, 1], \\ 5, & [1, 4, 3, 2], \\ 6, & [1, 2, 4, 3]. \end{aligned} \right\} \quad (3.34)$$

3. Из полученного набора определяем список  $L_1^*$ , при котором функция  $F(L') = \Delta W$  принимает минимальное значение. Если  $F(L_1^*) < f_{\min}$ , то записываем полученные данные в специальные ячейки:

$$\left. \begin{aligned} f_{\min} &= F(L_1^*), \\ L_{\min} &= L_1^*. \end{aligned} \right\} \quad (3.35)$$

и переходим к п. 4.

В обратном случае переходим к п. 6.

4. Подвергаем список  $L_1^*$  элементарной вариации (3.31) и получаем новый набор  $L_2'$ . В нем также находим список  $L_2^*$  с минимальным значением целевой функции  $F$ .
5. Выполняем сравнение: если  $F(L_2^*) < f_{\min}$ , то заменяем  $f_{\min}$  на  $F(L_2^*)$ , а  $L_{\min}'$  на  $L_2^*$  и возвращаемся к п. 1. В обратном случае переходим к п. 5.
6. Когда будет выполняться условие  $F(L_n^*) > f_{\min}$ , заканчиваем вычисления. В качестве ответа выдаются значения  $f_{\min}$  и  $L_{\min}$ .

Графически процесс поиска минимума функции последовательности изображен на рис. 3.17. Причем,  $F(L_m^j) = \min_{1 \leq i \leq m} F(L_i)$ .

$$F(L) > F(L_1^i) > F(L_2^j) > \dots > F(L_m^j). \quad (3.36)$$

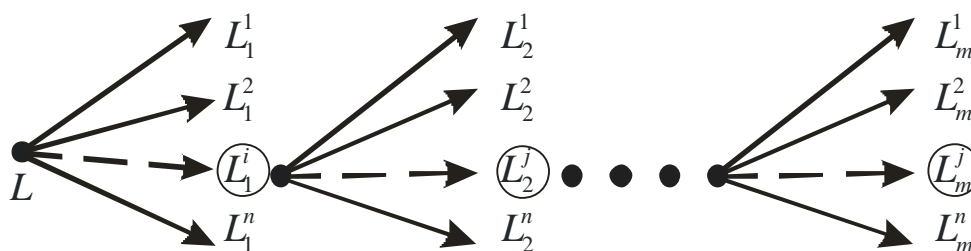


Рисунок 3.17 – Процесс поиска минимума функции последовательности

Данный алгоритм позволяет находить локальные минимумы функции. Для определения глобального минимума функции алгоритм предлагается использовать не менее трех раз, изменяя начальные условия – начиная с первого элемента списка вариантов, со срединного и последнего.

Расчет оптимальной последовательности отправления и интервалов между поездами в среде Maple, эвристический алгоритм поиска минимума функции списка и промежуточные результаты приведены в прил. В.

### **Выводы к разделу 3**

1. Разработанная математическая модель энергооптимальной дислокации тяговых нагрузок между ТП позволяет выбирать схемы расположения поездов между ТП на каждом шаге времени, при которых потери электроэнергии в тяговой сети минимальны. Предложен подход, при котором расстояния между тяговыми нагрузками представлены как ребра многогранника. Ограничения по безопасности движения поездов учитываются следующим образом: минимальная длина ребра должна быть не меньше длины блок-участка устройств СЦБ, максимальная – не более длины рассматриваемого участка.
2. Сформулированный принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети на основе метода деформируемого многогранника позволяет рассчитывать оптимальные расстояния между тяговыми нагрузками для построения энергоэффективных ГДП. Рассмотрены ситуации для различного количества поездов между ТП.
3. Предложен принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети на основе эвристического алгоритма поиска минимума функции списка за счет выбора оптимальной последовательности отправления и интервалов между поездами. При этом последовательность поездов различных категорий представляется как список, а каждой последовательности отправления поездов различных категорий сопоставляется определенное значение потерь электроэнергии в тяговой сети.

## РАЗДЕЛ 4

### ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ

В данном разделе выполнена экспериментальная проверка теоретических положений. Приведено описание программного комплекса для составления энергоэффективных ГДП. Реализованы принципы уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора рациональных последовательностей отправления поездов, интервалов между поездами и дислокации поездов между ТП. Показана экономическая эффективность применения данных методов.

#### **4.1 Программный комплекс по оптимизации режимов СТЭ за счет составления энергоэффективных графиков движения поездов**

Теоретические положения, изложенные в разд. 3 диссертации, нашли реализацию в виде специального программного комплекса «Поток», предназначенный для построения энергоэффективных ГДП в целях достижения равномерной нагрузки на ТП и уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети [151].

##### 4.1.1 Функциональное назначение и алгоритм работы программы

Программный комплекс проводит расчет следующих параметров ГДП, обеспечивающих минимальные потери энергии в СТЭ постоянного тока:

- последовательности отправления поездов различных категорий;
- интервалов между поездами;
- временного сдвига четного и нечетного пакетов.

На рис. 4.1 показан обобщенный алгоритм работы автоматизированной системы составления энергоэффективного ГДП «Поток».

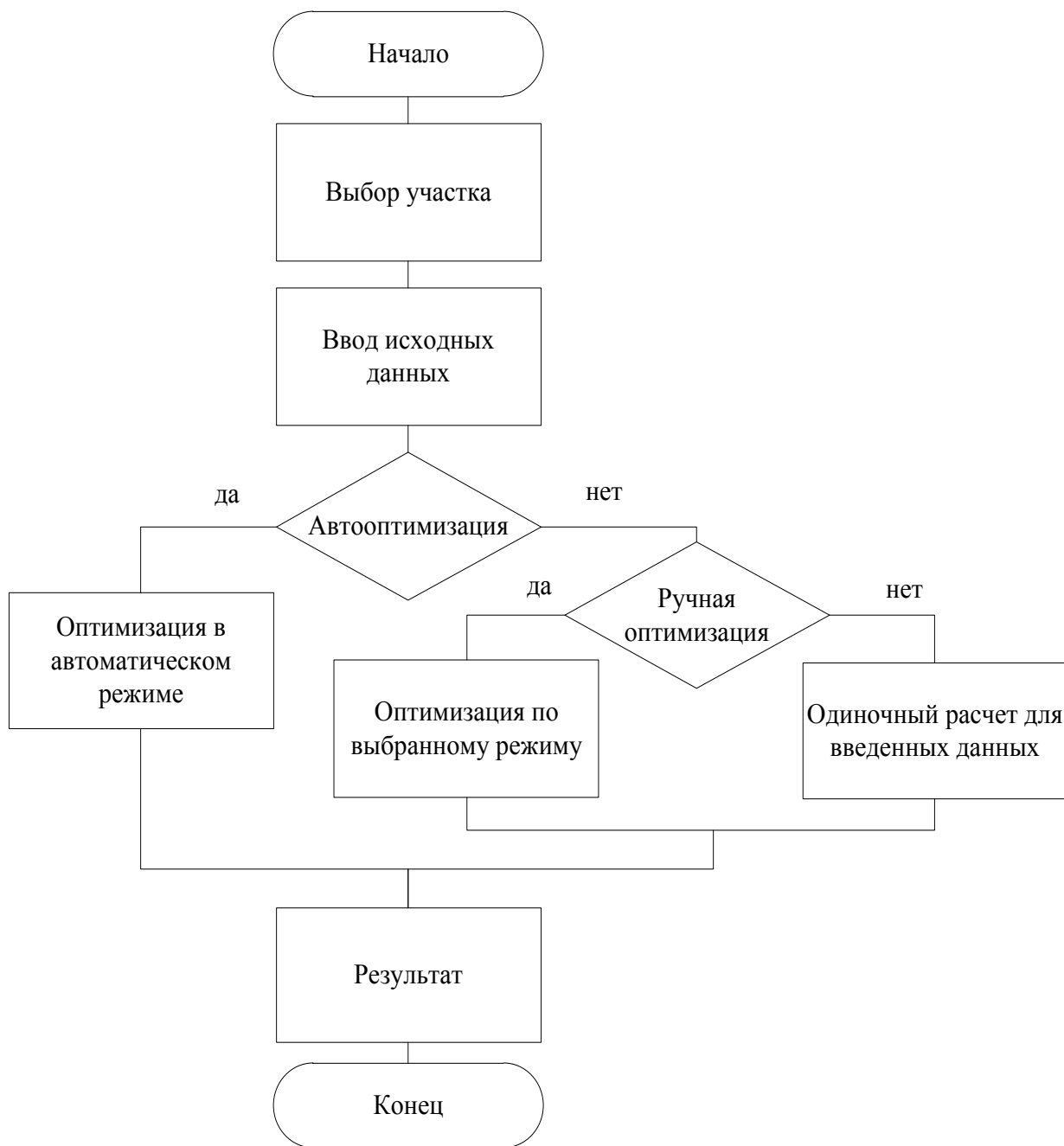


Рисунок 4.1 – Обобщенный алгоритм работы программы

Для начала работы следует, чтобы пользователь выбрал участок тяговой сети, для которого необходимо выполнить расчеты, а также исходные данные, а именно: выбрать схему питания, ввести шаг времени для расчетов, длину в километрах выбранного участка тяговой сети, уровень напряжения в вольтах на смежных подстанциях, минимально возможный интервал попутного

следования, максимально возможный интервал попутного следования, количество поездов на подходе к участку тяговой сети, для четного и нечетного пути – типы поездов, их порядок следования, интервалы между поездами. Пользователь может выбрать один из вариантов расчетов: одиночный расчет (рис. 4.2), ручную оптимизацию (рис. 4.3) или автооптимизацию (рис. 4.4). Результаты расчетов отображаются в виде ГДП, а также в виде оптимального порядка следования поездов и межпоездных интервалов (для оптимизационных режимов).

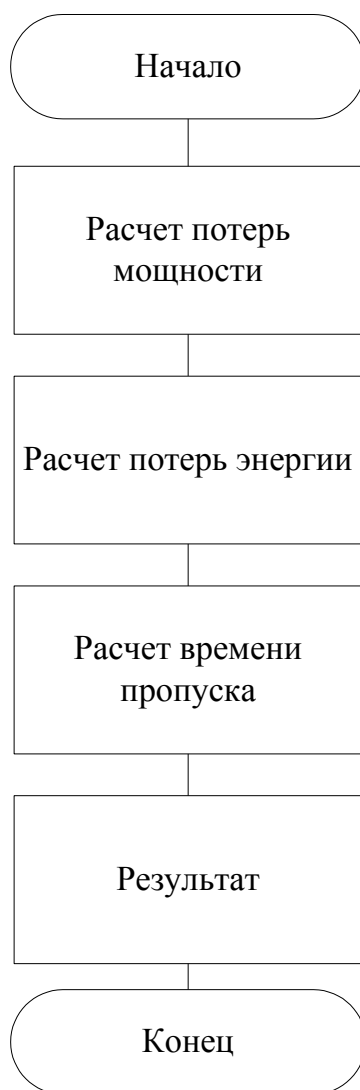


Рисунок 4.2 – Алгоритм одиночного расчета

При одиночном расчете (см. рис. 4.2) для введенных исходных данных (схемы питания, шага времени для расчетов, длины в километрах выбранного участка тяговой сети, уровня напряжения в вольтах на смежных подстанциях,

минимально возможного интервала попутного следования, максимально возможного интервала попутного следования, количества поездов на подходе к участку тяговой сети, для четного и нечетного пути типов поездов, их порядка следования, интервалов между поездами) производится расчет потерь мощности, электроэнергии и времени пропуска и строится ГДП.

При ручной оптимизации (см. рис. 4.3) пользователь, кроме выходных данных, выбирает один из режимов оптимизации: режим перестановок, режим интервалов или режим сдвига.

При режиме перестановок сначала находятся все возможные варианты перестановок порядка следования поездов. Для каждого варианта таких перестановок рассчитываются потери мощности, электроэнергии и время пропуска. После этого находится тот вариант порядка следования поездов, при котором потери мощности и электроэнергии минимальны.

При режиме интервалов сначала находятся все возможные варианты временных интервалов между поездами. Для каждого варианта межпоездных интервалов рассчитываются потери мощности, электроэнергии и время пропуска. После этого находится тот вариант временных интервалов между поездами, при котором потери мощности и электроэнергии минимальны.

При режиме сдвига пользователь должен сначала ввести дополнительные данные: номер пути, минимально возможный интервал попутного следования, максимально возможный интервал попутного следования, максимальное смещение по времени пакета поездов четного направления относительно пакета поездов нечетного направления, количество итераций. На каждой итерации сдвиг между пакетами поездов четного направления относительно пакета поездов нечетного направления увеличивается на единицу и для измененного значения смещения рассчитываются потери мощности, электроэнергии и время пропуска. После этого находится тот вариант смещения по времени пакета поездов четного направления относительно пакета поездов нечетного направления, при котором потери мощности и электроэнергии минимальны.

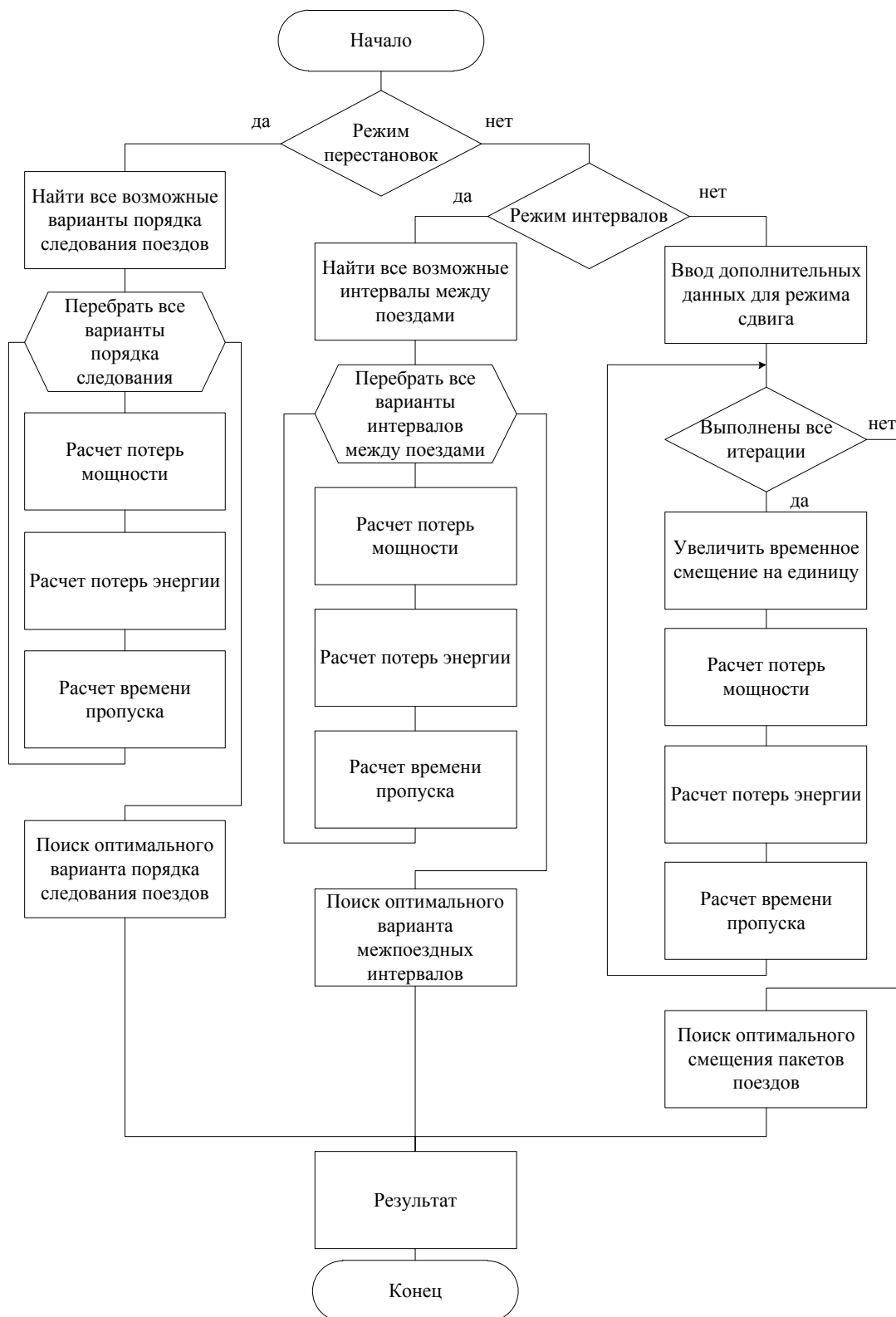


Рисунок 4.3 – Алгоритм поиска оптимального графика движения поездов в ручном режиме

В результате работы программы в режиме ручной оптимизации программа выдает ответ в виде оптимального варианта: порядка следования

поездов (для режима перестановок), временных интервалов между поездами (для режима интервалов), смещения по времени пакета поездов четного направления относительно пакета поездов нечетного направления (для режима смещения). Также программа выполняет построение ГДП на основе полученных результатов.

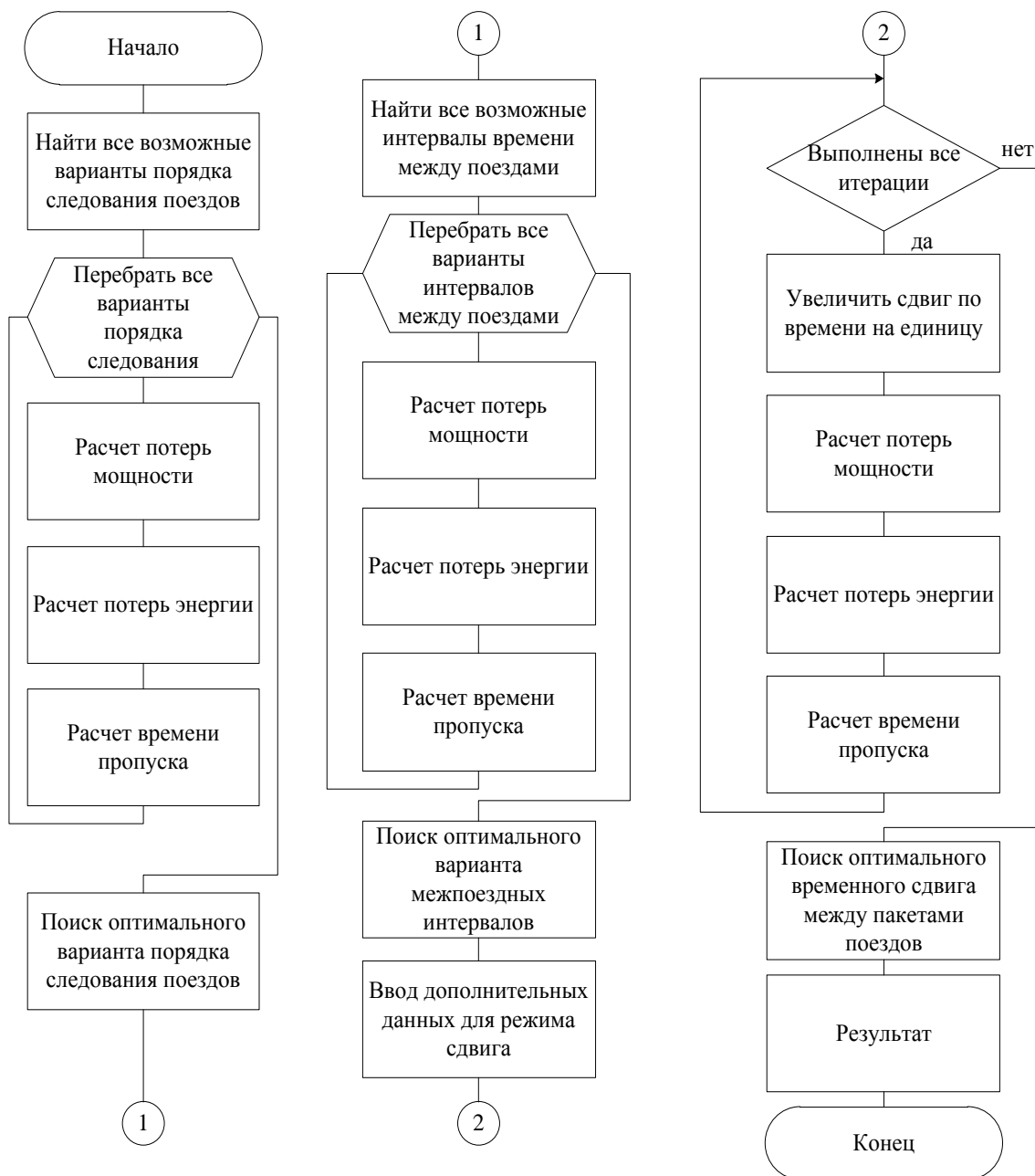


Рисунок 4.4 – Алгоритм оптимизации в автоматическом режиме

При автоматической оптимизации (см. рис. 4.4) программа делает расчеты во всех трех режимах: перестановок, интервалов и смещения.

