МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики
(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»
(наименование)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки)

Энергосбережение и энергоэффективность
(направленность (профиль))

# ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Повышение энергоэффективности и энергосбережения предприятия АО «ВНИИЖТ»

Обучающийся К.О. Кажихин _____
(И.О. Фамилия) (личная подпись)

Руководитель к.т.н. В.И. Платов
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2025

**Содержание**

Введение ..... 4
1 Анализ эффективности применяемых на железной дороге методов и средств энергосбережения ..... 8
1.1 Обоснование необходимости внедрения энергосберегающих технологий на железнодорожном транспорте ..... 8
1.2 Политика ПАО «РЖД» в области энергосбережения ..... 10
1.3 Рекуперативное торможение, как главный технологический прием энергосберегающих технологий на железнодорожном транспорте ..... 19
1.4 Анализ эффективности использования рекуперативного торможения в ОАО «РЖД» ..... 25
1.5 Анализ способов возврата электрической энергии при применении рекуперативного торможения ..... 30
2 Анализ текущего состояния применения энергосберегающих технологий на АО «ВНИИЖТ» ..... 40
2.1 Система сбора и анализа данных о потреблении электроэнергии при движении электропоездов ..... 40
2.2 Автоматизированная система мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса ..... 46
2.3 Нормативные данные, применяемые АО «ВНИИЖТ» для оценки энергоэффективности перевозочного процесса ..... 53
3 Разработка мероприятий, направленных на снижение электропотребления при перевозке грузов по железной дороге ..... 60
3.1 Нормирование и планирование возврата электроэнергии в контактную сеть при применении рекуперативного торможения по результатам поездов ..... 60
3.2 Анализ результатов экспериментальных поездок ЭПС в режиме рекуперации ..... 64

3.3 Разработка рекомендаций по оптимизации массы поездов ..... 68
3.4 Разработка рекомендаций по применению рекуперативного торможения при эксплуатации электрофицированного подвижного состава ..... 80
3.4.1 Расчет и анализ параметров системы тягового электроснабжения без учета рекуперативного торможения ..... 81
3.4.2 Расчет и анализ параметров системы тягового электроснабжения с учетом рекуперативного торможения ..... 87
3.4.3 Сравнительный анализ результатов расчета двух режимов движения поездов ..... 93
4 Технико–экономическая оценка предложенных мероприятий по снижению электропотребления ..... 98
Заключение ..... 111
Список используемых источников ..... 113

# Введение

Одной из приоритетных задач, стоящих перед экономикой Российской Федерации в среднесрочной перспективе, является рациональное и максимально эффективное использование имеющихся топливно-энергетических ресурсов. Среди ключевых отраслей народного хозяйства, характеризующихся высоким уровнем энергопотребления, особое место занимает железнодорожный транспорт, ежегодно расходующий порядка 23 миллионов тонн условного топлива. Структура энергетического баланса данного сектора демонстрирует явное доминирование электрической энергии, используемой для обеспечения тягового подвижного состава, на долю которой приходится 75% от общего объёма потребления, в то время как показатель расхода дизельного топлива достигает 30%.

Одной из ключевых задач, актуальных в настоящее время, является оптимизация эффективности использования электрической тяги для поездов, курсирующих по железнодорожной сети Российской Федерации. Учитывая, что 85% транспортных задач зависит от электрической тяги, это подчеркивает острую необходимость для ОАО «Российские железные дороги» (РЖД) сосредоточиться на разработке инновационных подходов для повышения эффективности использования электроэнергии при тяге поездов.

Для обеспечения устойчивой конкурентоспособности железнодорожного транспорта в современных экономических условиях особую актуальность приобретает задача существенного снижения энергетической емкости перевозочного процесса, что является важным фактором повышения экономической эффективности транспортных операций.

Достижение указанной цели представляется возможным через последовательную реализацию комплекса взаимосвязанных организационно–технических мероприятий инновационного характера, среди которых особого

внимания заслуживают меры, направленные на совершенствование и оптимизацию энергетических процессов, возникающих при использовании перспективной технологии рекуперативного торможения подвижного состава.