В начале работы алгоритма находятся все возможные варианты перестановок порядка следования поездов для четного и нечетного направлений следования. Для каждого варианта таких перестановок рассчитываются потери мощности, электроэнергии и время пропуска. После этого определяется тот вариант порядка следования поездов, при котором потери мощности и энергии минимальны.

Далее определяются все возможные варианты временных интервалов между поездами для найденного оптимального порядка следования поездов. Для каждого варианта межпоездных интервалов рассчитываются потери мощности, электроэнергии и время пропуска. Затем определяется тот вариант временных интервалов между поездами, при котором потери мощности и электроэнергии минимальны.

После этого определяются все возможные варианты временного сдвига между пакетами поездов четного направления относительно пакета поездов нечетного направления для найденных оптимального порядка следования поездов и оптимальных межпоездных интервалов. При режиме сдвига пользователь должен сначала ввести дополнительные данные: минимально возможный интервал попутного следования, максимально возможный интервал попутного следования, максимальное смещение по времени пакета поездов четного направления относительно пакета поездов нечетного направления, количество итераций. На каждой итерации сдвиг между пакетами поездов четного направления относительно пакета поездов нечетного направления увеличивается на единицу и на каждом шаге рассчитываются потери мощности, электроэнергии и время пропуска. Затем определяется тот вариант смещения по времени пакета поездов четного направления относительно пакета поездов нечетного направления, при котором потери мощности и электроэнергии минимальны.

В результате работы в автоматическом режиме оптимизации программа выдает ответ в виде оптимального варианта порядка следования поездов, временных интервалов между поездами, смещения по времени пакета поездов

четного направления относительно пакета поездов нечетного направления. Также программа выполняет построение ГДП на основе полученных результатов.

#### 4.1.2 Структура программы, технические средства

Для описания структуры программы была выбрана диаграмма компонентов (рис. 4.5), которая отражает особенности физического представления системы и позволяет определить архитектуру разрабатываемой системы.

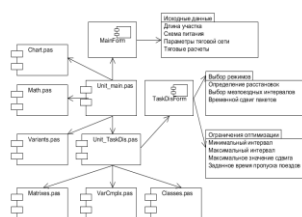


Рисунок 4.5 – Диаграмма компонентов

Для корректного функционирования программного продукта требуется наличие ЭВМ, которая сможет обеспечить нормальную работу ОС Windows 98/XP/Vista/Seven.

Минимальная конфигурация компьютера для обеспечения работы программного продукта:

- IBM-совместимый компьютер с тактовой частотой процессора не менее 1 ГГц;
- ОЗУ не менее 512 Мб;
- свободное дисковое пространство не менее 200 Мб;
- наличие CD/DVD привода или USB разъема для установки необходимого ПО;
- монитор с разрешением экрана не менее 1280x800;
- стандартные клавиатура и манипулятор «мышь».

#### 4.1.3 Описание интерфейса пользователя

После запуска исполняемого файла программы на экран выведется главное окно программы «Автоматизированная система составления энергоэффективного графике движения поездов «Поток». Окно «Оптимизация параметров транспортного потока» позволяет ввести исходные данные, выбрать режим оптимизации, просмотреть ее результаты оптимизации. Главное окно программы визуально разделено на функциональные области – панели.

Панель «Исходные данные» (рис. 4.6) предназначена для ввода исходных данных. Она дает возможность ввести следующие данные: участок тяговой сети, для которого необходимо выполнить расчеты; схему питания; шаг времени, который влияет на точность расчетов; длину в километрах выбранного участка тяговой сети; уровень напряжения в вольтах на смежных подстанциях; минимально возможный интервал попутного следования ( $J_{\min}$ ); максимально возможный интервал попутного следования ( $J_{\max}$ ); количество поездов на подходе к участку тяговой сети; для четного и нечетного пути типы поездов, их порядок следования, интервалы между поездами.

Панель «Режим» предназначена для выбора режима оптимизации. Она дает возможность выбрать один из трех возможных режимов: режим перестановки, режим интервалов, режим сдвига.

Для выбора режима перестановки необходимо установить переключатель в положение «Перестановок». При этом в специальном поле будет выведено

количество и варианты возможных перестановок порядка отправления поездов, которые выполнит программа при моделировании различных ГДП.

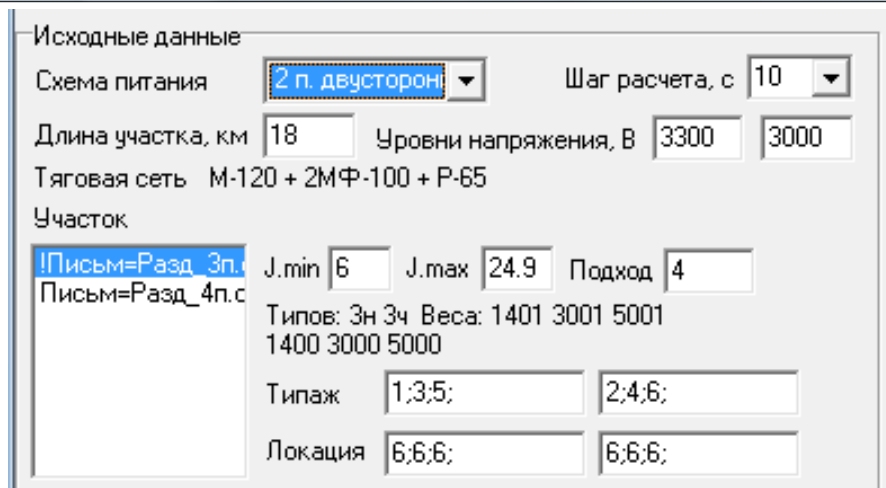
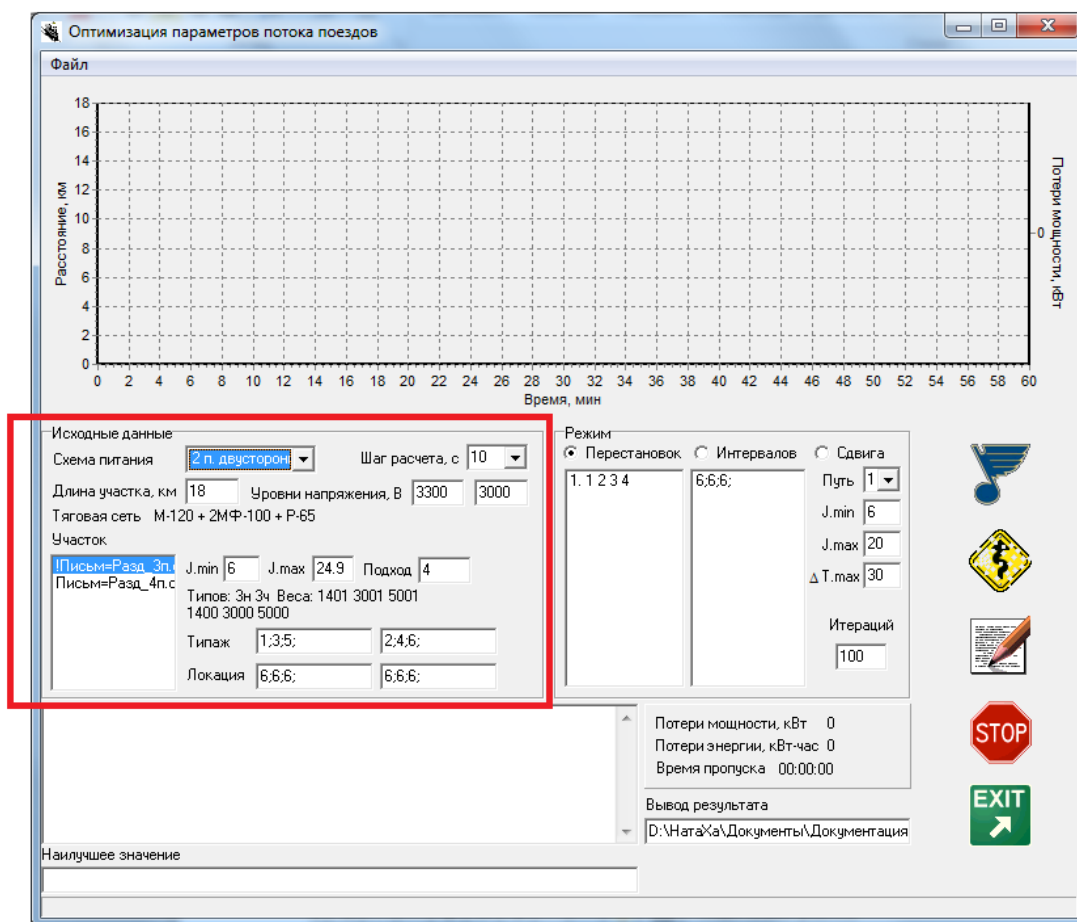


Рисунок 4.6 – Панель «Исходные данные» главного окна программы

Для выбора режима интервалов необходимо установить переключатель в положение «Интервалов». При этом в специальном поле будет выведено

количество и варианты возможных перестановок интервалов между поездами, которые выполнит программа при моделировании различных ГДП.

Для выбора режима сдвига необходимо установить переключатель в положение «Сдвигов». Для режима сдвига необходимо ввести дополнительные параметры: номер пути (для одиночного расчета), минимально возможный интервал попутного следования ( $J_{\min}$ ), максимально возможный интервал попутного следования ( $J_{\max}$ ), максимальное смещение по времени ( $\Delta T_{\max}$ ), количество итераций.

Для начала расчетов необходимо нажать кнопку «Одиночный расчет» (для выполнения одного типа расчета для введенных исходных данных без поиска оптимальных вариантов построения ГДП), или кнопку «Ручная оптимизация» (для поиска оптимального графика движения поездов по выбранному режиму оптимизации), или кнопку «Автооптимизация» (для поиска оптимального ГДП по всем режимам расчетов). Прервать выполнение расчетов можно, нажав кнопку «Остановить».

На панели вывода текущих результатов расчета можно просмотреть текущие результаты расчета: потери мощности, потери электроэнергии, время пропуска. Подробную информацию о результатах расчетов (потери мощности, потери энергии, время пропуска) на каждом этапе расчетов можно посмотреть на панели результатов расчета. Результат работы программы можно увидеть на панели «Наилучшее значение». Лучший результат содержит номер итерации, на которой было найдено лучшее решение, оптимальные интервалы между поездами, оптимальный порядок отправления поездов. После завершения работы программы, результаты можно просмотреть в виде оптимального ГДП (рис. 4.7).

Результаты работы программы можно сохранить в файл. Для этого следует указать путь к файлу в специальном поле. Для выхода из программы необходимо нажать кнопку «Выход».

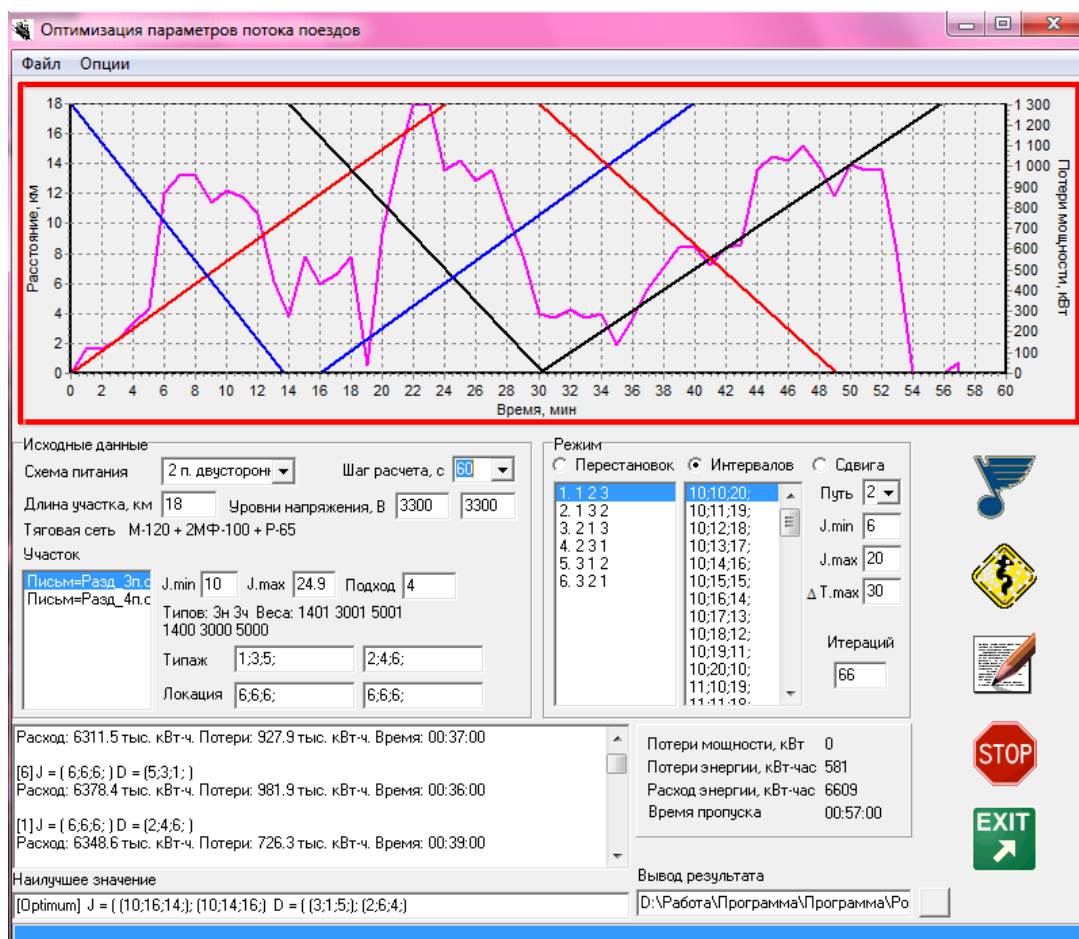


Рисунок 4.7 – Оптимальный ГДП

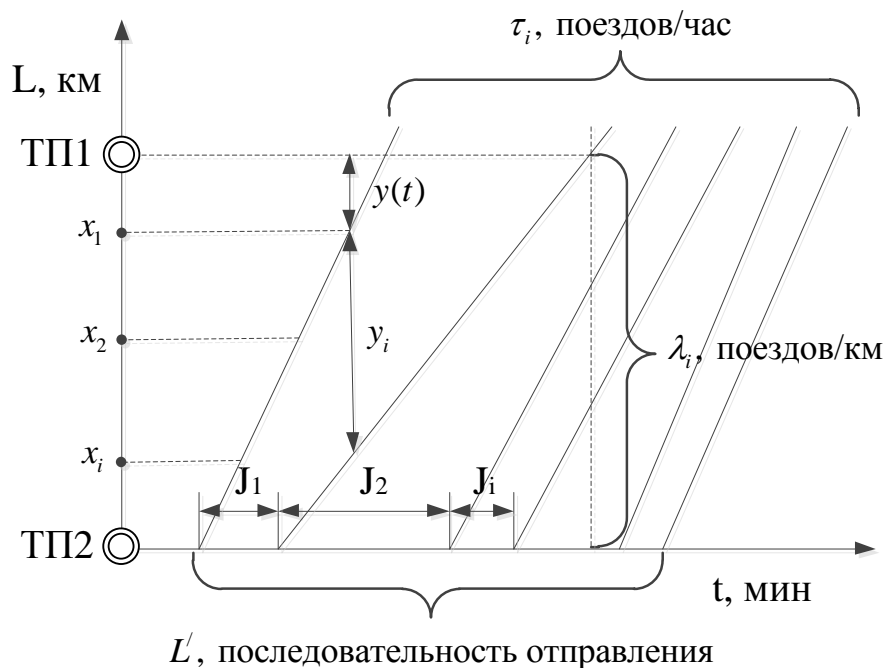
Порядок работы с ПК «Поток» приведен в прил. Г, свидетельство регистрации авторского права приведено в прил. Д.

## 4.2 Реализация научных принципов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок

Решение задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети состоит в поиске такого ГДП, при котором осуществляется пропуск заданных размеров движения с наименьшими энергозатратами. Сущность задачи заключается в определении потерь электроэнергии в тяговой сети путем

расчета схем для ряда моментов времени, в каждом из которых количество, конфигурации и величина нагрузки определяются ГДП.

Для выбора наиболее выгодного расположения тяговых нагрузок на ГДП по величине потерь электроэнергии в тяговой сети следует рассмотреть ряд реально возможных вариантов графиков при заданных категориях поездов. Варианты графиков рассматриваются между смежными ТП в пределах периода следования расчетного поезда. Принцип проектирования ГДП представлен на рис. 4.8. Фрагмент исполненного ГДП электрифицированного участка Приднепровской ж.д. показан на рис. 4.9.



$L$  – расстояние между тяговыми подстанциями;  $x_1, x_2, x_i$  – дислокация поездов между тяговыми подстанциями;  $y(t)$  – расстояние между тяговой подстанцией и  $i$ -м поездом;  $y_i$  – расстояние между поездами;  $L'$  – последовательность отправления поездов;  $J_1, J_2, J_i$  – интервалы между поездами;  $\lambda_i$  – плотность транспортного потока;  $\tau_i$  – интенсивность транспортного потока

Рисунок 4.8 – Проектирование ГДП с учетом дислокации тяговых нагрузок и последовательности отправления поездов различных категорий

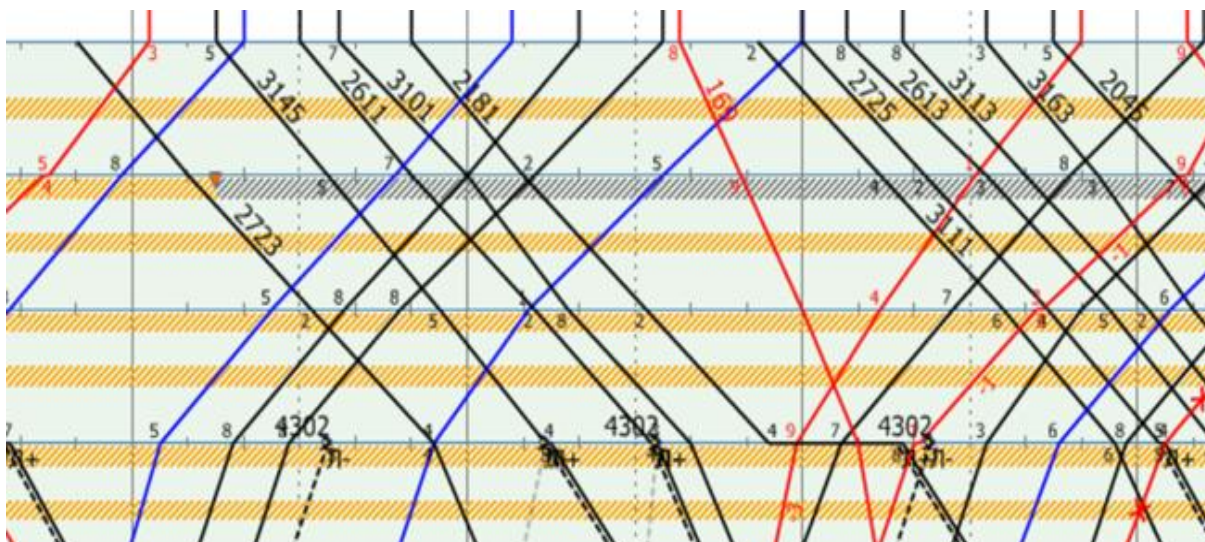


Рисунок 4.9 – Исполненный ГДП электрифицированного участка Приднепровской ж.д.

На основе выполненных расчетов устанавливаются наивыгоднейшие интервалы между поездами различных категорий при действующей мощности энергоснабжающих устройств. Этими интервалами руководствуются графисты при составлении ГДП, а также поездные диспетчеры и диспетчеры энергоснабжения при регулировке движения поездов. Расчеты сводятся к определению потерь электроэнергии в тяговой сети при различных схемах расположения поездов на графике движения.

#### 4.2.1 Уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока за счет выбора рациональной последовательности отправления поездов различных категорий

Выполним моделирование пропуска 6 поездов (3 поезда четного и 3 поезда нечетного направления) для двухпутного участка постоянного тока Приднепровской железной дороги со следующими исходными данными:

- 1) расстояние между тяговыми подстанциями – 18 км;
- 2) токи, потребляемые поездами  $I(L)$ ,  $L \in [L_n, L_k]$ ;
- 3) скорости движения поездов  $V(L)$ ,  $L \in [L_n, L_k]$ ;

4) удельное сопротивление тяговой сети  $r = 0,07$  Ом/км;

5) сечение проводов КС – 412 мм<sup>2</sup>.

Схема участка приведена на рис. 4.10.

Характеристики поездов представлены в табл. 4.1. При выполнении расчетов принято допущение, что режим напряжения для ЭПС каждого поезда в пакете не нарушается, задача ограничивается фиксированным временем пропуска заданного количества поездов по участку (1 час).

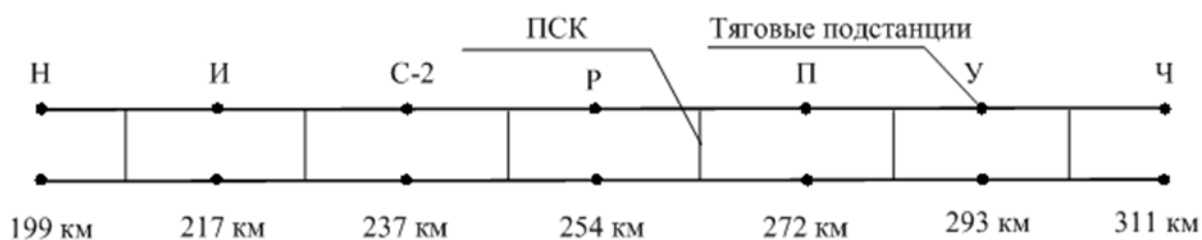


Рисунок 4.10 – Схема электрифицированного участка Приднепровской ж.д.

Таблица 4.1 – Характеристики поездов различных категорий

№ категории поезда	Характеристики		
	Тип поезда	Масса	Серия электровоза
1	Грузовой	1 400	ВЛ-8
2	Грузовой	3 000	ДЭ-1
3	Грузовой	5 000	ВЛ-8

Определим потери электроэнергии в тяговой сети с учетом последовательности отправления поездов 3 различных категорий (массой 1 400, 3 000 и 5 000 т) в четном и нечетном направлениях со средним интервалом между поездами равным 10 мин. Присвоим нечетным поездам № 1,3,5; четным № 2,4,6, причем 1-й категории соответствуют номера поездов № 1, № 2, 2-й категории – № 2, № 4, 3-й категории – № 3, № 6 (в условиях данной задачи количество перестановок соответствует  $6! = 720$ ). Результаты расчетов приведены в табл. 4.2.

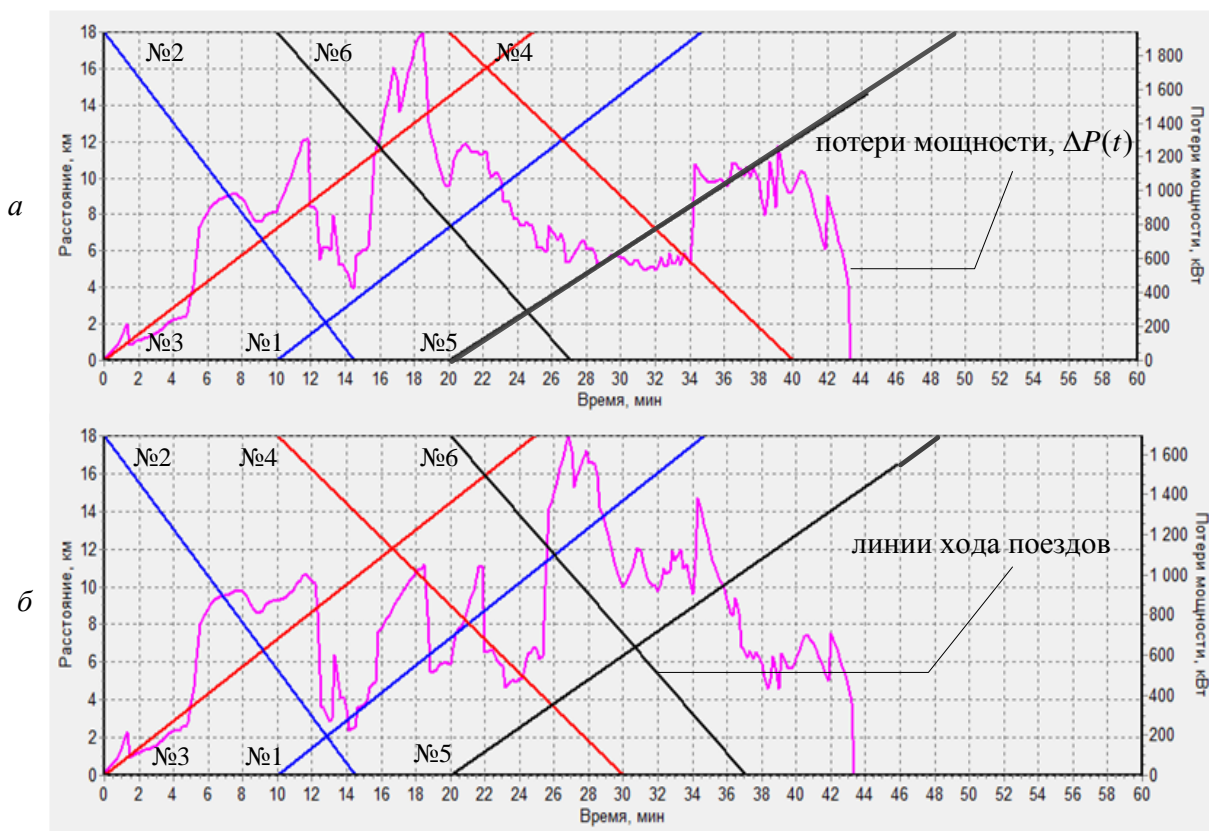
Таблица 4.2 – Потери электроэнергии, тыс. кВт·ч, при различной последовательности отправления поездов

№ п/п	Последовательность отправления поездов	Потери электроэнергии при схеме питания контактной сети, тыс. кВт·ч		
		двухсторонней	узловой	параллельной
1	1,3,5,2,4,6	629,5	552,1	528,5
2	1,5,3,2,4,6	746,3	698,0	662,0
3	3,1,5,2,4,6	621,9	539,2	516,1
4	3,5,1,2,4,6	695,6	658,2	622,0
5	5,1,3,2,4,6	704,0	639,3	601,2
6	5,3,1,2,4,6	757,7	671,4	622,5
	...	...	...	...
716	3,1,5,2,6,4	607,5	541,6	512,7
717	3,1,5,4,2,6	623,4	553,9	529,9
718	3,1,5,4,6,2	626,4	556,6	525,3
719	3,1,5,6,2,4	611,5	552,6	524,0
720	3,1,5,6,4,2	621,9	550,3	516,1

По результатам расчетов, представленных в табл. 4.2, минимальные потери электроэнергии при различной последовательности отправления поездов: двухсторонняя схема – 607,5 тыс. кВт·ч (вариант № 716), узловая схема – 539,2 тыс. кВт·ч (вариант №3), параллельная схема – 512,7 тыс. кВт·ч (вариант № 716).

Пределы изменения величины потерь электроэнергии в зависимости от последовательности отправления поездов различных категорий для различных схем питания составляют 20-23 % (двухсторонняя – 20 %, узловая и параллельная – 23 %).

ГДП, минимизирующие потери электроэнергии в тяговой сети с учетом оптимальной последовательности отправления поездов, показаны на рис. 4.11.



*а* – двухсторонняя и параллельная; *б* – узловая

Рисунок 4.11 – ГДП, обеспечивающие минимум потерь электроэнергии в тяговой сети с учетом оптимальной последовательности отправления поездов для различных схем питания

#### 4.2.2 Уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока за счет выбора рациональных интервалов между поездами

Выполним моделирование пропуска 6-ти поездов (3 поезда четного и 3 поезда нечетного направления) и определим потери электроэнергии в тяговой сети с различными интервалами между поездами с учетом взаимного расположения поездов в четном и нечетном направлениях.

Формализуем задачу, введя обозначения на ГДП в общем виде (рис. 4.12).

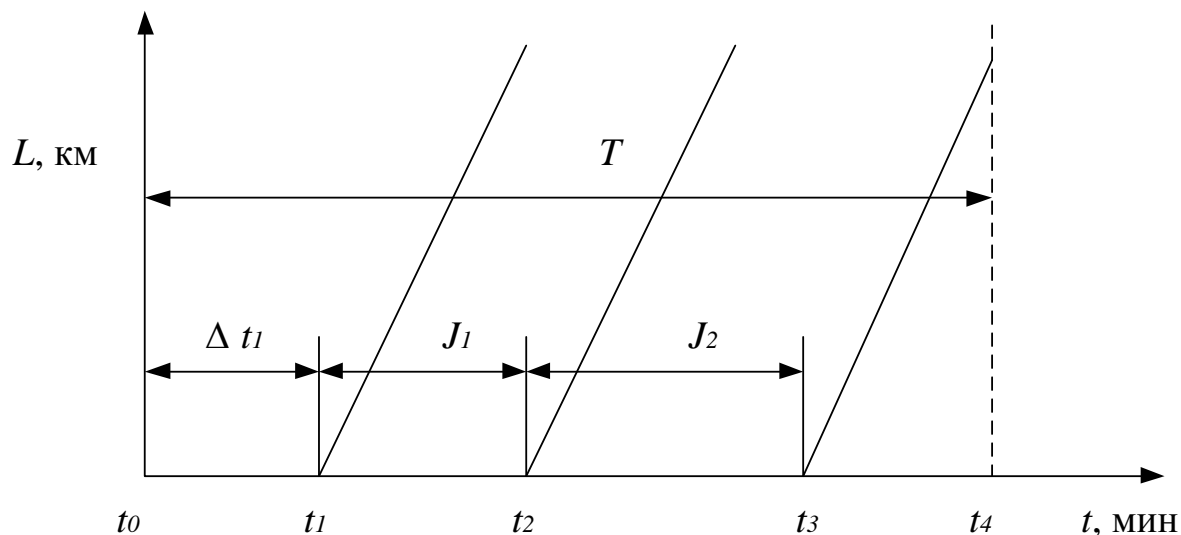


Рисунок 4.12 – Расчетная схема параметров графика движения поездов

Время пропуска пакета  $T$  в общем виде определяется выражением

$$T = \Delta t_1 + J_1 + J_2 + (t_4 - t_3), \quad (4.1)$$

где  $\Delta t_1$  – задержка времени отправления первого поезда в пакете, мин;

$J_1, J_2$  – межпоездные интервалы, мин;

$(t_4 - t_3)$  – время хода последнего поезда в пакете, мин.

Учитывая принятое ограничение, получаем уравнение, определяющее независимые параметры ГДП:

$$\Delta t_1 + J_1 + J_2 = T - (t_4 - t_3) = \text{const}. \quad (4.2)$$

Для обеспечения такого режима моделирования необходимо поддерживать постоянную сумму интервалов между поездами при их различных комбинациях (в условиях данной задачи количество вариантов соответствует  $66! = 5,4434494 \cdot 10^{92}$ ). Результаты расчетов приведены в табл. 4.3.

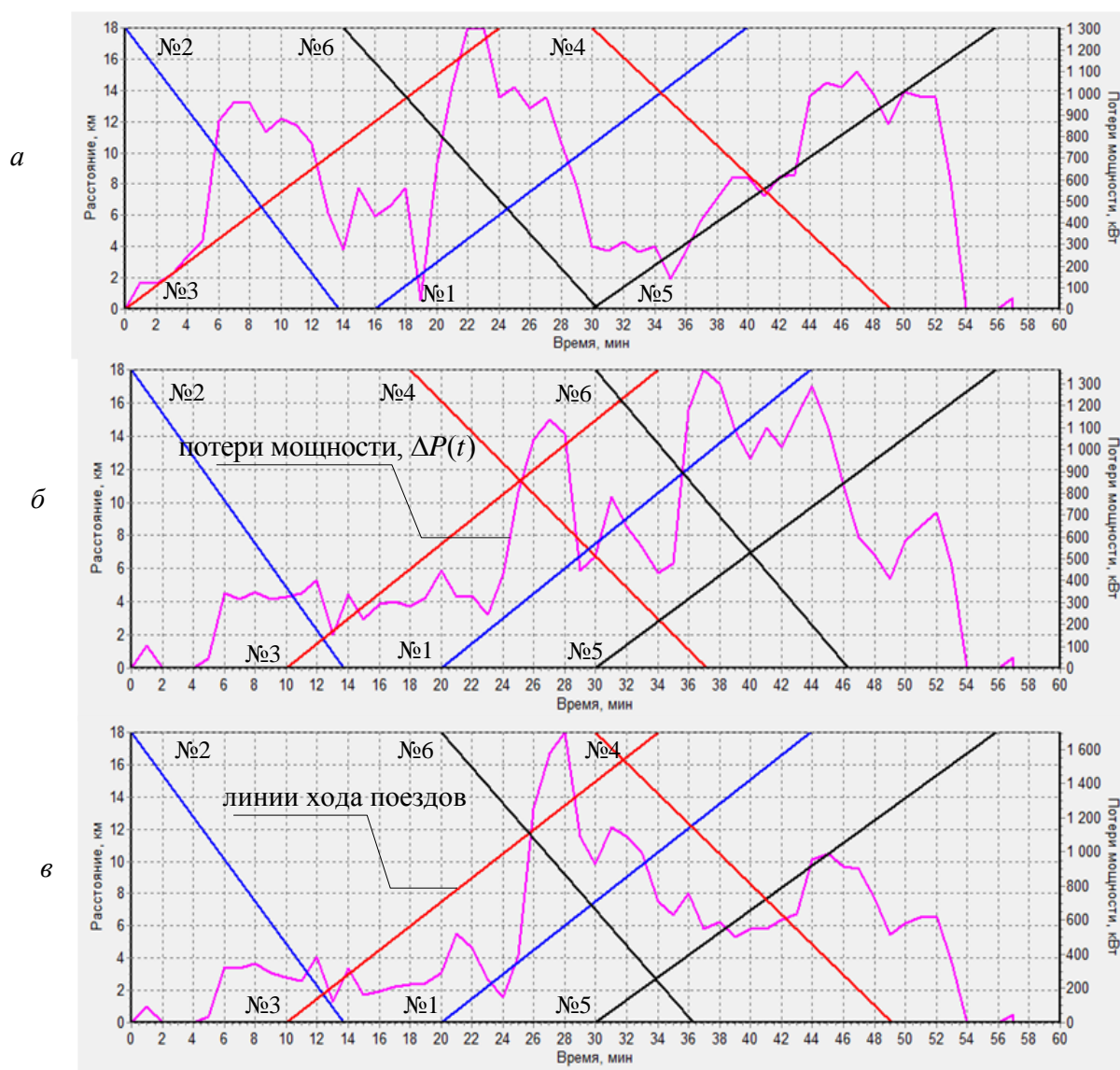
Таким образом, на основе эвристического алгоритма определены рациональные интервалы между поездами при различных схемах питания.

Таблица 4.3 – Потери электроэнергии, тыс. кВт · ч, с различными интервалами между поездами, мин.

№ п/п	Интервалы между поездами		Потери электроэнергии при схеме питания контактной сети		
	По 1-му пути	По 2-му пути	двухсторонней	узловой	параллельной
1	$J_1 = 10; J_2 = 20$	$J_1 = 10;$ $J_2 = 10$	626,4	582,7	518,1
2	$J_1 = 11; J_2 = 19$	$J_1 = 10;$ $J_2 = 10$	622,2	575,4	511,5
3	$J_1 = 12; J_2 = 18$	$J_1 = 10;$ $J_2 = 10$	618,2	568,3	505,1
4	$J_1 = 13; J_2 = 17$	$J_1 = 10;$ $J_2 = 10$	615,5	562,0	499,5
5	$J_1 = 14; J_2 = 16$	$J_1 = 10;$ $J_2 = 10$	613,7	556,6	494,9
6	$J_1 = 15; J_2 = 15$	$J_1 = 10;$ $J_2 = 10$	612,5	552,2	491,0
7	$J_1 = 16; J_2 = 14$	$J_1 = 10;$ $J_2 = 10$	612,5	549,0	488,3
8	$J_1 = 17; J_2 = 13$	$J_1 = 10;$ $J_2 = 10$	612,7	546,6	485,6
9	$J_1 = 18; J_2 = 12$	$J_1 = 10;$ $J_2 = 10$	614,0	545,4	483,9
10	$J_1 = 19; J_2 = 11$	$J_1 = 10;$ $J_2 = 10$	616,0	545,1	482,5
11	$J_1 = 20; J_2 = 10$	$J_1 = 10;$ $J_2 = 10$	618,3	545,4	481,3
12	$\Delta t = 1; J_1 = 10;$ $J_2 = 19$	$J_1 = 10;$ $J_2 = 10$	626,5	581,7	513,1
...	...	...	...	...	...

Для нечетных поездов: двухсторонняя схема –  $J_1 = 16; J_2 = 14$ , узловая и параллельная –  $\Delta t = 10, J_1 = 10, J_2 = 10$ ; для четных поездов: двухсторонняя схема –  $J_1 = 14; J_2 = 16$ , узловая –  $J_1 = 18; J_2 = 12$ , параллельная –  $J_1 = 20, J_2 = 10$ . При соблюдении данных интервалов потери электроэнергии в тяговой

сети минимальные и составляют: двухсторонняя схема – 580,8 тыс. кВт·ч, узловая – 508,8 тыс. кВт·ч, параллельная – 480,6 тыс. кВт·ч. Пределы изменения величины потерь электроэнергии в зависимости от интервалов между поездами и взаимного расположения поездов для различных схем питания составляет 23–27 % (двухсторонняя – 23 %, узловая и параллельная – 27 %). ГДП, минимизирующие потери электроэнергии в тяговой сети с учетом рациональных интервалов между поездами, показаны на рис. 4.13.



а – двухсторонняя; б – узловая; в – параллельная

Рисунок 4.13 – ГДП, обеспечивающие минимум потерь электроэнергии в тяговой сети с учетом интервалов между поездами для различных схем питания

#### 4.2.3 Уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети

постоянного тока за счет выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок на участке Приднепровской железной дороги

Выполним моделирование пропуска 6 поездов (3 поезда четного и 3 поезда нечетного направления) и определим потери электроэнергии в тяговой сети с учетом дислокации поездов между ТП. Результаты расчетов приведены в табл. 4.4–4.6.

Таблица 4.4 – Потери мощности с учетом дислокации поездов между ТП при двухсторонней схеме питания

Дислокация и оптимальные расстояния между поездами, км			Потери мощности в тяговой сети, кВт
Дислокация 1-го поезда $x_1$	Дислокация 2-го поезда $x_2$	Дислокация 3-го поезда $x_3$	
0,1	1,1	2,3	656,7
0,2	1,2	2,3	657,5
0,3	1,3	2,3	1 067,0
0,4	1,4	2,4	1 424,0
0,5	1,5	3,9	1 341,0
0,6	1,6	3,9	1 562,0
...	...	...	...
15,6	16,6	17,6	851
15,7	16,7	17,7	846

Таким образом, на основе метода деформируемого многогранника определены потери электроэнергии в тяговой сети с учетом дислокации тяговых нагрузок между ТП. Результаты расчета минимальных потерь электроэнергии с учетом дислокации тяговых нагрузок соответствуют значениям потерь электроэнергии с учетом интервалов между поездами: двухсторонняя схема – 580,8 тыс. кВт·ч, узловая – 508,8 тыс. кВт·ч, параллельная – 480,6 тыс. кВт·ч.

Пределы изменения величины потерь электроэнергии в зависимости от дислокации тяговых нагрузок для различных схем питания составляют 23–27 % (двухсторонняя – 23 %, узловая и параллельная – 27 %). ГДП,

минимизирующие потери электроэнергии в тяговой сети с учетом дислокации тяговых нагрузок, соответствуют ГДП, представленным на рис. 4.13.

Таблица 4.5 – Потери мощности с учетом дислокации тяговых нагрузок между ТП при узловой схеме питания

Дислокация и оптимальные расстояния между поездами (км)			Потери мощности в тяговой сети, кВт
Дислокация 1-го поезда $x_1$ , км	Дислокация 2-го поезда $x_2$ , км	Дислокация 3-го поезда $x_3$ , км	
0,1	1,1	2,1	720
0,2	1,2	2,2	646
0,3	1,3	2,3	1 035
0,4	1,4	2,4	1 414
0,5	1,5	2,5	1 340
0,6	1,6	2,6	1 542
...	...	...	...
15,6	16,6	17,6	821
15,7	16,7	17,7	814

Таблица 4.6 – Потери мощности с учетом дислокации тяговых нагрузок между ТП при параллельной схеме питания

Дислокация и оптимальные расстояния между поездами (км)			Потери мощности в тяговой сети, кВт
Дислокация 1-го поезда $x_1$ , км	Дислокация 2-го поезда $x_2$ , км	Дислокация 3-го поезда $x_3$ , км	
0,1	1,1	2,1	360
0,2	1,2	2,2	328
0,3	1,3	2,3	533
0,4	1,4	2,4	712
0,5	1,5	3,9	670
0,6	1,6	3,9	781
...	...	...	...
15,6	16,6	17,6	425
15,7	16,7	17,7	423

### 4.3 Экономическая эффективность применения методов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет составления энергоэффективных графиков движения поездов

#### 4.3.1 Показатели экономической эффективности

Для оценки экономической эффективности внедрения модернизированного метода составления ГДП и программного комплекса «Поток», обеспечивающих минимум потерь электроэнергии в тяговой сети, использовалась методика [148]. Она позволяет рассчитать интегральный экономический эффект от дополнительных инвестиций для каждого периода в течение срока действия проекта, а также определить срок окупаемости.