Технология рекуперативного торможения обладает целым рядом существенных технологических и экономических преимуществ, основными из которых являются: значительное сокращение общего потребления электроэнергии за счет возврата части энергии в сеть; заметное уменьшение трудоемкости и объема технического обслуживания тормозного оборудования поездов на станционных комплексах; существенное повышение показателей безопасности движения благодаря плавности торможения; а также ощутимое снижение суммарных энергозатрат, необходимых для обеспечения тяговых процессов при движении составов.

Таким образом, проведение исследования, направленного на повышение энергетической эффективности железнодорожного транспорта, за счет применения новых методов и технологий энергосбережения, является актуальной задачей.

Целью данной работы является разработка предложений, направленных на снижение электропотребления при перевозке грузов по железной дороге.

Задачи исследования:

- провести теоретическое исследование эффективности применяемых на железной дороге методов и средств энергосбережения;
- проанализировать текущее состояние применения энергосберегающих технологий на АО «ВНИИЖТ»;
- предложить мероприятия, направленные на снижение электропотребления при перевозке грузов по железной дороге
- провести технико–экономическую оценку предложенных методов снижения электропотребления.

Объектом исследования является система обеспечения тягового подвижного состава РЖД электрической энергией.

Предметом исследования являются энергосберегающие мероприятия при использовании электрической тяги для поездов.

При написании работы были использованы методы оптимизации, теорию вероятности и математическую статистику, методы интегрального и дифференциального исчисления.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что внедрение предложенных методов энергосбережения позволит на 5–10% снизить потребление электроэнергии при сохранении прежних объемов перевозимых грузов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- рекомендации по применению рекуперативного торможения при эксплуатации электрического подвижного состава;
- рекомендации по оптимизации массы поездов с учетом рекуперативного торможения и применением компенсирующих устройств.

Новизна магистерской диссертации:

– новизна работы заключается в предложениях по оптимизации массы поездов, основанных на проведенном в данной работе исследовании и опытной эксплуатацией подвижного состава по межподстанционной зоне Анисимовка – Фридман.

В ходе проведения настоящего исследования был осуществлен всесторонний анализ научных публикаций, посвященных вопросам оптимизации энергопотребления в системах электроснабжения железнодорожного транспорта. Значительный вклад в разработку данной проблематики внесли такие видные ученые, как А.Н. Поплавский, В.Н. Пупынин, М.Г. Шалимов, В.Т. Черемисин, В.Л. Григорьев, А.Н. Марикин и

Л.А. Герман, чьи фундаментальные труды составили теоретическую основу исследования.

Дополнительный научный вклад в решение вопросов энергоэффективности железнодорожного транспорта внесли исследования Молярчука В.С., Розенфельда В.Е., Сосенко Ю.К. и Дашкевича А.Б. При этом следует отметить, что разработка практических аспектов проблем электропотребления осуществлялась не только академическими учреждениями, но и ведущими отраслевыми научными центрами, включая ВНИИЖТ, ИрГУПС, ОмГУПС, МИИТ, ДВГУПС, РГУПС, СамГУПС, а также РНЦ «Курчатовский институт» и ОИВТ РАН.

В процессе исследования также были проанализированы электронные информационные ресурсы, среди которых особую ценность представляют официальные порталы ОАО «РЖД» (eoi.rzd.ru, company.rzd.ru), научная электронная библиотека CyberLeninka (cyberleninca.ru), специализированные отраслевые сайты (zdenergosbyt.ru, tadviser.ru, eprussia.ru) и аналитический ресурс geonrg.ru.

Большое внимание в работе уделено анализу специализированных периодических изданий, регулярно публикующих материалы по вопросам энергоэффективности. К числу таких изданий относятся отраслевые журналы «Энергетика», «Энергетик», «Энергетик за рубежом», «Промышленная энергетика», «Проблемы энергетики», «РЖД-Партнер» и «Техника железных дорог», в которых систематически освещаются актуальные вопросы повышения энергетической и электрической эффективности железнодорожного транспорта.

Структура и объём работы. Структура: введение, 4 раздела, заключение, список используемых источников. Пояснительная записка содержит 119 страниц машинописного текста.