Для стоимостной оценки результатов и затрат использовались базисные цены в гривнах, сложившиеся на начало 2013 года.

Проведем расчет экономической эффективности использования рациональных ГДП, полученных согласно методике, разработанной в диссертации. Сравнение производится с исполненными ГДП, реализованными существующим способом регулирования транспортного потока. Оценка и прогнозирование предстоящих затрат и результатов осуществлялись в пределах расчетного периода ( $T$ ) – 1 год.

К основным показателям как общей, так и сравнительной эффективности, аккумулирующим выгоду от внедрения научно-технических разработок и использовался для оценки экономической эффективности проектов, относятся [148–155]:

- чистый дисконтированный доход  $ЧДД$  или суммарный интегральный эффект;
- индекс доходности ИД;
- срок окупаемости инвестиций в реализации проекта  $T_0$ .

#### 4.3.2 Расчет капитальных вложений и эксплуатационных расходов

Под капитальными вложениями на транспорте понимают совокупность затрат, направляемых на приобретение технических средств или создание новых объектов. В составе капитальных вложений учитывается стоимость строительно-монтажных, проектно-изыскательских работ, оборудования, инвентаря, инструмента и прочие затраты. В данном случае необходимые капитальные вложения приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7 – Капитальные вложения

№ п/п	Наименование затрат	Сумма, тыс. грн
1	Разработка методики расчета рациональных ГДП	5
2	Стоимость программного обеспечения	10
3	Корректировка, адаптация, обучение персонала	5
4	Прочие затраты	2
Итого		23

Таким образом, сумма договора с заказчиком составит 23 тыс. грн., включая все налоги, аванс составляет 50 % суммы; проект подобной сложности может быть реально осуществлен за 3 мес.

На заключительных этапах изысканий и разработки программного обеспечения необходимо адаптировать программный комплекс к реальным условиям, а также обучить персонал. На это все уйдет сумма порядка 5 тыс. грн.

Непредвиденные затраты, по существующей методике расчетов, принимаются приблизительно равными 10 % суммы всех остальных затрат.

Для сравнения эксплуатационных расходов применения энергооптимальных ГДП и существующих были выполнены расчеты потерь электроэнергии в тяговой сети для электрифицированного участка постоянного тока Приднепровской ж.д. за 2012 год. Результаты расчетов приведены в табл. 4.8.

Таблица 4.8 – Сравнение экономической эффективности

Параметр	Исполненные ГДП	Энергооптимальные ГДП
Интенсивность $\tau$ , поездов/сут	107	
Работа, тыс. т·км бр.	8 857 603	
Средняя масса поезда брутто $Q_{бр}$ , т	3 133	
Потери электроэнергии $\Delta W$ , тыс. кВт·ч	10 057,47	8 469,46
Стоимость потерь $C$ , тыс. грн	9 956,9	8 384,8

При стоимости электроэнергии 0,99 грн/кВт·ч, экономия в денежном эквиваленте составляет 1 572 тыс. грн в год.

#### 4.3.3 Оценка экономического эффекта

В соответствии с данными п. 4.2-4.4, получены следующие значения показателей экономической эффективности:

- 1) чистый дисконтированный доход для расчетного периода 1 год  
ЧДД = 1 429 000 грн;
- 2) индекс доходности ИД = 68,35;
- 3) срок окупаемости  $T_0$  составил около 1 месяца.

Таким образом, инновация окупается в пределах одного месяца после сдачи программного комплекса в эксплуатацию.

### Выводы к разделу 4

1. Разработанный программный комплекс по оптимизации режимов СТЭ позволяет подбирать режимы, обеспечивающие минимум потерь электроэнергии в тяговой сети за счет составления энергоэффективных ГДП. Выполнена экспериментальная проверка теоретических положений путем имитационного моделирования с использованием программного комплекса «Поток».

2. Установлены возможности изменения величины потерь электроэнергии в зависимости от:

- последовательности отправления поездов для различных схем питания – 20-23 % (двухсторонняя – 20 %, узловая и параллельная – 23 %).
- дислокации и интервалов между тяговыми нагрузками для различных схем питания составляет 23–27 % (двухсторонняя – 23 %, узловая и параллельная – 27 %).

Таким образом можно уменьшить потери электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок на 2-3 % от уровня расхода на тягу поездов.

3. Проведенные технико-экономические расчеты подтвердили эффективность применения методов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок. Чистый дисконтированный доход для электрифицированных участков Приднепровской ж.д. за 1 год составляет 1,4 млн грн. Расчетный срок окупаемости предложенных мероприятий – 1 месяц.

## ВЫВОДЫ

Диссертационная работа является оконченной научной работой, в которой на основе теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая задача уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок.

Основные результаты и выводы состоят в следующем.

1. Анализ современного состояния задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети показал, что существуют дополнительные резервы снижения потерь путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок, регулирования транспортного потока. В предыдущих исследованиях не рассматривались резервы уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора: дислокации поездов между ТП, последовательности отправления поездов различных категорий, интервалов между поездами.
2. С использованием разработанной модели СТЭ установлена возможность регулирования интервалов между тяговыми нагрузками в целях уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети. В результате исследований, проведенных для электрифицированного участка Приднепровской ж.д. , установлено, что величина потерь электроэнергии в тяговой сети изменяется в пределах от 2 588,1 до 2 833,6 кВт·ч при изменении интервала между поездами в пределах от 6 до 15 мин, разница составляет 8,7 % от уровня потерь. Установлен потенциал уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем уменьшения неравномерности транспортного потока: для схемы двухстороннего питания величина потерь изменяется на 18,9 %; для узловой схемы питания – на 11,1 %.

3. Разработанная модель транспортного потока позволяет установить пределы изменения его показателей. В данной модели ж.д. станция представлена как трансформатор транспортного потока, что позволяет при расчетах потерь электроэнергии в тяговой сети учитывать влияние показателей транспортного потока на величину потерь. В результате исследований, проведенных для электрифицированного участка Приднепровской ж.д., установлены предельные показатели транспортного потока по условиям работы СТЭ: максимальная интенсивность транспортного потока – 7,68 поезда/ч, максимальная плотность транспортного потока – 0,128 поезда/км. Установлено, что при управлении транспортным потоком необходимо регулировать его показатели в целях создания равномерной нагрузки на ТП и уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети.
4. Разработанная математическая модель энергооптимальной дислокации тяговых нагрузок между ТП позволяет выбирать схемы расположения тяговых нагрузок между ТП на каждом шаге времени, при которых потери электроэнергии в тяговой сети минимальны. Предложен подход, при котором расстояния между тяговыми нагрузками представлены как ребра многогранника. Ограничения по безопасности движения поездов учитываются следующим образом: минимальная длина ребра должна быть не меньше длины блок-участка устройств СЦБ, максимальная – не более длины рассматриваемого участка.
5. Сформулированный принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети на основе метода деформируемого многогранника позволяет рассчитывать оптимальные расстояния между тяговыми нагрузками для построения энергоэффективных ГДП. Рассмотрены ситуации для различного количества поездов между ТП. Предложен принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети на основе эвристического алгоритма поиска минимума функции списка за счет выбора оптимальной последовательности отправления и интервалов

- между поездами. При этом последовательность поездов различных категорий представляется как список, а каждой последовательности отправления поездов различных категорий сопоставляется определенное значение потерь электроэнергии в тяговой сети.
6. Разработан программный комплекс для составления энергоэффективных ГДП. В результате экспериментальной проверки теоретических положений диссертации, проведенной с использованием программного комплекса «Поток», путем имитационного моделирования установлены пределы изменения величины потерь электроэнергии в зависимости от: последовательности отправления поездов для различных схем питания – 20-23 % (двухсторонняя – 20 %, узловая и параллельная – 23 %); дислокации и интервалов между тяговыми нагрузками – 23–27 % (двухсторонняя – 23 %, узловая и параллельная – 27 %). Таким образом, можно уменьшить потери электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок на 2-3 % от уровня расхода на тягу поездов.
  7. Проведенные технико-экономические расчеты подтвердили эффективность применения методов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок. Чистый дисконтированный доход для электрифицированных участков Приднепровской ж.д. за 1 год составляет 1,4 млн грн. Расчетный срок окупаемости предложенных мероприятий – 1 месяц.
  8. Результаты диссертационной работы внедрены в службах электроснабжения Донецкой и Приднепровской железных дорог, Днепропетровской дирекции железнодорожных перевозок, учебном процессе Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Комплексна державна програма енергозбереження України № 148 від 5 лютого 1997 р.
2. Концепція Державної програми реформування залізничного транспорту України. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України № 651-р від 27 грудня 2006 р. – К. : Укрзалізниця, 2006 р.
3. Програма підвищення енергоефективності та Програма зменшення споживання енергоресурсів бюджетними установами шляхом їх раціонального використання у сферах транспорту та зв'язку на 2010 – 2014 роки / Міністерство транспорту України, Державна адміністрація залізничного транспорту України. – К., 2009. – 48 с.
4. Стратегія розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 р. № 1555-р. – К. : КМУ, 2009.
5. 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.
6. 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.
7. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2011 році. – К. : Державна адміністрація залізничного транспорту, 2012. – 209 с.
8. Карпенко С. Я. Опыт работы Укрзалізницы по модернизации коммерческого учета электроэнергии. Стимулирование потребителей на оптовом рынке электроэнергии к модернизации учета и регулирования собственного графика потребления / С. Я. Карпенко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2006. – Вип. 13. – С. 28–33.

9. 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.
10. Сергієнко М. І. Основні напрямки роботи Укрзалізниці з енергозбереження та її результати / М. І. Сергієнко // Локомотив-інформ. – 2010. – № 4 – С. 24–26.
11. Мямлін С. В. Аспекти політики енергозбереження в тягових системах залізничного транспорту / С. В. Мямлін, В. Г. Кузнецов, В. Г. Сиченко // Матеріали 1-й Міжнародної научно-практ. конф. «Енергосбереження на залізничному транспорті», 2010, Мисхор. – Д. : ДНУЗТ, 2010. – С. 13–18.
12. Кузнецов В. Г. Розвиток теоретичних основ енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.09 / В. Г. Кузнецов; [ДНУЗТ]. – Д., 2012. – 35 с.
13. Кузнецов, В. Г. Нормування витрат електроенергії для споживачів залізничного транспорту: монографія / В. Г. Кузнецов. – Д. : Вид-во Маковецький, 2012. – 216 с.
14. 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.
15. Шалимов М. Г. Современное состояние и пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог / М. Г. Шалимов, Г. П. Маслов, Г. С. Магай; Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2002.– 49 с.
16. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.
17. Доманский В. Т. Система информационно-управляющего обеспечения рациональных режимов электропотребления электрифицированных линий

- железных дорог : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.09 / В. Т. Доманский; [Моск. гос. ун-т путей сообщ.]. – М., 1993. – 48 с.
18. Доманский В. Т. Энергооптимальная технология перевозочного процесса / В. Т. Доманский, В. П. Кручина, А. П. Юшкевич // Ж.-д. трансп. – 1993. – № 5. – С. 6–13.
  19. 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.
  20. Доманская Г. А. Энергосберегающие технологии управления режимами работы тягового электроснабжения / Г. А. Доманская // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». – 2007. – № 36. – С. 114–120.
  21. 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.
  22. Доманская Г. А. Энергосберегающие технологии тягового электроснабжения железных дорог с учетом режимов работы питающих их энергосистем : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 / Г. А. Доманская; [ДНУЖТ]. – Д., 2007. – 25 с.
  23. Землянов В. Б. Энергооптимальные технологии анализа и регулирования электропотребления на тягу поездов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.09 / В. Б. Землянов; [ДНУЖТ]. – Д., 2000. – 23 с.
  24. 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.
  25. 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.

26. Почаевец В. С. Автоматизированные системы управления устройствами электроснабжения железных дорог / В. С. Почаевец. – М. : Маршрут, 2003. – 318 с.
27. Почаевец Э. С. Анализ режимов системы электроснабжения методами теории потоков случайных событий / Э. С. Почаевец, Я. Е. Савич // Тр. Ростов. ин-та инж. ж.-д. трансп. – 1981. – С. 67–71.
28. Абрамов А. А. График движения поездов и пропускная способность / А. А. Абрамов. – М. :РГОТУПС, 2002. – 170 с.
29. 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.
30. 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.
31. Вернигора Р. В. Анализ неравномерности грузовых перевозок на магистральном и промышленном железнодорожном транспорте / Р. В. Вернигора, Н. И. Березовой // Восточно-Европейский журн. передовых технологий. – 2012. – № 2/3(56). – С. 82–87.
32. Каретников А. Д. График движения поездов / А. Д. Каретников, Н. А. Воробьев. – М. : Транспорт, 1979. – С. 238–243.
33. Левин Д. Ю. Оптимизация оперативного управления перевозочным процессом в условиях развития диспетчерских центров : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.08 / Д. Ю. Левин; [МГУПС]. – М., 2009. – 48 с.
34. Левин Д. Ю. Оптимизация потоков поездов / Д. Ю. Левин. – М. :Транспорт, 1988. – 175 с.
35. Левин Д. Ю. Теория оперативного управления перевозочным процессом : монография / Д. Ю. Левин. – М. : ГОУ «Учебно-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп.», 2008. – 625 с.

36. Никитин А. В. Совершенствование методики расчета и параметров твердого графика движения грузовых поездов : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08 / А. В. Никитин; [ВНИИЖТ]. – Самара, 2000. – 25 с.
37. Почаевец Э. С. Вероятностные характеристики реального потока поездов / Э. С. Почаевец, Ю. Б. Манусов // Деп. ЦНИИ ТЭИ. РЖ железнодорожный транспорт. – 1972. – № 11. – 75 с.
38. Почаевец Э. С. Исследование оптимального тягового режима электроподвижного состава / Э. С. Почаевец // Сб. научн. тр. МИИТа. – 1968. – Вып. 282. – С. 52–64.
39. Почаевец Э. С. К вопросу оптимального управления движением поезда / Э. С. Почаевец // Сб. научн. тр. МИИТа. – 1967. – Вып. 250. – С. 32–40.
40. 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.
41. Ребец В. И. Оптимизация оперативного управления / В. И. Ребец, Д. Ю. Левин // Ж.-д. трансп. – 2003. – № 1. – С. 14–23.
42. 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.
43. Скалозуб В. В. Комплексные задачи выбора режимов ведения поезда по показателю стоимости электроэнергии / В. В. Скалозуб // Транспорт : зб. наук. пр. – 2002. – Вып. 12. – С. 148–157.
44. 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.

45. Шапкин И. Н. Организация железнодорожных перевозок на основе информационных технологий : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.08 / И. Н. Шапкин; [МГУПС]. – М., 2009. – 49 с.
46. Заруцкая Т. А. Исследование эффективности применения сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии на тяговой подстанции постоянного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Т. А. Заруцкая; [Рост. гос. ун-т путей сообщ.]. – Ростов н/Д., 2004. – 20 с.
47. Кернер Дж. Выравнивание нагрузки тяговых подстанций с помощью аккумуляторов энергии / Дж. Кернер // Железные дороги мира. – 1997. – № 1. – С. 43–50.
48. Накопители энергии : учеб. пособие / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин, П. В. Васюкович. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
49. 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.
50. Омеляненко В. И. Инерционный накопитель энергии для систем тягового электроснабжения / В. И. Омеляненко, Г. В. Омеляненко // Технічна електродинаміка. – 2002. – № 4. – С. 83–88.
51. Павелчик М. Повышение эффективности электрической тяги при помощи накопителей энергии : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.09 / М. Павелчик; [МИИТ]. – М., 2000. – 50 с.
52. Шевлюгин М. В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.09 / М. В. Шевлюгин; [МИИТ]. – М., 2009. – 48 с.
53. Шевлюгин М. В. Проблемы использования накопителей энергии в системе тягового электроснабжения : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 / М. В. Шевлюгин; [Моск. гос. ун-т путей сообщения]. – М., 2000. – 24 с.

54. 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.
55. 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.
56. 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.
57. 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. 06.09.2004; опубл. 27.12.2004; Бюл. № 36.
58. Добрусин Л. А. Фильтрокомпенсирующие устройства для преобразовательной техники / Л. А. Добрусин. – М. : НТФ Энергопресс, 2003. – 84 с.
59. Полупроводниковый преобразователь с вольтадобавкой в качестве активного фильтра / Ю. П. Гончаров, Н. В. Панасенко, В. В. Замаруев и др. // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». Ч. 2. – 2007. – С. 112–117.
60. 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.
61. Кисляков В. А. Система электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока с вольтодобавочными устройствами (ВДУ) / В. А. Кисляков // Тр. МИИТа. – 1975. – Вып. 451. – С. 105–108.

62. Постанова про порядок нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів у суспільному виробництві: затв. Наказом Кабінету Міністрів України 15.07.97 № 786. – К., 1997. – 28 с.
63. Основні положення з нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів у суспільному виробництві: затв. Наказом Державного комітету України з енергозбереження 22.10.02 № 37. – К., 2002. – 30 с.
64. Закон України про енергозбереження: введений в дію постановою Верховної Ради України 01.07.94 № 75/94. – К., 1994. – 24 с.
65. Железко Ю. С. Нормирование технологических потерь электроэнергии в сетях – новая методика расчета [Электронный ресурс] / Ю. С. Железко // Новости электротехники. – 2003. – № 5. – Режим доступа [www.news.elteh.ru/arh/2003/23/04.php](http://www.news.elteh.ru/arh/2003/23/04.php): 2012.
66. Кудрин Б. И. О теоретических основах и практике нормирования и энергосбережения / Б. И. Кудрин // Промышленная энергетика. – 2000. – № 6. – С. 33–36.
67. Мелехин В. Т. Основные направления совершенствования нормирования при системном подходе к использованию топливно-энергетических ресурсов / В. Т. Мелехин // Промышленная энергетика. – 1983. – № 8. – С. 5–8.
68. Находов В. Ф. Нормирование и оценка эффективности электропотребления в промышленности : дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / В. Ф. Находов. – К., 1986. – 183 с.
69. Никифоров Г. В. Совершенствование нормирования и планирования электропотребления в промышленном производстве / Г. В. Никифоров // Промышленная энергетика. – 1999. – № 3. – С. 27–29.
70. Сальников А. Х. Нормирование потребления и экономия топливно-энергетических ресурсов / А. Х. Сальников, Л. А. Шевченко. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.

71. Усихин В. Н. О нормировании и планировании электропотребления на промышленных предприятиях / В. Н. Усихин // Промышленная энергетика. – 1997. – № 4. – С. 30–37.
72. Щелоков Я. М. О нормировании энергетических показателей / Я. М. Щелоков // Промышленная энергетика. – 2007. – № 10. – С. 50–53.
73. Ястребов П. П. Использование и нормирование электрической энергии в процессах переработки и хранения хлебных культур / П. П. Ястребов. – М. : Колос, 1973. – 311 с.
74. Данилеян Н. Точность учета электроэнергии зависит от правильности выбора и подключения измерительных трансформаторов / Н. Данилеян // Новости электротехники. – 2003. – № 3. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/21/12.php>: 2012.
75. Загорский Я. Т. Совершенствование систем и средств метрологического обеспечения измерений и учета электроэнергии при ее производстве, передаче, распределении и потреблении / Я. Т. Загорский, Я. В. Комкова // Электрические станции. – 2004. – № 8. – С. 46–50.
76. Заслонов С. В. Развитие методического и программного обеспечения для расчета балансов электроэнергии в распределительных сетях / С. В. Заслонов, М. А. Калинина, И. А. Паринов // Залізничний трансп. України. – 2010. – № 5. – С. 27–31.
77. Марквардт К. Г. Косвенные способы определения потерь электрической энергии в тяговой сети / К. Г. Марквардт, А. Н. Кувичинский, Е. Н. Давыдов // Тр. МИИТа. – 1969. – Вып. 302. – С. 102–108.
78. Быкадоров А. Л. Сравнительная оценка косвенных способов измерения потерь энергии в контактной сети переменного тока / А. Л. Быкадоров, В. Т. Доманский // Тр. Ростов. ин-та инж. ж.-д. трансп. – 1979. – Вып. 153. – С. 20–27.
79. Доманский В. Т. Экспериментальное определение потерь энергии в электротяговых сетях постоянного тока / В. Т. Доманский, В. Ф. Блохин, Г. А. Доманская // Весн. ВНИИЖТа. – 1990. – № 5. – С. 29–32.

80. Быкадоров А. Л. Исследование коэффициента настройки счетчиков потерь энергии на имитационной модели / А. Л. Быкадоров, В. Т. Доманский, В. М. Ляшук // Сб. научн. тр. ВЗИИТ. – 1984. – Вып. 121. – С. 62–68.
81. Кирилюк Т. І. Удосконалення методу контролю втрат електроенергії в контактній мережі електрифікованих залізниць : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 / Т. І. Кирилюк; [ДНУЗТ]. – Д., 2013. – 24 с.
82. Kuzniecowa W. G. Problem zasilania energii w systemach zasilania trakcji elektrycznej / W. G. Kuzniecowa // Infrastruktura transportu. – 2012. – № 3. – Р. 38–40.
83. Котельников А. В. Энергетическая стратегия железных дорог России / А. В. Котельников // Железные дороги мира. – 2005. – № 2. – С. 16–23.
84. Доманский В. Т. Энергетическая стратегия железных дорог / В. Т. Доманский, В. В. Корниенко, А. В. Котельников // Столичный экспресс. – 2006. – № 7. – С. 24–28.
85. 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.
86. 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.
87. Kuzniecowa, W. G. Problem zasilania energii w systemach zasilania trakcji elektrycznej / W. G. Kuzniecowa // Infrastruktura transportu. – 2012. – № 3.– Р. 38–40.
88. Кузнецов В. Г. Підвищення енергетичної ефективності електротранспорту шляхом удосконалення процесу перевезень / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Тезиси докл. міжнародної конф. «Транселектро-2009», 2009, Місхор. – Д. : ДІТ, 2009. – С. 54–55.
89. Кузнецов В. Г. Энергооптимальное управление потоком поездов / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Материалы 2-й международной

научно-практ. конф. "Энергосбережение на железнодорожном транспорте", 2011, пгт Ждениево. – Д. : ДНУЖТ, 2011. – С. 35–37.

90. Кузнецов В. Г. Повышение энергоэффективности электротранспорта постоянного тока путем оптимизации управления транспортным потоком / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Материалы 5-й международной научно-практ. конф. «Электрификация транспорта Трансэлектро-2011». – Д. :ДНУЖТ, 2011. – С. 40–41.
91. Кузнецов В. Г. Уменьшение потерь электроэнергии в контактной сети за счет регулирования графика движения поездов / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников, Д. А. Босый // Техническая электродинамика. Тематическое издание. – 2012. – С. 107–110.
92. Rothwell G. Electricity Economics: Regulation and Deregulation / G. Rothwell, T. Gomez. – N. Y. : Wiley-IEEE Press, 2003. – 304 p.
93. 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.
94. Грунтов П. С. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте : учеб. для вузов / П. С. Грунтов, Ю. В. Дьяков, А. М. Макаровичкин. – М. : Транспорт, 1994. – 543 с.
95. Баранов А. М. Организация движения поездов на линиях с электровозной тягой / А. М. Баранов, К. А. Бернгард. – М. : Трансжелдориздат, 1957. – 75 с.
96. 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.
97. 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.

98. 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.
99. 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.
100. Мирошниченко Р. И. Режимы работы электрифицированных участков / Р. И. Мирошниченко. – М. : Транспорт, 1982. – 207 с.
101. Эксплуатационные требования к параметрам устройств энергоснабжения железных дорог, электрифицированных на постоянном токе : сб. научн. тр. / ВНИИЖТ – М. : Трансжелдориздат, 1959. – 234 с.
102. Принципи побудови інтегрованої інформаційно-керуючої системи технологічно-економічного управління залізницями України (ТЕМП-УЗ) / В. С. Алейник, О. П. Бочаров, Б. О. Кривошей, В. О. Шиш // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. – № 4,5. – С. 54–58.
103. Совершенствование технологии перевозочного процесса и пути оптимизации эксплуатационной работы / В. С. Алейник, А. П. Бочаров, В. А. Шиш // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. – № 4,5. – С.54–58.
104. Аванпроект інтегрованої інформаційно-керуючої системи технологічно-економічного управління залізницями України (ІКС ТЕМП-УЗ). – К. : Укрзалізниця, 2004.
105. Загальносистемне технічне завдання на розробку інтегрованої інформаційно-керуючої системи технологічно-економічного управління залізницями України (ІКС ТЕМП-УЗ). – К. : Укрзалізниця, 2004.
106. Крюков А. В. Методические погрешности при моделировании систем тягового электроснабжения / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, Н. А. Абрамов // Вестн. Иркутского регионального от-я Академии наук высшей школы России. – 2009. – № 2(15). – С. 171–176.

107. Абрамов Н. А. Управление режимами систем тягового электроснабжения на основе ситуационного подхода / Н. А. Абрамов, В. П. Закарюкин, А. В. Крюков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – № 1 (25). – С. 186–191.
108. Марский В. Е. Особенности расчета системы тягового электроснабжения 2х25 кВ / В. Е. Марский // Вестн. ВНИИЖТ. – 1983. – № 1. – С. 19–23.
109. Тер-Оганов Э. В. Имитационная модель работы системы электроснабжения двухпутного электрифицированного участка // Тр. ВЗИИТ. – 1983. – Вып. 117. – С. 58–62.
110. Тихонов К. К. Выбор оптимальных параметров эксплуатации железных дорог / К. К. Тихонов. – М. : Транспорт, 1974. – 192 с.
111. Угрюмов А. К. Неравномерность движения поездов / А. К. Угрюмов. – М. : Транспорт, 1968. – 112 с.
112. Асташин С. М. Управление режимами и процессами эксплуатации систем тягового электроснабжения на основе имитационного моделирования : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 «Автоматизация и упр. технол. процессами и пр-вами»/ Асташин Сергей Михайлович ; ИрГУПС. – Иркутск, 2008. – 17 с.
113. Баглейбтер О. И. Разработка математических моделей и методов для оценки влияния участников системы электроснабжения на качество электроэнергии : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18 / Баглейбтер Олег Исаакович ; ИрГУПС. – Иркутск, 2006. – 20 с.
114. Маркович И. М. Режимы энергетических систем / И. М. Маркович. – М. : Госэнергоиздат, 1969. – 350 с.
115. Митрофанов А. Н. Моделирование процессов прогнозирования и управления электропотреблением тяги поездов / А. Н. Митрофанов. – Самара: СамГАПС, 2005. – 168 с.
116. Митрофанов А. Н. Прогнозирование и управление электропотреблением тяги поездов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / А. Н. Митрофанов; [СамГАПС]. – Самара, 2006. – 49 с.

117. Корниенко В. В. Методы расчета и моделирования режимов работы систем тягового электроснабжения и питающих их энергосистем / В. В. Корниенко, Г. А. Доманская // Восточноевроп. журн. передовых технологий. – 2007. – № 5/3 (29). – С. 31–37.
118. 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.
119. Основы электротранспорта / М. А. Слепцов, Г. П. Долаберидзе, А. В. Прокопович и др. – М. : Академия, 2006. – 464 с.
120. Кузнецов В. Г. Оценка потерь электроэнергии в тяговой сети магистральных железных дорог / В. Г. Кузнецов, Р. С. Мыцко, Д. А. Босый. – Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2006. – Вип. 12. – С. 36–40.
121. 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.
122. Нормирование и прогнозирование на железных дорогах : научное издание / И. Н. Шапкин, Р. А. Юсипов, Е. М. Кожанов. – М. : МГУПС, 2006. – 254 с.
123. Кузнецов В. Г. Дослідження показників транспортного потоку на електрифікованій ділянці 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.
124. Кузнецов В. Г. Визначення показників потоку поїздів, які обмежують пропускну здатність ділянки за умовами електропостачання / В. Г. Кузнецов, Г. Я. Мозолевич, К. А. Калашников // Гірнична електромеханіка та автоматика : науково-техн. зб. – 2011. – № 87. – С. 47–49.

125. Kuznetsov V. G. Elaboration of methodology for calculation of fraction power-supply system with the help of renewal stream theory / V. G. Kuznetsov, G. Vaiciunas // *Transbaltica 2009. Proc. of the 6-th intern. scientific conference.* – Vilnius : Vilnius Gediminas Technical University, 2009. – С. 123–128.
126. Почаевец Э. С. Обобщенные методы анализа режимов системы тягового электроснабжения : учеб. пособие / Э. С. Почаевец. – Д. : ДИИТ, 1981. – 55 с.
127. Сотников Е. А. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и ее влияние на потребную пропускную способность участков / Е. А. Сотников, К. П. Шенфельд // *Вестн. ВНИИЖТ.* – 2011. – № 5. – С. 3–9.
128. Барков Н. Н. Сезонная и внутринедельная неравномерность грузовых перевозок на железных дорогах / Н. Н. Барков // *Тр. ВНИИЖТ.* – М. : Трансжелдориздат, 1963. – Вып. 249. – 95 с.
129. Грунтов П. С. Исследование влияния неравномерности движения по технологии сортировочных станций : автореф. дис. ... канд. техн. наук. / П. С. Грунтов; [БелИИЖТ]. – Гомель, 1965. – 24 с.
130. Земблинов М. В. Сезонные колебания перевозок грузов на железных дорогах / М. В. Земблинов. – М. : Транспечать НКПС, 1928. – 91 с.
131. Мокеев, А.В. Повышение качества телеинформации, используемой для оценки состояния и управления энергообъектами / А.В. Мокеев // *Тез. докл. VI Междунар. науч.-практ. конф. “Современные энергетические системы и управление ими”.* – Новочеркасск, ЮРГТУ, 2006. – Ч.1. – С. 54-60.
132. Мокеев А. В. Разработка и внедрение систем сбора телемеханической информации / А. В. Мокеев // *Электрические станции.* – 2007. – № 6. – С. 60–61.

133. 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.
134. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України : навчально-метод. посіб. / розроб.: О. Ф. Вергун та ін. – К. : Транспорт України, 2002. – 376 с.
135. Правила технічної експлуатації залізниць України. – К., 2002. – 136 с.
136. Статут залізниць України. – К., 1998. – 18 с.
137. Maksimczuk W. F. Badania rezerw zasilania poprzez racjonalne rozmieszczenie pociągów na odcinku / W. F. Maksimczuk, W. G. Kuzniecsov, K. A. Kalasznikov, T. I. Kiriluk // Infrastruktura transportu. – 2013. – С. 28–31.
138. Кузнецов В. Г. Дослідження впливу роботи поїзного диспетчера на систему електропостачання / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Матеріали 1-й міжнародної научно-практ. конф. «Енергосбереження на залізничному транспорті», 2010, п. Мисхор. – Д. : ДНУЖТ, 2010. – С. 9–10.
139. Кузнецов В. Г. Применение методов оптимизации для решения задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет регулирования транспортного потока / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Матеріали 4-й Міжнародної научно-практ. конф. «Енергосбереження на залізничному транспорті і в промисловості». – Д. : ДНУЖТ, 2013. – С. 54–55.
140. 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.
141. Дегтярев Ю. И. Методы оптимизации / Ю. И. Дегтярев. – М. : Сов. радио, 1980. – 272 с.
142. Пантелеев А. В. Методы оптимизации в примерах и задачах / А. В. Пантелеев, Т. А. Летова. – М. : Высшая шк., 2005. – 544 с.

143. Kalasznikov K. A. Matematyczny model zagadnienia optymalnego przemieszczenia pociągów pomiędzy podstacjami trakcyjnymi według kryterium minimalnych strat mocy w sieci trakcyjnej / K. A. Kalasznikov // Problemy Kolejnictwa. – 2013. – № 159. – С. 31–44.
144. Кузнецов В. Г. Определение оптимальной дислокации поездов между тяговыми подстанциями по критерию минимума потерь мощности в тяговой сет / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – № 5. – С. 2–13.
145. Босов А. А. Функции множества и их применение : учеб. пособие / А. А. Босов. – Днепродзержинск: Изд. дом «Андрей», 2007. – 182 с.
146. 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», 2009, Ростов на Дону. – Ростов на/Д. : РГУПС, 2009. – С. 362–363.
147. 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.
148. Кузнецов В. Г. Оптимизация потерь электроэнергии в контактной сети железнодорожного транспорта / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников, Д. А. Босый // Пр. ін-ту електродинаміки Нац. акад. наук України. – 2012. – № 33. – С. 18–21.
149. Калашников К. А. Модернизированный метод составления графика движения поездов с учетом потерь электроэнергии / К. А. Калашников // Восточно-Европейский журн. передовых технологий. – 2013. – № 2/8(62). – С. 4–8.
150. Наказ Міністерства економіки та з питань європейської інтеграції України та Міністерства фінансів України «Про затвердження Методики

визначення економічної ефективності витрат на наукові дослідження і розробки та їх впровадження у виробництво» від 25.09.2001 р., зареєстрований Мін'юстом 26.09.2001 р. за № 218/446.

151. Комп'ютерна програма «Автоматизована система складання енергоефективного графіку руху поїздів «Поток»: А.с. 48202. Україна / Калашников К. О., Кузнецов В. Г., Босий Д. О. Зареєстровано 05.03.2013 р. К. : ДСІВУ, 2013.
152. 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.
153. 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.
154. Черваньов Д. М. Менеджмент інвестиційної діяльності підприємства : навч. посіб. / Д. М. Черваньов. – К. : Знання-Прес, 2003. – 622 с.
155. Экономика железнодорожного транспорта : учеб. для вузов / И. В. Белов, Н. П. Терешина, В. Г. Галабурда и др.; под ред. Н. П. Терешиной, Б. М. Лapidуса, М. Ф. Трихункова. – М. : УМК МПС России, 2001. – 600 с.



Таблица А.2 – Количество и масса поездов за декабрь 2010 г.

№п/п	Дата								
	1	2	3	4	5	6	7	...	31
1	5066	4768	1180	184	5194	4931	3804	...	5086
2	5082	4486	4507	184	5520	1100	5222	...	5197
3	1100	1100	3808	3165	1591	4930	5008	...	4882
4	600	1100	4608	1100	4343	1100	1106	...	3786
5	1100	600	600	1100	600	600	600	...	4916
6	5239	1100	4439	4438	1100	1100	1100	...	600
7	4895	4473	1100	600	1100	5082	2222	...	1100
8	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	...	4790
9	4898	3547	1100	1100	1100	1100	1100	...	1100
10	1100	1100	4917	5198	4041	1100	1100	...	2570
11	1100	1100	1474	1100	5026	4630	5157	...	1100
12	4841	5272	1406	1100	184	3861	5285	...	1100
13	3002	5074	4819	4649	5001	5231	5092	...	4933
14	4621	4251	1100	4128	4916	1357	3395	...	1120
15	5379	4980	600	1120	4533	5897	5150	...	4413
16	1100	4889	3489	4890	1100	2728	4539	...	4530
17	4519	4780	1100	5993	4828	4710	1100	...	1100
18	600	1100	600	1100	5027	1100	1122	...	4545
19	4825	4697	6030	5769	600	1100	1426	...	1146
20	3598	5150	4166	4081	1380	4880	600	...	5354
21	1100	600	4993	3787	3898	3374	4793	...	600
22	600	4724	1100	600	1100	1146	5082	...	3745
23	4794	4929	4544	4727	4751	600	4848	...	1100
24	1100	1100	4959	1100	600	1794	1100	...	600
25	5184	1100	1140	1100	1160	600	600	...	1334
26	5934	600	4768	1100	1100	1100	5679	...	3042
27	3791	4549	3672	5605	5265	600	4007	...	5188
28	4701	3790	600	600	3910	5695	1380	...	5205
29	4551	600	5000	4726	5028	4642	4386	...	1100
30	4878	4793	1100	3703	5123	2499	3849	...	4970
31	4910	4777	4606	4439	600	4736	5181	...	5261
32	600	1120	4299	5293	1100	4631	4895	...	5042
33	4285	4721	4041	1140	1120	4293	1100	...	5124
34	1100	1100	3718	3533	4895	4187	4981	...	4874
35	5609	1100	1100	4742	4713	600	1040	...	4928
36	1160	5144	5036	4191	4628	5221	4722	...	600
37	4645	5156	2418	4665	4884	4135	4961	...	5703
38	1100	5180	4189	4726	3667	5562	4697	...	4580
39	3673	4987	600	5074	1100	5482	4945	...	1100
40	4552	1100	4447	5219	5005	4508	4497	...	5138
41	600	600	5012	4186	3325	1140	4604	...	5835
42	4852	1140	177	4717	1120	1100	600	...	120
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
итого	137484	127577	123662	131072	126376	125282	137175	...	138557

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Расчет оптимальных расстояний между поездами

```

> restart;
> EххА:=3300:EххВ:=3300:Напряжение на ТП
> p:=0:Внутр.сопротивление ТП
> Sm:=320:мм2
> Sa:=185:мм2
> L:=18:Длина участка
> Tok
:=array(1..118,[964,927,891,934,987,1042,1100,952,1712,1751,1717,1
659,1460,1781,1633,2001,1889,1823,1788,1764,1751,1743,1738,1730,17
21,1718,1721,1728,1734,1739,1744,1749,1753,1756,1760,1763,1766,176
9,1771,1773,1776,1778,1779,1782,1784,1779,1763,1735,1705,1679,1657
,1637,1620,1611,1614,1627,1646,1664,1680,1695,1708,1719,1730,1740,
1748,1756,1763,1770,1775,1771,1746,1711,1668,1625,1587,1555,1527,1
507,1500,1503,1516,1534,1551,1566,1581,1594,1606,1618,1628,1637,16
45,1653,1660,1667,1673,1679,1683,1688,1693,1697,1701,1704,1702,168
9,1667,1637,1605,1571,1539,1506,0,0,966,978,989,1000]);
>
> L1:=0.1:Расстояние от начала участка до поезда 1
> L2:=0.1+1:Расстояние от начала участка до поезда 2
> L3:=0.1+1+1:Расстояние от начала участка до поезда 3
> I1:=Tok[round(L1/(L/118))];Ток 1 поезда
      I1 := 964
> I2:=Tok[round(L2/(L/118))];Ток 2 поезда
      I2 := 1100
> I3:=Tok[round(L3/(L/118))];Ток 3 поезда
      I3 := 1781
>
Расчет сопротивлений
> rp:=0:сопротивление рельсов
> #rtc:=18.2/(Sm+(Sa/1.7))+rp;сопротивление тяговой сети Ом/км
> rtc:=0.07;
      rtc := .07

```

**Консольная схема**

```

> IfA:=I1+I2+I3;
      IfA := 3845
> Rtc01:=rtc*L1;
      Rtc01 := .007
> Rtc12:=rtc*(L2-L1);
      Rtc12 := .070
> Rtc23:=rtc*(L3-L2);
      Rtc23 := .070
> deltaRtpA:=IfA^2*p;

```

$$\mathit{deltaRtpA} := 0$$

>  $\mathit{deltaRtc01} := \mathit{IfA}^2 * \mathit{Rtc01}$ ; Потери мощности на участке 01 (от начала до 1 поезда)  
 $\mathit{deltaRtc01} := 103488.175$

>  $\mathit{deltaRtc12} := (\mathit{IfA} - \mathit{I1})^2 * \mathit{Rtc12}$ ; Потери мощности на участке 12 (между 1 и 2 поездами)

$$\mathit{deltaRtc12} := 581011.270$$

>  $\mathit{deltaRtc23} := (\mathit{IfA} - \mathit{I1} - \mathit{I2})^2 * \mathit{Rtc23}$ ; Потери мощности на участке 23 (между 2 и 3 поездами)

$$\mathit{deltaRtc23} := 222037.270$$

>  $\mathit{deltaRtc} := \mathit{deltaRtc01} + \mathit{deltaRtc12} + \mathit{deltaRtc23}$ ; Вычисляем потери мощности при консольной схеме

$$\mathit{deltaRtc} := 906536.715$$

>  $\mathit{dP\_kons} := \mathit{deltaRtc}$ ; Потери мощности при консольной схеме заносим в спец.ячейку  
 $\mathit{dP\_kons} := 906536.715$