# 1 Анализ эффективности применяемых на железной дороге методов и средств энергосбережения

## 1.1 Обоснование необходимости внедрения энергосберегающих технологий на железнодорожном транспорте

В условиях современного технологического развития и роста экологических требований, проблема рационального использования энергетических ресурсов в транспортном секторе приобретает особую значимость и актуальность, что обусловлено совокупностью факторов, включая устойчивый рост энергопотребления, усиление антропогенной нагрузки на окружающую среду и прогрессирующее увеличение объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Транспортная инфраструктура Российской Федерации представляет собой сложную многоуровневую систему, которая интегрирует не только традиционные виды пассажирских и грузовых перевозок (железнодорожные, автомобильные, авиационные, морские и речные), но и включает в себя разветвленную сеть магистральных трубопроводов, предназначенных для транспортировки углеводородного сырья, что в совокупности формирует единый транспортно-энергетический комплекс страны.

Значительные масштабы и структурная неоднородность транспортной системы создают существенные предпосылки для реализации энергосберегающего потенциала, при этом грамотное внедрение соответствующих мероприятий способно обеспечить заметное сокращение объемов потребления энергетических ресурсов при сохранении необходимых транспортно-логистических показателей.

В контексте реализации государственной политики в области энергосбережения и выполнения стратегических задач по повышению энергетической эффективности национальной экономики, особое значение

приобретает разработка и внедрение комплексных решений, направленных на последовательное снижение энергоемкости транспортных операций, которое должно достигаться преимущественно за счет организационно-технических мероприятий без существенного увеличения объема капитальных вложений.

В железнодорожной транспортной подсистеме ключевым направлением повышения энергетической эффективности является разработка и внедрение инновационных технических решений, обеспечивающих оптимизацию процессов топливопотребления подвижным составом, что подтверждается положительными результатами уже реализованных мероприятий, выразившимися в объективном снижении энергоемкости основных производственных процессов отрасли [30].

«Развитие транспорта невозможно без использования природных ресурсов (нефть, газ), поэтому проблемы энергосбережения на транспорте тесно связаны с проблемами их эффективного использования. С 1950 по 1960 года доля нефти в совокупном энергопотреблении увеличилась с 2,9 до 26,5%, газа − с 0,6 до 13,0%. Это было вызвано широкомасштабным внедрением двигателей внутреннего сгорания на транспорте и в промышленности, развитием системы нефтяных и газовых проводов. Во второй половине двадцатого века опережающий рост использования углеводородов продолжался до начала 1970–х годов. В 60–е годы нефть как энергоноситель вышла на первое место. После нефтяных кризисов последних десятилетий XX в. развитые страны при постоянном росте потребления нефти и газа пошли в 80–90–е годы на некоторое увеличение потребления угля в энергетике (до 28,9%) и форсированное строительство атомных электростанций. Первоначально к этому подтолкнули нефтяные шоки 1973−1974 гг. и 1979 г. Однако в связи с высокой инерционностью технологических систем в энергетике и на транспорте замедлился, а в ряде случаев снизился спрос на нефть в развитых странах, и поэтому реальная

перестройка энергобалансов произошла только в начале 1980–х годов. Энергосбережение в транспортной отрасли (около 30% всей потребляемой энергии) может быть достигнуто за счет конструкций и устройств, обеспечивающих оптимизацию режимов работы транспорта: использование информационных и электронных систем (электронное зажигание, навигационное оборудование и др.), а также силовое электронное оборудование в железнодорожном транспорте (частотно–регулируемый тяговый и вспомогательный электропривод)» [29].

Можно выделить следующие основные направления деятельности по энергосбережению и повышению энергетической эффективности железнодорожного транспорта:

- повышение энергетической эффективности перевозочного процесса;
- развитие электросетевого комплекса – снижение потерь электроэнергии и повышение эффективности;
- повышение эффективности использования энергоресурсов в стационарной энергетике и на другие нетяговые нужды.

## 1.2 Политика ПАО «РЖД» в области энергосбережения

Открытое акционерное общество «РЖД» (далее – ОАО «РЖД») является безусловным лидером по энергоэффективности перевозок среди железнодорожных компаний.

Процесс формирования современного нормативно-правового регулирования в рассматриваемой сфере преследует четко обозначенную основополагающую цель. Указанная цель заключается в последовательном создании комплексных организационно-правовых предпосылок. Создаваемые предпосылки призваны обеспечить максимально полное

вовлечение всех категорий субъектов правоотношений в процессы, связанные с реализацией энергосберегающих мероприятий.