>  $\mathit{RtpA} := \mathit{IfA} * \mathit{ExxA}$ ;

$$\mathit{RtpA} := 12688500$$

>  $\mathit{eta} := 100 - ((\mathit{deltaRtc01} + \mathit{deltaRtpA} + \mathit{deltaRtc12}) / \mathit{RtpA}) * 100$ ;  
 $\eta := 94.60535568$

### Расчет схемы двухстороннего питания

>  
 >  $\mathit{IfA} := (1/L) * (\mathit{I1} * (L - \mathit{L1}) + \mathit{I2} * (L - \mathit{L2}) + \mathit{I3} * (L - \mathit{L3})) + (\mathit{ExxA} - \mathit{ExxB}) / \mathit{rtc} * L$ ;  
 $\mathit{IfA} := 3564.638889$

>  $\mathit{IfB} := (1/L) * (\mathit{I1} * \mathit{L1} + \mathit{I2} * \mathit{L2} + \mathit{I3} * \mathit{L3}) - (\mathit{ExxA} - \mathit{ExxB}) / \mathit{rtc} * L$ ;  
 $\mathit{IfB} := 280.3611111$

Уравнительный ток

>  $\mathit{iyr} := \text{abs}(\mathit{ExxA} - \mathit{ExxB}) / \mathit{rtc} * L$ ;  
 $\mathit{iyr} := 0.$

Проверка

>  $\mathit{I1} + \mathit{I2} + \mathit{I3}$ ;  
 3845

>  $\mathit{IfA} + \mathit{IfB}$ ;  
 3845.000000

>  $\mathit{deltaRtc01} := \mathit{IfA}^2 * \mathit{rtc} * \mathit{L1}$ ;  
 $\mathit{deltaRtc01} := 88946.55287$

>  $\mathit{deltaRtc12} := (\mathit{IfA} - \mathit{I1})^2 * \mathit{rtc} * (\mathit{L2} - \mathit{L1})$ ;  
 $\mathit{deltaRtc12} := 473432.5842$

>  
 >  $\mathit{deltaRtc23} := \mathit{rtc} * (\mathit{L3} - \mathit{L2}) * (\mathit{IfA} - \mathit{I1} - \mathit{I2})^2$ ;  
 $\mathit{deltaRtc23} := 157634.1952$

>  $\mathit{deltaPtc} := \mathit{deltaRtc01} + \mathit{deltaRtc12} + \mathit{deltaRtc23}$ ; Вычисляем потери мощности при двухсторонней схеме

$$\mathit{deltaPtc} := 720013.3323$$

```

> dP_dvust:=deltaPtc;
                                dP_dvust := 720013.3323

> deltaRtpA:=IfA^2*p;
                                deltaRtpA := 0.

> deltaRtpB:=IfB^2*p;
                                deltaRtpB := 0.

> RtpA:=IfA*ExxA;
                                RtpA := .1176330833 108

> RtpB:=IfB*ExxB;
                                RtpB := 925191.6666

> R:=RtpA+RtpB;
                                R := .1268850000 108

>
> eta:=100-((deltaRtpB+deltaRtpA+deltaRtc)/R)*100;
                                η := 92.85544615

*****
*****
                                Параллельная схема

> rtcP:=rtc/2;
                                rtcP := .03500000000

> IfA:=(1/L)*(I1*(L-L1)+I2*(L-L2)+I3*(L-L3))+ (ExxA-ExxB)/rtcP*L;
> IfB:=(1/L)*(I1*L1+I2*L2+I3*L3)- (ExxA-ExxB)/rtcP*L;
                                IfA := 3564.638889
                                IfB := 280.3611111

Проверка
> I1+I2+I3;
                                3845

> IfA+IfB;
                                3845.000000

> deltaRtc01:=IfA^2*rtcP*L1;
                                deltaRtc01 := 44473.27644

> deltaRtc12:=(IfA-I1)^2*rtcP*(L2-L1);
                                deltaRtc12 := 236716.2921

>
> deltaRtc23:=rtcP*(L3-L2)*(IfA-I1-I2)^2;
                                deltaRtc23 := 78817.09762

> deltaPtc:=deltaRtc01+deltaRtc12+deltaRtc23; Вычисляем потери мощности
при параллельной схеме
                                deltaPtc := 360006.6661

> dP_par:=deltaPtc;
                                dP_par := 360006.6661

> deltaRtpA:=IfA^2*p;

```

```

deltaRtpA := 0.

> deltaRtpB:=IfB^2*p;
deltaRtpB := 0.

> RtpA:=IfA*ExxA;
RtpA := .1176330833 108

> RtpB:=IfB*ExxB;
RtpB := 925191.6666

> R:=RtpA+RtpB;
R := .1268850000 108

>
> eta:=100-((deltaRtpB+deltaRtpA+deltaRtc)/R)*100;
eta := 92.85544615

Узловая схема
> phip:=1-((L+L/2)/L*L)*x;
phip := 1 - 27 x

> phism:=((L-L/2)/L*L)*x;
phism := 9 x

> phipsm:=(1/2)*(1-x/L);
phipsm :=  $\frac{1}{2} - \frac{x}{36}$ 

> If1:=I1*((L-L/2)/(L*L))*L1+I2*((L-L/2)/(L*L))*L2+I3*((L-
L/2)/(L*L))*L3;
If1 := 140.1805556

> If2:=I1*(1-((L+L/2)/(L*L))*L1)+I2*(1-((L+L/2)/(L*L))*L2)+I3*(1-
((L+L/2)/(L*L))*L3);
If2 := 3424.458333

> If3:=I3*((1/2)*(1-(L-L3)/L))+I2*((1/2)*(1-(L-
L2)/L))+I1*((1/2)*(1-(L-L1)/L));
If3 := 140.1805558

> If4:=I3*((1/2)*(1-(L-L3)/L))+I2*((1/2)*(1-(L-
L2)/L))+I1*((1/2)*(1-(L-L1)/L));
If4 := 140.1805558

> If1+If2+If3+If4;
3845.000001

> I1+I2+I3;
3845

> deltaRtc01:=IfA^2*rtc*L1;
deltaRtc01 := 88946.55287

> deltaRtc12:=(IfA-I1)^2*rtc*(L2-L1);
deltaRtc12 := 473432.5842

>
> deltaRtc23:=rtc*(L3-L2)*(IfA-I1-I2)^2;

```

$\text{deltaRtc23} := 157634.1952$

>  $\text{deltaPtc} := \text{deltaRtc01} + \text{deltaRtc12} + \text{deltaRtc23}$ ; Вычисляем потери мощности при узловой схеме

$\text{deltaPtc} := 720013.3323$

>  $\text{dP\_uzl} := \text{deltaPtc}$ ;

$\text{dP\_uzl} := 720013.3323$

>  $\text{deltaRtpA} := \text{IfA}^2 * \text{p}$ ;

$\text{deltaRtpA} := 0.$

>  $\text{deltaRtpB} := \text{IfB}^2 * \text{p}$ ;

$\text{deltaRtpB} := 0.$

>  $\text{RtpA} := \text{IfA} * \text{ExxA}$ ;

$\text{RtpA} := .1176330833 \cdot 10^8$

>  $\text{RtpB} := \text{IfB} * \text{ExxB}$ ;

$\text{RtpB} := 925191.6666$

>  $\text{R} := \text{RtpA} + \text{RtpB}$ ;

$\text{R} := .1268850000 \cdot 10^8$

>

>  $\text{eta} := 100 - ((\text{deltaRtpB} + \text{deltaRtpA} + \text{deltaRtc}) / \text{R}) * 100$ ;  
 $\eta := 92.85544615$

\*\*\*\*\*

>

### Метод нулевого порядка

>  $\text{r1} := \text{km} \rightarrow \sqrt{1 / (2 * \text{km} * (\text{km} + 1))}$ ;  $\text{R} := \text{km} \rightarrow \sqrt{\text{km} / (2 * (\text{km} + 1))}$ ;  
 $\text{N} := 3$ :

$$\text{r1} := \text{km} \rightarrow \sqrt{\frac{1}{2 \text{km} (\text{km} + 1)}}$$

$$\text{R} := \text{km} \rightarrow \sqrt{\frac{\text{km}}{2 \text{km} + 2}}$$

>  $\text{km} := \text{N} - 1$ ; #Размерность пространства.

$\text{km} := 2$

>  $\text{a} := 1.5$ ; #Начальный размер симплекса.

$\text{n} := 3$ ; #Число отражений.

$\text{aa} := 0.9$ ; #Параметр уменьшения симплекса.

$\text{e} := 0.5$ ; #Конечный размер симплекса.

$\text{lmin} := 1$ ;

$\text{X00} := [\text{L1}, \text{L2} - \text{L1}, \text{L3} - \text{L2}]$ ;

$\text{a} := 1.5$

$\text{n} := 3$

$\text{aa} := .9$

$\text{e} := .5$

$lmin := 1$

$X00 := [.1, 1.0, 1.0]$

```
> Proek:=proc(X00) local Xr;global Lo,lmin,KN,X01;Xr:=X00;if
Xr[1]+Xr[2]<=Lo-KN and Xr[1]>=lmin and Xr[2]>=lmin then X01:=Xr:
else if Xr[1]<lmin and Xr[2]<lmin then Xr[1]:=lmin:Xr[2]:=lmin
else if Xr[1]<lmin and Xr[1]+Xr[2]>Lo-KN then Xr[1]:=lmin:Xr[2]:=-
Xr[1]+Lo-KN:else if Xr[2]<lmin and Xr[1]+Xr[2]>Lo-KN then
Xr[2]:=lmin:Xr[1]:=-Xr[2]+Lo-KN else if Xr[1]<lmin then
Xr[1]:=lmin else if Xr[2]<lmin then Xr[2]:=lmin else if
Xr[1]+Xr[2]>Lo-KN then Xr[2]:=(Lo-KN+Xr[2]-Xr[1])/2:Xr[1]:=-
X01[2]+Lo-KN: end if: end if:end if:end if:end if:end if:
if:X01:=Xr:return(X01):end proc:#Процедура проектирования.
> fw2:=proc(X01,N,KN) Двухсторонняя схема
local
X00,IfA,IfB,deltaRtc01,deltaRtc12,deltaRtc23,ЕххА,ЕххВ;global
I1,I2,I3,L1,L2,L3,dP_dvust,L,deltaPtc;
ЕххА:=3300:ЕххВ:=3300:L:=18:X00:=X01:L1:=KN:L2:=X00[1]+L1:L3:=X00[
2]+X00[1]+L1;
I1:=Tok[round(L1/(L/118))];I2:=Tok[round(L2/(L/118))];I3:=Tok[roun
d(L3/(L/118))];
IfA:=(1/L)*(I1*(L-L1)+I2*(L-L2)+I3*(L-L3))+(ЕххА-ЕххВ)/rtc*L;
IfB:=(1/L)*(I1*L1+I2*L2+I3*L3)-(ЕххА-ЕххВ)/rtc*L;
deltaRtc01:=IfA^2*rtc*L1;
deltaRtc12:=(IfA-I1)^2*rtc*(L2-L1);
deltaRtc23:=rtc*(L3-L2)*(IfA-I1-I2)^2;
deltaPtc:=deltaRtc01+deltaRtc12+deltaRtc23;
dP_dvust:=deltaPtc;
return(dP_dvust);end proc:
> fw1:=proc(X01,N,KN) Консольная схема
local
X00,IfA,IfB,deltaRtc01,deltaRtc12,deltaRtc23,ЕххА,ЕххВ,Rtc01,Rtc12
,Rtc23;global I1,I2,I3,L1,L2,L3,dP_dvust,L,deltaPtc,dP_kons;
ЕххА:=3300:ЕххВ:=3300:L:=18:X00:=X01:L1:=KN:L2:=X00[1]+L1:L3:=X00[
2]+X00[1]+L1;
I1:=Tok[round(L1/(L/118))];I2:=Tok[round(L2/(L/118))];I3:=Tok[roun
d(L3/(L/118))];
IfA:=I1+I2+I3;
Rtc01:=rtc*L1;Rtc12:=rtc*(L2-L1);Rtc23:=rtc*(L3-L2);
deltaRtc01:=IfA^2*rtc*L1;
deltaRtc12:=(IfA-I1)^2*Rtc12;
deltaRtc23:=(IfA-I1-I2)^2*Rtc23;
deltaPtc:=deltaRtc01+deltaRtc12+deltaRtc23;
dP_kons:=deltaPtc;
return(dP_kons);end proc:
> fw3:=proc(X01,N,KN) Параллельная схема
local
X00,IfA,IfB,deltaRtc01,deltaRtc12,deltaRtc23,ЕххВ,ЕххА,rtc;global
I1,I2,I3,L1,L2,L3,dP_par,L,deltaPtc;
ЕххА:=3300:ЕххВ:=3300:L:=18:X00:=X01:L1:=KN:L2:=X00[1]+L1:L3:=X00[
2]+X00[1]+L1;
```

```

I1:=Tok[round(L1/(L/118))];I2:=Tok[round(L2/(L/118))];I3:=Tok[round(L3/(L/118))];
rtc:=0.07/2;
IfA:=(1/L)*(I1*(L-L1)+I2*(L-L2)+I3*(L-L3))+(ExxA-ExxB)/rtc*L;
> IfB:=(1/L)*(I1*L1+I2*L2+I3*L3)-(ExxA-ExxB)/rtc*L;
deltaRtc01:=IfA^2*rtc*L1;
deltaRtc12:=(IfA-I1)^2*rtc*(L2-L1);
deltaRtc23:=rtc*(L3-L2)*(IfA-I1-I2)^2;
deltaPtc:=deltaRtc01+deltaRtc12+deltaRtc23;
dP_par:=deltaPtc;
return(dP_par);end proc;
> fw4:=proc(X01,N,KN) Узловая схема
local
X00,IfA,IfB,deltaRtc01,deltaRtc12,deltaRtc23,ExxA,ExxB;global
I1,I2,I3,L1,L2,L3,dP_dvust,L,deltaPtc;
ExxA:=3300:ExxB:=3300:L:=18:X00:=X01:L1:=KN:L2:=X00[1]+L1:L3:=X00[2]+X00[1]+L1;
I1:=Tok[round(L1/(L/118))];I2:=Tok[round(L2/(L/118))];I3:=Tok[round(L3/(L/118))];
IfA:=(1/L)*(I1*(L-L1)+I2*(L-L2)+I3*(L-L3))+(ExxA-ExxB)/rtc*L;
IfB:=(1/L)*(I1*L1+I2*L2+I3*L3)-(ExxA-ExxB)/rtc*L;
deltaRtc01:=IfA^2*rtc*L1;
deltaRtc12:=(IfA-I1)^2*rtc*(L2-L1);
deltaRtc23:=rtc*(L3-L2)*(IfA-I1-I2)^2;
deltaPtc:=deltaRtc01+deltaRtc12+deltaRtc23;
dP_dvust:=deltaPtc;
return(dP_dvust);end proc;
>
> SW:=0:Lo:=L:print(`Оптимальные межпоездные расстояния при двухсторонней схеме`);
for KN from 0.1 by 0.1 while (KN<=5 or KN+xmin[1]+xmin[2]>=L) do
X01:=array(1..N-1,[a,a]):a:=1:x00:=X01:x:=vector(km,[]):yy:=array(1..N,[]):xc:=vector(km,[]):A:=matrix(km+1,km,[]):for iA from 1 to km+1 do for jA from 1 to km do if jA<=iA-2 then A[iA,jA]:=0 else if jA=iA-1 then A[iA,jA]:=R(iA-1) else A[iA,jA]:=-r1(jA) end if: end if:end do: end do; S:=matrix(km+1,km,[]):for iX from 1 to km+1 do for jX from 1 to km do S[iX,jX]:=evalf(x00[jX]+a*A[iX,jX],5): end do: end do:
YYmin:=300000000:while a>e do Ymin:=300000000:for kot from 1 to n do for i7 from 1 to km+1 do for j7 from 1 to km do X01[j7]:=evalf(S[i7,j7],7):end do: X01:=Proek([X01[1],X01[2]]);yy[i7]:=fw2(X01,N,KN): end do:#Расчёт значений функции в вершинах симплекса.
ymax:=-1000:for iy from 1 to km+1 do if yy[iy]>=ymax then my:=iy:ymax:=yy[iy]: end if: end do:#Определение вершины с максимальным значением функции.
xmin:=array(1..km,[]):ymin:=500000000:for iy from 1 to km+1 do if yy[iy]<ymin then my1:=iy:ymin:=yy[iy]: end if: end do:if ymin<Ymin then Ymin:=ymin:Tok2:=Tok1: end if:for imin from 1 to km do xmin[imin]:=S[my1,imin] end do: xmin:=Proek([xmin[1],xmin[2]]):#Определение вершины с минимальным значением функции.

```

```

for jc from 1 to km do
xc[jc]:=evalf((sum(S[ic,jc],ic=1..km+1)-S[my,jc])/km,5)
end do:#Определение центра симплекса.
for ix from 1 to km do x[ix]:=S[my,ix] end do;l:=evalm(xc-x):xn:=evalm(x+2*l):#Определение отражённой вершины.
for jX from 1 to km do S[my,jX]:=xn[jX] end do:#Изменение симплекса.
xx:=array(1..km,[]):for jnn from 1 to km do
X01[jnn]:=evalf(S[my,jnn],7):end
do:X01:=Proek([X01[1],X01[2]]);yy[my]:=fw2(X01,N,KN);#Вычисление функции в отражённой вершине.
end do:#Отражение n раз симплекса.
if Ymin<YYmin then YYmin:=Ymin:XXmin:=xmin: end
if:a:=a*aa;#Изменение размера симплекса.
for ila from 1 to km do x00[ila]:=0:for ja from 1 to km+1 do
x00[ila]:=x00[ila]+S[ja,ila] end do:
x00[ila]:=x00[ila]/(km+1): end do:#Определение нового центра симплекса.
S:=matrix(km+1,km,[]):for iS from 1 to km+1 do
for jS from 1 to km do S[iS,jS]:=evalf(x00[jS]+a*A[iS,jS],5):
end do: end do:end
do:SW:=SW+YYmin:print(`XXI=` ,KN, `YYmin=` ,YYmin/1000, `XXmin=` ,XXmin
, `SW=` ,SW/1000):end do:Swmin2:=SW/1000;

```

XXI=, .1, YYmin=, 656.7505488, XXmin=, [ 1.0000, 1.2113 ], SW=, 656.7505488

XXI=, .2, YYmin=, 657.5252965, XXmin=, [ 1, 1.05569 ], SW=, 1314.275845

XXI=, .3, YYmin=, 1067.866511, XXmin=, [ 1, 1 ], SW=, 2382.142356

XXI=, .4, YYmin=, 1424.426751, XXmin=, [ 1, 1 ], SW=, 3806.569107

XXI=, .5, YYmin=, 1341.051443, XXmin=, [ 1, 2.4385 ], SW=, 5147.620550

XXI=, .6, YYmin=, 1562.024034, XXmin=, [ 1, 1 ], SW=, 6709.644584

XXI=, .7, YYmin=, 1590.330272, XXmin=, [ 1, 1 ], SW=, 8299.974856

XXI=, .8, YYmin=, 1427.874943, XXmin=, [ 1, 5.1745 ], SW=, 9727.849799

XXI=, .9, YYmin=, 1709.830644, XXmin=, [ 1, 1 ], SW=, 11437.68044

XXI=, 1.0, YYmin=, 1635.965334, XXmin=, [ 1, 1 ], SW=, 13073.64577

XXI=, 1.1, YYmin=, 1455.722069, XXmin=, [ 1, 6.6561 ], SW=, 14529.36784

XXI=, 1.2, YYmin=, 1446.461700, XXmin=, [ 1, 6.6561 ], SW=, 15975.82954

XXI=, 1.3, YYmin=, 1797.660563, XXmin=, [ 1, 6.6561 ], SW=, 17773.49010

XXI=, 1.4, YYmin=, 2189.431658, XXmin=, [ 1, 6.6561 ], SW=, 19962.92176

XXI=, 1.5, YYmin=, 2302.417291, XXmin=, [ 1, 6.6561 ], SW=, 22265.33905

XXI=, 1.6, YYmin=, 2271.251047, XXmin=, [ 1, 6.6561 ], SW=, 24536.59010

XXI=, 1.7, YYmin=, 2242.957505, XXmin=, [ 1, 6.6561 ], SW=, 26779.54760

XXI=, 1.8, YYmin=, 2264.280908, XXmin=, [ 1, 6.6561 ], SW=, 29043.82851

$XXI=, 1.9, YYmin=, 2291.872714, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 31335.70122$   
 $XXI=, 2.0, YYmin=, 2151.257924, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 33486.95914$   
 $XXI=, 2.1, YYmin=, 2488.610220, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 35975.56936$   
 $XXI=, 2.2, YYmin=, 2532.202712, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 38507.77207$   
 $XXI=, 2.3, YYmin=, 3281.620384, XXmin=, [1, 1], SW=, 41789.39245$   
 $XXI=, 2.4, YYmin=, 2858.914402, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 44648.30685$   
 $XXI=, 2.5, YYmin=, 2911.007707, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 47559.31456$   
 $XXI=, 2.6, YYmin=, 2824.914724, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 50384.22928$   
 $XXI=, 2.7, YYmin=, 2800.629500, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 53184.85878$   
 $XXI=, 2.8, YYmin=, 2834.113169, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 56018.97195$   
 $XXI=, 2.9, YYmin=, 2828.628029, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 58847.59998$   
 $XXI=, 3.0, YYmin=, 2834.012231, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 61681.61221$   
 $XXI=, 3.1, YYmin=, 2854.893860, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 64536.50607$   
 $XXI=, 3.2, YYmin=, 2881.775858, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 67418.28193$   
 $XXI=, 3.3, YYmin=, 2879.216695, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 70297.49862$   
 $XXI=, 3.4, YYmin=, 2917.901309, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 73215.39993$   
 $XXI=, 3.5, YYmin=, 2918.929238, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 76134.32917$   
 $XXI=, 3.6, YYmin=, 2908.536428, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 79042.86560$   
 $XXI=, 3.7, YYmin=, 2942.537969, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 81985.40357$   
 $XXI=, 3.8, YYmin=, 2932.380156, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 84917.78373$   
 $XXI=, 3.9, YYmin=, 2940.888801, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 87858.67253$   
 $XXI=, 4.0, YYmin=, 2970.386678, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 90829.05921$   
 $XXI=, 4.1, YYmin=, 2980.904466, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 93809.96368$   
 $XXI=, 4.2, YYmin=, 3005.868862, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 96815.83254$   
 $XXI=, 4.3, YYmin=, 3032.864441, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 99848.69698$   
 $XXI=, 4.4, YYmin=, 3057.698718, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 102906.3957$   
 $XXI=, 4.5, YYmin=, 3090.369464, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 105996.7652$   
 $XXI=, 4.6, YYmin=, 3113.106260, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 109109.8715$   
 $XXI=, 4.7, YYmin=, 3144.341883, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 112254.2134$   
 $XXI=, 4.8, YYmin=, 3174.162447, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 115428.3758$   
 $XXI=, 4.9, YYmin=, 3200.109503, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 118628.4853$   
 $XXI=, 5.0, YYmin=, 3228.625870, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 121857.1112$

$Swmin2 := 121857.1112$

```

> SW:=0:Lo:=L:print(`Оптимальные межпоездные расстояния при
консольной схеме`);
for KN from 0.1 by 0.1 while (KN<=3 or KN+xmin[1]+xmin[2]>=L) do
X01:=array(1..N-
1,[a,a]):a:=1:x00:=X01:x:=vector(km,[]):yy:=array(1..N,[]):xc:=vec
tor(km,[]): A:=matrix(km+1,km,[]):for iA from 1 to km+1 do for jA
from 1 to km do if jA<=iA-2 then A[iA,jA]:=0 else if jA=iA-1 then
A[iA,jA]:=R(iA-1) else A[iA,jA]:=-r1(jA) end if: end if:end do:
end do; S:=matrix(km+1,km,[]):for iX from 1 to km+1 do
for jX from 1 to km do S[iX,jX]:=evalf(x00[jX]+a*A[iX,jX],5):
end do: end do:
YYmin:=300000000:while a>e do Ymin:=300000000:for kot from 1 to n
do for i7 from 1 to km+1 do for j7 from 1 to km do
X01[j7]:=evalf(S[i7,j7],7):end
do:X01:=Proek([X01[1],X01[2]]);yy[i7]:=fw1(X01,N,KN): end
do:#Расчёт значений функции в вершинах симплекса.
ymax:=-1000:for iy from 1 to km+1 do if yy[iy]>=ymax then
my:=iy:ymax:=yy[iy]: end if:
end do:#Определение вершины с максимальным значением функции.
xmin:=array(1..km,[]):ymin:=500000000:for iy from 1 to km+1 do if
yy[iy]<ymin then my1:=iy:ymin:=yy[iy]: end if:
end do:if ymin<Ymin then Ymin:=ymin:Tok2:=Tok1: end if:for imin
from 1 to km do xmin[imin]:=S[my1,imin] end
do:xmin:=Proek([xmin[1],xmin[2]]):#Определение вершины с
минимальным значением функции.
for jc from 1 to km do xc[jc]:=evalf((sum(S[ic,jc],ic=1..km+1)-
S[my,jc])/km,5)
end do:#Определение центра симплекса.
for ix from 1 to km do x[ix]:=S[my,ix] end do;l:=evalm(xc-
x):xn:=evalm(x+2*l):#Определение отражённой вершины.
for jX from 1 to km do S[my,jX]:=xn[jX] end do:#Изменение
симплекса.
xx:=array(1..km,[]):for jnn from 1 to km do
X01[jnn]:=evalf(S[my,jnn],7):end
do:X01:=Proek([X01[1],X01[2]]);yy[my]:=fw1(X01,N,KN);#Вычисление
функции в отражённой вершине.
end do:#Отражение n раз симплекса.
if Ymin<YYmin then YYmin:=Ymin:XXmin:=xmin: end
if:a:=a*aa:#Изменение размера симплекса.
for ila from 1 to km do x00[ila]:=0:for ja from 1 to km+1 do
x00[ila]:=x00[ila]+S[ja,ila] end do:
x00[ila]:=x00[ila]/(km+1): end do:#Определение нового центра
симплекса.
S:=matrix(km+1,km,[]):for iS from 1 to km+1 do
for jS from 1 to km do S[iS,jS]:=evalf(x00[jS]+a*A[iS,jS],5):
end do: end do:end
do:SW:=SW+YYmin:print(`XX1=`,KN,`YYmin=`,YYmin/1000,`XXmin=`,XXmin
,`SW=`,SW/1000):end do:Swmin1:=SW/1000;

```

XXI=, .1, YYmin=, 906.5367150, XXmin=, [1, 1], SW=, 906.5367150

XXI=, .2, YYmin=, 841.1551477, XXmin=, [1, 1.05569 ], SW=, 1747.691863

$XXI=, .3, YYmin=, 1353.149644, XXmin=, [1, 1], SW=, 3100.841507$   
 $XXI=, .4, YYmin=, 1838.836748, XXmin=, [1, 1], SW=, 4939.678255$   
 $XXI=, .5, YYmin=, 1869.829840, XXmin=, [1, 1.49443], SW=, 6809.508095$   
 $XXI=, .6, YYmin=, 2055.956462, XXmin=, [1, 1], SW=, 8865.464557$   
 $XXI=, .7, YYmin=, 2114.037751, XXmin=, [1, 1], SW=, 10979.50231$   
 $XXI=, .8, YYmin=, 2168.955293, XXmin=, [1, 1.05569], SW=, 13148.45760$   
 $XXI=, .9, YYmin=, 2325.033333, XXmin=, [1, 1], SW=, 15473.49093$   
 $XXI=, 1.0, YYmin=, 2254.199360, XXmin=, [1, 1], SW=, 17727.69029$   
 $XXI=, 1.1, YYmin=, 2751.891590, XXmin=, [1, 1.05569], SW=, 20479.58188$   
 $XXI=, 1.2, YYmin=, 2776.797254, XXmin=, [1, 1], SW=, 23256.37913$   
 $XXI=, 1.3, YYmin=, 3366.264454, XXmin=, [1, 1], SW=, 26622.64358$   
 $XXI=, 1.4, YYmin=, 4111.148678, XXmin=, [1, 1], SW=, 30733.79226$   
 $XXI=, 1.5, YYmin=, 4354.764050, XXmin=, [1, 1], SW=, 35088.55631$   
 $XXI=, 1.6, YYmin=, 4356.037070, XXmin=, [1, 1], SW=, 39444.59338$   
 $XXI=, 1.7, YYmin=, 4391.766934, XXmin=, [1, 1.05569], SW=, 43836.36031$   
 $XXI=, 1.8, YYmin=, 4497.496724, XXmin=, [1, 1], SW=, 48333.85703$   
 $XXI=, 1.9, YYmin=, 4615.120125, XXmin=, [1, 1], SW=, 52948.97716$   
 $XXI=, 2.0, YYmin=, 4474.580320, XXmin=, [1, 1], SW=, 57423.55748$   
 $XXI=, 2.1, YYmin=, 5133.915752, XXmin=, [1, 1], SW=, 62557.47323$   
 $XXI=, 2.2, YYmin=, 5317.070150, XXmin=, [1, 1], SW=, 67874.54338$   
 $XXI=, 2.3, YYmin=, 5246.549126, XXmin=, [1, 1], SW=, 73121.09251$   
 $XXI=, 2.4, YYmin=, 6098.165262, XXmin=, [1, 1], SW=, 79219.25777$   
 $XXI=, 2.5, YYmin=, 6309.440200, XXmin=, [1, 1], SW=, 85528.69797$   
 $XXI=, 2.6, YYmin=, 6278.951588, XXmin=, [1, 1], SW=, 91807.64956$   
 $XXI=, 2.7, YYmin=, 6360.716341, XXmin=, [1, 1], SW=, 98168.36590$   
 $XXI=, 2.8, YYmin=, 6534.080294, XXmin=, [1, 1], SW=, 104702.4462$   
 $XXI=, 2.9, YYmin=, 6661.386375, XXmin=, [1, 1], SW=, 111363.8326$   
 $XXI=, 3.0, YYmin=, 6813.556750, XXmin=, [1, 1], SW=, 118177.3894$   
 $Swmin1 := 118177.3894$

\*\*\*\*\*

```

> SW:=0:Lo:=L:print(`Оптимальные межпоездные расстояния при
параллельной схеме`);
for KN from 0.1 by 0.1 while (KN<=3 or KN+xmin[1]+xmin[2]>=L) do
X01:=array(1..N-
1, [a, a]):a:=1:x00:=X01:x:=vector(km, []):yy:=array(1..N, []):xc:=vec
tor(km, []): A:=matrix(km+1, km, []):for iA from 1 to km+1 do for jA
from 1 to km do if jA<=iA-2 then A[iA, jA]:=0 else if jA=iA-1 then

```

```

A[iA,jA]:=R(iA-1) else A[iA,jA]:=-r1(jA) end if: end if:end
do: end do; S:=matrix(km+1,km,[]):for iX from 1 to km+1 do
  for jX from 1 to km do S[iX,jX]:=evalf(x00[jX]+a*A[iX,jX],5):
  end do: end do:
  YYmin:=300000000:while a>e do Ymin:=300000000:for kot from 1 to n
do for i7 from 1 to km+1 do for j7 from 1 to km do
X01[j7]:=evalf(S[i7,j7],7):end
do:X01:=Proek([X01[1],X01[2]]);yy[i7]:=fw3(X01,N,KN): end
do:#Расчёт значений функции в вершинах симплекса.
ymax:=-1000:for iy from 1 to km+1 do if yy[iy]>ymax then
my:=iy:ymax:=yy[iy]: end if:
end do:#Определение вершины с максимальным значением функции.
xmin:=array(1..km,[]):ymin:=500000000:for iy from 1 to km+1 do if
yy[iy]<ymin then my1:=iy:ymin:=yy[iy]: end if:
end do:if ymin<Ymin then Ymin:=ymin:Tok2:=Tok1: end if:for imin
from 1 to km do xmin[imin]:=S[my1,imin] end
do:xmin:=Proek([xmin[1],xmin[2]]):#Определение вершины с
минимальным значением функции.
for jc from 1 to km do xc[jc]:=evalf((sum(S[ic,jc],ic=1..km+1)-
S[my,jc])/km,5)
end do:#Определение центра симплекса.
for ix from 1 to km do x[ix]:=S[my,ix] end do;l:=evalm(xc-
x):xn:=evalm(x+2*l):#Определение отражённой вершины.
for jX from 1 to km do S[my,jX]:=xn[jX] end do:#Изменение
симплекса.
xx:=array(1..km,[]):for jnn from 1 to km do
X01[jnn]:=evalf(S[my,jnn],7):end
do:X01:=Proek([X01[1],X01[2]]);yy[my]:=fw3(X01,N,KN);#Вычисление
функции в отражённой вершине.
end do:#Отражение n раз симплекса.
if Ymin<YYmin then YYmin:=Ymin:XXmin:=xmin: end
if:a:=a*aa;#Изменение размера симплекса.
for ila from 1 to km do x00[ila]:=0:for ja from 1 to km+1 do
x00[ila]:=x00[ila]+S[ja,ila] end do:
x00[ila]:=x00[ila]/(km+1): end do:#Определение нового центра
симплекса.
S:=matrix(km+1,km,[]):for iS from 1 to km+1 do
  for jS from 1 to km do S[iS,jS]:=evalf(x00[jS]+a*A[iS,jS],5):
  end do: end do:end
do:SW:=SW+YYmin:print(`XX1=` ,KN,`YYmin=` ,YYmin/1000,`XXmin=` ,XXmin
,`SW=` ,SW/1000):end do:Swmin3:=SW/1000;

```

XXI=, .1, YYmin=, 360.0066661, XXmin=, [1, 1], SW=, 360.0066661

XXI=, .2, YYmin=, 328.7626482, XXmin=, [1, 1.05569], SW=, 688.7693143

XXI=, .3, YYmin=, 533.9332556, XXmin=, [1, 1], SW=, 1222.702570

XXI=, .4, YYmin=, 712.2133757, XXmin=, [1, 1], SW=, 1934.915946

XXI=, .5, YYmin=, 670.5257215, XXmin=, [1, 2.4385], SW=, 2605.441668

XXI=, .6, YYmin=, 781.0120167, XXmin=, [1, 1], SW=, 3386.453685

XXI=, .7, YYmin=, 795.1651360, XXmin=, [1, 1], SW=, 4181.618821

```

XXI=, .8, YYmin=, 713.9374713, XXmin=, [1, 5.1745 ], SW=, 4895.556292
    XXI=, .9, YYmin=, 854.9153223, XXmin=, [1, 1 ], SW=, 5750.471614
    XXI=, 1.0, YYmin=, 817.9826667, XXmin=, [1, 1 ], SW=, 6568.454281
    XXI=, 1.1, YYmin=, 727.8610346, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 7296.315316
    XXI=, 1.2, YYmin=, 723.2308504, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 8019.546166
    XXI=, 1.3, YYmin=, 898.8302818, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 8918.376448
    XXI=, 1.4, YYmin=, 1094.715830, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 10013.09228
    XXI=, 1.5, YYmin=, 1151.208646, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 11164.30093
    XXI=, 1.6, YYmin=, 1135.625523, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 12299.92645
    XXI=, 1.7, YYmin=, 1121.478752, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 13421.40520
    XXI=, 1.8, YYmin=, 1132.140454, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 14553.54565
    XXI=, 1.9, YYmin=, 1145.936357, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 15699.48201
    XXI=, 2.0, YYmin=, 1075.628961, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 16775.11097
    XXI=, 2.1, YYmin=, 1244.305109, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 18019.41608
    XXI=, 2.2, YYmin=, 1266.101356, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 19285.51744
    XXI=, 2.3, YYmin=, 1640.810193, XXmin=, [1, 1 ], SW=, 20926.32763
    XXI=, 2.4, YYmin=, 1429.457200, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 22355.78483
    XXI=, 2.5, YYmin=, 1455.503853, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 23811.28868
    XXI=, 2.6, YYmin=, 1412.457363, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 25223.74604
    XXI=, 2.7, YYmin=, 1400.314749, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 26624.06079
    XXI=, 2.8, YYmin=, 1417.056584, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 28041.11737
    XXI=, 2.9, YYmin=, 1414.314015, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 29455.43138
    XXI=, 3.0, YYmin=, 1417.006115, XXmin=, [1, 6.6561 ], SW=, 30872.43750
    Swmin3 := 30872.43750

```

```
*****
```

```

> SW:=0:Lo:=L:print(`Оптимальные межпоездные расстояния при узловой
схеме`);
for KN from 0.1 by 0.1 while (KN<=3 or KN+xmin[1]+xmin[2]>=L) do
X01:=array(1..N-
1,[a,a]):a:=1:x00:=X01:x:=vector(km,[]):yy:=array(1..N,[]):xc:=vec
tor(km,[]): A:=matrix(km+1,km,[]):for iA from 1 to km+1 do for jA
from 1 to km do if jA<=iA-2 then A[iA,jA]:=0 else if jA=iA-1 then
A[iA,jA]:=R(iA-1) else A[iA,jA]:=-r1(jA) end if: end if:end do:
end do; S:=matrix(km+1,km,[]):for iX from 1 to km+1 do
for jX from 1 to km do S[iX,jX]:=evalf(x00[jX]+a*A[iX,jX],5):
end do: end do:
YYmin:=300000000:while a>e do Ymin:=300000000:for kot from 1 to n
do for i7 from 1 to km+1 do for j7 from 1 to km do
X01[j7]:=evalf(S[i7,j7],7):end

```

```

do:X01:=Proek([X01[1],X01[2]]);yy[i7]:=fw2(X01,N,KN): end
do:#Расчёт значений функции в вершинах симплекса.
ymax:=-1000:for iy from 1 to km+1 do if yy[iy]>=ymax then
my:=iy:ymax:=yy[iy]: end if:
end do:#Определение вершины с максимальным значением функции.
xmin:=array(1..km,[]):ymin:=50000000:for iy from 1 to km+1 do if
yy[iy]<ymin then my1:=iy:ymin:=yy[iy]: end if:
end do:if ymin<Ymin then Ymin:=ymin:Tok2:=Tok1: end if:for imin
from 1 to km do xmin[imin]:=S[my1,imin] end
do:xmin:=Proek([xmin[1],xmin[2]]):#Определение вершины с
минимальным значением функции.
for jc from 1 to km do xc[jc]:=evalf((sum(S[ic,jc],ic=1..km+1)-
S[my,jc])/km,5)
end do:#Определение центра симплекса.
for ix from 1 to km do x[ix]:=S[my,ix] end do;l:=evalm(xc-
x):xn:=evalm(x+2*l):#Определение отражённой вершины.
for jX from 1 to km do S[my,jX]:=xn[jX] end do:#Изменение
симплекса.
xx:=array(1..km,[]):for jnn from 1 to km do
X01[jnn]:=evalf(S[my,jnn],7):end
do:X01:=Proek([X01[1],X01[2]]);yy[my]:=fw2(X01,N,KN);#Вычисление
функции в отражённой вершине.
end do:#Отражение n раз симплекса.
if Ymin<YYmin then YYmin:=Ymin:XXmin:=xmin: end
if:a:=a*aa:#Изменение размера симплекса.
for ila from 1 to km do x00[ila]:=0:for ja from 1 to km+1 do
x00[ila]:=x00[ila]+S[ja,ila] end do:
x00[ila]:=x00[ila]/(km+1): end do:#Определение нового центра
симплекса.
S:=matrix(km+1,km,[]):for iS from 1 to km+1 do
for jS from 1 to km do S[iS,jS]:=evalf(x00[jS]+a*A[iS,jS],5):
end do: end do:end
do:SW:=SW+YYmin:print(`XX1=` ,KN, `YYmin=` ,YYmin/1000, `XXmin=` ,XXmin
, `SW=` ,SW/1000):end do:Swmin4:=SW/1000;

```

```

XXI=, .1, YYmin=, 720.0133323, XXmin=, [1, 1], SW=, 720.0133323
XXI=, .2, YYmin=, 657.5252965, XXmin=, [1, 1.05569], SW=, 1377.538629
XXI=, .3, YYmin=, 1067.866511, XXmin=, [1, 1], SW=, 2445.405140
XXI=, .4, YYmin=, 1424.426751, XXmin=, [1, 1], SW=, 3869.831891
XXI=, .5, YYmin=, 1341.051443, XXmin=, [1, 2.4385], SW=, 5210.883334
XXI=, .6, YYmin=, 1562.024034, XXmin=, [1, 1], SW=, 6772.907368
XXI=, .7, YYmin=, 1590.330272, XXmin=, [1, 1], SW=, 8363.237640
XXI=, .8, YYmin=, 1427.874943, XXmin=, [1, 5.1745], SW=, 9791.112583
XXI=, .9, YYmin=, 1709.830644, XXmin=, [1, 1], SW=, 11500.94323
XXI=, 1.0, YYmin=, 1635.965334, XXmin=, [1, 1], SW=, 13136.90856
XXI=, 1.1, YYmin=, 1455.722069, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 14592.63063

```

$XXI=, 1.2, YYmin=, 1446.461700, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 16039.09233$

$XXI=, 1.3, YYmin=, 1797.660563, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 17836.75289$

$XXI=, 1.4, YYmin=, 2189.431658, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 20026.18455$

$XXI=, 1.5, YYmin=, 2302.417291, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 22328.60184$

$XXI=, 1.6, YYmin=, 2271.251047, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 24599.85289$

$XXI=, 1.7, YYmin=, 2242.957505, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 26842.81040$

$XXI=, 1.8, YYmin=, 2264.280908, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 29107.09131$

$XXI=, 1.9, YYmin=, 2291.872714, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 31398.96402$

$XXI=, 2.0, YYmin=, 2151.257924, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 33550.22194$

$XXI=, 2.1, YYmin=, 2488.610220, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 36038.83216$

$XXI=, 2.2, YYmin=, 2532.202712, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 38571.03487$

$XXI=, 2.3, YYmin=, 3281.620384, XXmin=, [1, 1], SW=, 41852.65525$

$XXI=, 2.4, YYmin=, 2858.914402, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 44711.56965$

$XXI=, 2.5, YYmin=, 2911.007707, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 47622.57736$

$XXI=, 2.6, YYmin=, 2824.914724, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 50447.49208$

$XXI=, 2.7, YYmin=, 2800.629500, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 53248.12158$

$XXI=, 2.8, YYmin=, 2834.113169, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 56082.23475$

$XXI=, 2.9, YYmin=, 2828.628029, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 58910.86278$

$XXI=, 3.0, YYmin=, 2834.012231, XXmin=, [1, 6.6561], SW=, 61744.87501$

$Swmin4 := 61744.87501$



```

> restart:with (combstruct) :
> n:=4; Число элементов носителя списков.
      n := 4

> W:=[seq(k,k=1..n)]; Носитель списков.
      W := [1, 2, 3, 4]

> L:=[]:allp := iterstructs (Permutation(W)) :
while not finished(allp) do L:=[op(L), nextstruct(allp)]: end
do: Процедура построения всех списков.
> print(`L=`, L);
L=, [[1, 2, 3, 4], [2, 1, 3, 4], [3, 1, 2, 4], [1, 3, 2, 4], [2, 3, 1, 4], [3, 2, 1, 4], [4, 2, 1, 3],
      [2, 4, 1, 3], [1, 4, 2, 3], [4, 1, 2, 3], [2, 1, 4, 3], [1, 2, 4, 3], [1, 3, 4, 2], [3, 1, 4, 2],
      [4, 1, 3, 2], [1, 4, 3, 2], [3, 4, 1, 2], [4, 3, 1, 2], [4, 3, 2, 1], [3, 4, 2, 1], [2, 4, 3, 1],
      [4, 2, 3, 1], [3, 2, 4, 1], [2, 3, 4, 1]]

>
F:=[[665.1, [1, 2, 3, 4]], [876.1, [1, 2, 4, 3]], [659, [1, 3, 2, 4]], [791.6, [1,
3, 4, 2]], [819.2, [1, 4, 2, 3]], [908.7, [1, 4, 3, 2]], [673.3, [2, 1, 3, 4]], [893
, [2, 1, 4, 3]], [694.1, [2, 3, 1, 4]], [866.2, [2, 3, 4, 1]], [865.5, [2, 4, 1, 3]],
[953.7, [2, 4, 3, 1]], [671.9, [3, 1, 2, 4]], [808.6, [3, 1, 4, 2]], [666.5, [3, 2,
1, 4]], [849.8, [3, 2, 4, 1]], [853.2, [3, 4, 1, 2]], [835.4, [3, 4, 2, 1]], [862.7
, [4, 1, 2, 3]], [882, [4, 1, 3, 2]], [827.7, [4, 2, 1, 3]], [871.6, [4, 2, 3, 1]], [9
45.3, [4, 3, 1, 2]], [937.5, [4, 3, 2, 1]]]; Задание функции списка.
F := [[665.1, [1, 2, 3, 4]], [876.1, [1, 2, 4, 3]], [659, [1, 3, 2, 4]], [791.6, [1, 3, 4, 2]],
[819.2, [1, 4, 2, 3]], [908.7, [1, 4, 3, 2]], [673.3, [2, 1, 3, 4]], [893, [2, 1, 4, 3]],
[694.1, [2, 3, 1, 4]], [866.2, [2, 3, 4, 1]], [865.5, [2, 4, 1, 3]], [953.7, [2, 4, 3, 1]],
[671.9, [3, 1, 2, 4]], [808.6, [3, 1, 4, 2]], [666.5, [3, 2, 1, 4]], [849.8, [3, 2, 4, 1]],
[853.2, [3, 4, 1, 2]], [835.4, [3, 4, 2, 1]], [862.7, [4, 1, 2, 3]], [882, [4, 1, 3, 2]],
[827.7, [4, 2, 1, 3]], [871.6, [4, 2, 3, 1]], [945.3, [4, 3, 1, 2]], [937.5, [4, 3, 2, 1]]]

>
> VarList:=proc(L,i,j) local L1,i1,j1,a;
L1:=L:i1:=i:j1:=j:a:=L1[i1]:L1[i1]:=L1[j1]:L1[j1]:=a:RETURN(L1) :
end proc: Элементарная вариации списка.
> V:=VarList(L[1],2,2); Начальный список.
      V := [1, 2, 3, 4]

> LL:=[]:k:=0:for i from 1 to n do for j from 1 to n do if i<>j
then k:=k+1:LL:=[op(LL), VarList(V,i,j)]: print(k,VarList(V,i,j)):
end if: end do: end do; Вариации заданного списка V.
      1, [2, 1, 3, 4]
      2, [3, 2, 1, 4]
      3, [4, 2, 3, 1]
      4, [2, 1, 3, 4]
      5, [1, 3, 2, 4]
      6, [1, 4, 3, 2]
      7, [3, 2, 1, 4]

```

8, [1, 3, 2, 4]

9, [1, 2, 4, 3]

10, [4, 2, 3, 1]

11, [1, 4, 3, 2]

12, [1, 2, 4, 3]

> for i from 1 to k do for j from 1 to k do if i<>j then if LL[i]=LL[j] then LL[j]:=h: end if: end if: end do: end do; Удаление повторов среди вариаций списка V.

> kk:=0:for i from 1 to k do if LL[i]<>h then kk:=kk+1:print(kk,LL[i]): end if: end do; Печать вариаций заданного списка V.

1, [2, 1, 3, 4]

2, [3, 2, 1, 4]

3, [4, 2, 3, 1]

4, [1, 3, 2, 4]

5, [1, 4, 3, 2]

6, [1, 2, 4, 3]

>

> fmin:=1000:for j from 1 to k do for ii from 1 to n! do if LL[j]=op(2,op(ii,F)) then print(LL[j],`f=`,op(1,op(ii,F))):if fmin>op(1,op(ii,F)) then fmin:=op(1,op(ii,F)):Lmin:=op(2,op(ii,F)): end if: end if: end do: end do; Определение списка, доставляющего минимум функции списка.

[2, 1, 3, 4], f=, 673.3

[3, 2, 1, 4], f=, 666.5

[4, 2, 3, 1], f=, 871.6

[1, 3, 2, 4], f=, 659

[1, 4, 3, 2], f=, 908.7

[1, 2, 4, 3], f=, 876.1

> print(`Lmin=`,Lmin,`fmin=`,fmin);  
Lmin=, [1, 3, 2, 4], fmin=, 659

> Fmin:=10000:V:=Lmin:while Fmin>fmin do print(`V=`,V,`fmin=`,fmin): LL:=[:k:=0:for i from 1 to n do for j from 1 to n do if i<>j then k:=k+1:LL:=[op(LL),VarList(V,i,j)]: end if: end do: end do:for i from 1 to k do for j from 1 to k do if i<>j then if LL[i]=LL[j] then LL[j]:=h: end if: end if: end do: end do:for j from 1 to k do for ii from 1 to n! do if LL[j]=op(1,op(ii,F)) then print(LL[j],`f=`,op(2,op(ii,F))):if fmin>op(2,op(ii,F)) then

```
fmin:=op(2,op(ii,F)):Lmin:=op(1,op(ii,F)): end if: end if:
end do: end do;Fmin:=fmin:LF:=Lmin:V:=LF; end
do:print(`LFmin=`,LF,`Fmin=`,Fmin);
      V=[1,3,2,4],fmin=,659
      LFmin=[1,3,2,4],Fmin=,659
```

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Порядок работы с ПК «Поток»

Программа может использоваться инженерами-графистами при построении ГДП, а также диспетчерским аппаратом при организации движения на электрифицированных линиях. Программа используется при работе соответствующих подразделений железной дороги. Продукт не имеет требований к времени сбора данных. Вся информация вводится соответствующим сотрудником в ручном режиме с клавиатуры. Пользователи могут начинать работу с программой сразу после ее запуска.

В табл. Г.1 представлены сообщения пользователю, которые могут появиться в процессе работы программы.

Таблица Г.1 – Сообщения, которые появляются в процессе работы программы

Текст сообщения	Описание ситуации	Рекомендованные действия
1	2	3
Значения не могут быть равными нулю	На форме есть поля, значения которых равны нулю	Исправьте значение полей, которые не могут принимать нулевые значения
Не выбран режим оптимизации	Не выбран ни один режим оптимизации	Выберите один из трех возможных режимов оптимизации
Значение длины участка должно быть больше нуля	Введенное значение длины участка равно нулю	Исправьте значение длины участка (это значение не может равняться нулю)
Значение уровня напряжение на первой подстанции должно быть больше нуля	Введенное значение уровня напряжения на первой подстанции равно нулю	Исправьте значение уровня напряжения на первой подстанции (это значение не может равняться нулю)
Значение уровня напряжение на второй подстанции должно быть больше нуля	Введенное значение уровня напряжения на второй подстанции равно нулю	Исправьте значение уровня напряжения на второй подстанции (это значение не может равняться нулю)
Значение уровня минимального интервала попутного следования должно быть больше нуля	Введенное значение уровня минимального интервала попутного следования равно нулю	Исправьте значение уровня минимального интервала попутного следования (это значение не может равняться нулю)

Окончание табл. Г.1

Текст сообщения	Описание ситуации	Рекомендованные действия
1	2	3
Значение уровня максимального интервала должно быть больше значения уровня минимального интервала	Введенное значение уровня максимального интервала попутного следования меньше значения уровня минимального интервала попутного следования	Исправьте значение уровня максимального интервала или минимального интервала попутного следования так, чтобы значение уровня максимального интервала попутного следования было больше значения минимального интервала
Значение уровня максимального интервала попутного следования должно быть больше нуля	Введенное значение уровня максимального интервала попутного следования равно нулю	Исправьте значение уровня максимального интервала попутного следования (это значение не может равняться нулю)
Значение подхода должно быть больше нуля	Введенное значение количества поездов на подходе к участку тяговой сети равно нулю	Исправьте значение количества поездов на подходе к участку тяговой сети (это значение не может равняться нулю)

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

## Свидетельство регистрации авторского права

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

**СВІДОЦТВО**  
про реєстрацію авторського права на твір

№ 48202

Комп'ютерна програма "Автоматизована система складання енергоефективного графіку руху поїздів "Поток"  
(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Калашников Костянтин Олексійович, Кузнецов Валерій Геннадійович, Босій Дмитро Олексійович**  
(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна, вул. Ак. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010**  
(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації 05.03.2013

  
Голова Державної служби інтелектуальної власності України  
**М.В. Ковіня**

**ПРИЛОЖЕНИЕ Е****АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ**



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Начальник Ужгородської  
дистанції електропостачання  
Роговський С.В.

« 18 » 12 2011 р.

### АКТ

про впровадження результатів НДР «Розробка наукових основ раціональних режимів системи тягового електропостачання»

Комісія в складі начальника ЕЧ-7 Ужгород Роговського С.В., заступника начальника ЕЧ-7 Тидіра О.В., склали цей акт про те, що результати НДР «Розробка наукових основ раціональних режимів системи тягового електропостачання» використані в дистанції електропостачання Ужгород.

На сучасному етапі розвитку економіки України у всіх галузях промисловості, у тому числі й на транспорті, впроваджуються ринкові відносини. У цих умовах залізничному транспорту необхідно вишукувати резерви зниження собівартості перевізного процесу, щоб ефективно конкурувати з іншими видами транспорту.

На розвиток залізничного транспорту в Україні вплинув цілий ряд негативних факторів, зокрема:

- прогресуюче старіння основних фондів;
- відсутність державної підтримки інноваційного розвитку області й недосконала законодавча база для залучення інвестицій;
- низький рівень тарифів на перевезення пасажирів і відсутність діючих механізмів компенсації збитків при наданні суспільних послуг, яку приводить до перехресного субсидування збиткових пасажирських перевезень за рахунок вантажних;
- випереджальний ріст цін на продукцію, яка споживається залізничним транспортом, порівняно з темпами зміни тарифів на перевезення.

В представлений НДР розраховано потенціал енергозбереження за рахунок раціоналізації режимів системи тягового електропостачання. Показано, що для підвищення енергетичної ефективності систем електропостачання необхідно враховувати можливість розрахунків за електроенергію по диференційованим тарифам та за оптовими цінами. Створено модель вибору енергоощадних технологій на основі методу аналізу ієрархій. Досліджено вплив організації руху поїздів на втрати електроенергії в елементах системи тягового електропостачання. Вдосконалено моделі розрахунку системи електропостачання на основі потоків відновлення, методи визначення оптимальних напруг на шинах тягових підстанцій. Знайшли подальший розвиток методи переходу на паралельну роботу силових трансформаторів

тягових підстанцій. Також досліджено стійкість тягових мереж постійного струму при аварійних режимах.


Застосування розроблених підходів до управління режимами систем тягового електропостачання дозволило зменшити технологічні втрати електроенергії в елементах системи тягового електропостачання в межах 3-8%.


Проведені дослідження по стійкості функціонування комутаційних пристроїв постійного струму показали, що доцільно використовувати спрямовану МСЗ як струмову відсічку, а в якості основного захисту використовувати захист за опором, для точної відстройки уставок різних захистів в складних робочих умовах необхідно мати осцилограми характерних критичних робочих режимів, рекомендується виконувати заміри параметрів та розрахунки зовнішніх характеристик тягових підстанцій для використання цих даних при розрахунках струмів короткого замикання.

Заст. начальника ЕЧ



Тидір О.В.



**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
 Проректор університету з наукової роботи  
 С. В. Мямлін


**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
 Начальник служби «Е»  
 М.О. Фесик

**ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ  
 СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ  
 ЛЬВІВСЬКОЇ ЗАЛІЗНИЦІ ПО ЕЧ-7 УЖГОРОД**

**ПОГОДЖЕНО**

Зав. каф. ЕПЗ  В.Г. Сиченко

Начальник  
ЕЧ-7  С.Ю. Помельніков

м. Дніпропетровськ  
 2010

### 1. Мета дослідження

Підвищення енергетичної ефективності системи тягового електропостачання Львівської залізниці за рахунок керування режимами.

Дослідження та розрахунок характеристик потоків поїздів дослідної електрифікованої ділянки.

Визначення реальних електричних параметрів системи тягового електропостачання. Визначення експериментальних зовнішніх характеристик тягових підстанцій дослідної ділянки.

Робота виконується у відповідності до держбюджетної теми «Розробка наукових основ раціональних режимів системи тягового електропостачання»

### 2. Виконавці

Від ДПТУ	Від Львівської залізниці
1. Сиченко В.Г.	1. Фічоряк Ф.О.
2. Кузнецов В.Г.	2. Тидір О.В.
3. Рябокінь Б.О.	
4. Калашников К.О.	

### 3. Умови проведення іспитів та вихідні дані

Особливих вимог до погодних умов не передбачається. Схема електропостачання дослідної ділянки – нормальна, двухстороння. Фрагмент схеми дослідної ділянки представлений на рис. 1.

Вихідними даними для досліджень виступають:

- виконані графіки руху потягів;
- параметри системи тягового електропостачання;
- графіки навантаження тягових підстанцій;
- експериментальні заміри показників якості електроенергії на тягових підстанціях.

Аналіз виконаних графіків руху потягів проводиться представниками ДНУЗТ окремо. Параметри тягових підстанцій заносяться в табл.1 (по кожній тяговій підстанції окремо). Параметри дослідної ділянки заносяться в табл. 2-4.

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший проректор Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
д.т.н., професор.



Б.Є. Боднар

2013 р.

АКТ

використання результатів дисертаційної роботи  
Калашникова Костянтина Олексійовича  
на тему: «Зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень»

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 кандидатській дисертації Калашникова К. О.:

1. Розроблена математична модель енергооптимальної дислокації тягових навантажень між тяговими підстанціями, що дозволяє вибирати схеми розташування поїздів на міжпідстанційній зоні на кожному кроці часу, при яких втрати електроенергії в тяговій мережі мінімальні.
2. Сформульований принцип зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі на основі методу деформованого багатогранника, що дозволяє розраховувати оптимальні відстані між тяговими навантаженнями для побудови енергоефективних графіків руху поїздів.
3. Запропоновано принцип зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі на основі евристичного алгоритму пошуку мінімуму функції списку за рахунок вибору оптимальної послідовності відправлення та інтервалів між поїздами.
4. Розроблено програмний комплекс «Поток». Методом імітаційного моделювання встановлено можливість зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі на 27% від рівня втрат і на 2-3% від рівня витрат на тягу поїздів.

Начальник НМУ університету,  
к.т.н., доцент  
Декан факультету  
«Електрифікація залізниць»  
к.т.н., доцент  
Зав. каф. «Електропостачання залізниць»  
д.т.н., професор

О. О. Матусевич

А. І. Кійко

В. Г. Сиченко

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник \_\_\_\_\_ служби

електропостачання

ДП «Придніпровська залізниця»



О. О. Самков

« 5 » 09 2013 р.

**АКТ**

використання результатів дисертаційної роботи

Калашникова Костянтина Олексійовича

на тему: «Зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень»

Цим підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Калашникова К. О. прийняті до виконання у службі електропостачання Придніпровської залізниці при розробці заходів щодо економії паливно-енергетичних ресурсів на електрифікованих ділянках постійного струму. Особливо важливими як в теоретичному, так і в практичному плані вважаємо такі результати:

1. Встановлено резерви зменшення втрат електроенергії у тяговій мережі шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень (2-3% від рівня витрат електроенергії на тягу поїздів).
2. Розробка наукових принципів зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень між тяговими підстанціями.
3. Розробка програмного комплексу «Поток» для складання графіків руху поїздів з урахуванням енергетичних характеристик системи тягового електропостачання.
4. Економічний ефект від впровадження запропонованих в дисертації методів зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі на електрифікованих ділянках Придніпровської залізниці складає 1.4 млн грн за 1 рік.

Перший заступник начальника  
служби електропостачання

  
С. О. Горбач

Головний інженер  
служби електропостачання

  
В. В. Погорілий

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник Дніпропетровської  
дирекції залізничних перевезень

А. С. Борецький

2013 р.

## АКТ

використання результатів дисертаційної роботи

Калашникова Костянтина Олексійовича

на тему: «Зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень»

Цим підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Калашникова К. О. прийняті до виконання у Дніпропетровській дирекції залізничних перевезень при управлінні експлуатаційною роботою та складанні графіків руху поїздів на електрифікованих ділянках постійного струму.

Особливо важливими як в теоретичному, так і в практичному плані вважаємо такі результати:

1. Розробка наукових принципів зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень для побудови енергооптимальних графіків руху поїздів.
2. Встановлено резерви зменшення втрат електроенергії у тяговій мережі шляхом регулювання інтервалів між поїздами, послідовності їх відправлення до 27% (від рівня втрат).
3. Розробка програмного комплексу «Поток» для автоматизованного складання енергооптимальних графіків руху поїздів.

Начальник відділу перевезень



Д. І. Дядюшкін

Головний інженер



О. Г. Лашко

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник служби  
електропостачання



С. Д. Бітюков  
09 2013 р.

### АКТ

використання результатів дисертаційної роботи  
Калашникова Костянтина Олексійовича  
на тему: «Зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень»

Цим підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Калашникова К. О. прийняті до виконання у службі електропостачання Донецької залізниці при розробці заходів з енергозбереження.

Особливо важливими як в теоретичному, так і в практичному плані вважаємо такі результати:

1. Розраховано потенціал зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень – 2-3% від рівня витрат електроенергії на тягу поїздів.
2. Встановлено, що для створення рівномірного навантаження на тягові підстанції та зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі при управлінні транспортним потоком необхідно регулювати його показники, а саме: інтервали між поїздами та послідовність їх відправлення.
3. Розроблена математична модель енергооптимальної дислокації тягових навантажень дозволяє визначати втрати електроенергії в тяговій мережі при різних положеннях поїздів на міжпідстанційній зоні.

Заступник начальника  
служби електропостачання

Б.К. Гетьманенко

Начальник Слов'янської  
дистанції електропостачання

О.С. Отрудько