В контексте решения указанных задач особую научную и практическую актуальность приобретает анализ положений Федерального закона № 261-ФЗ, принятого законодательными органами Российской Федерации 23 ноября 2009 года. Предметом правового регулирования данного нормативного акта являются вопросы энергосбережения и повышения энергетической эффективности, а также внесения существенных изменений в смежные законодательные акты. В рамках закона устанавливается многоуровневый механизм стимулирования, направленный на активизацию энергосберегающей деятельности хозяйствующих субъектов на всех уровнях государственного и муниципального управления во всех без исключения секторах национальной экономики.

С методологической точки зрения рассматриваемый нормативный акт представляет собой важнейший системообразующий элемент современной государственной политики в области энергоэффективности, содержащий фундаментальные концептуальные основы рационального ресурсопотребления. В качестве методологической базы документа выступает сформулированный в его преамбуле принцип системной оптимизации использования энергетических ресурсов, который предполагает широкомасштабное внедрение инновационных энергосберегающих технологий параллельно с созданием системы экономических стимулов и преференций, направленных на последовательное повышение показателей энергетической эффективности.

Практическая реализация данного подхода обеспечивает достижение значимого двойного эффекта: с одной стороны - существенной экономии энергетических ресурсов, с другой - минимизации негативного экологического воздействия, традиционно связанного с антропогенной хозяйственной деятельностью.

На основе анализа в [21], «при этом стоит отметить, что законодательная база в области энергосбережения постоянно совершенствуется и дополняется новыми нормативными актами. Важным является не только принятие законов, но и их реализация на практике. Для этого необходимо совместное участие государства, бизнеса и общественности в этом процессе» [21].

Для достижения максимальной эффективности в использовании энергии, «необходимо принимать комплексные меры. Важно планировать энергосбережение и повышать энергетическую эффективность, а также учитывать ресурсные, производственно–технологические, экологические и социальные условия при использовании энергетических ресурсов» [13].

Рассматриваемый законодательный акт осуществляет правовое регулирование в указанной области общественных отношений. Нормативные положения данного документа носят преимущественно декларативный характер и обладают недостаточной юридической силой для непосредственного правоприменительного воздействия. Тем не менее, несмотря на ограниченную юридическую эффективность, документ сохраняет свою актуальность, поскольку в его тексте содержатся ценные методические рекомендации. Указанные рекомендации адресованы как юридическим лицам различных организационно-правовых форм, так и представляют практический интерес для физических лиц, осуществляющих деятельность в данной сфере.

В связи с все более актуализирующийся экологической повесткой и в связи с ростом энергопотребления, «становится важным не только эффективное использование ресурсов, но и переход на возобновляемые источники энергии. Поэтому, законодательство в этой сфере должно продолжать развиваться и ужесточаться, чтобы стимулировать компании и граждан вкладывать средства и усилия в экономию энергии и использование возобновляемых источников» [19].

Несмотря на отсутствие прямого действия, «Федеральный закон «Об энергосбережении» играет важную роль в формировании политики энергосбережения и повышения энергетической эффективности в России. Согласно этому закону, все организации и граждане обязаны сокращать потребление энергии и максимально использовать возобновляемые источники энергии» [12].

Действующий законодательный акт содержит развернутый перечень регулирующих мер, реализация которых способствует значительному снижению объемов потребления энергетических ресурсов. В числе обязательных мероприятий особое место занимает проведение комплексных энергетических обследований, позволяющих выявить потенциал энергосбережения. Особое внимание уделяется модернизации производственных мощностей посредством установки современного технологического оборудования, соответствующего наивысшим стандартам энергетической эффективности. Кроме того, законодатель особо подчеркивает необходимость внедрения инновационных технологических разработок в сфере энергосбережения, что способствует достижению долгосрочного эффекта в области рационального использования энергоресурсов.

Важно отметить, что рекомендации Федерального закона «Об энергосбережении» могут помочь организациям и гражданам сэкономить энергию и ресурсы, а также защитить окружающую среду. Поэтому, следует уделять особое внимание разработке и внедрению эффективных механизмов для реализации этого закона. Холдинг «Российские железные дороги» занимается активным участием в движении по энергосбережению в России. В своей стратегии холдинг ставит несколько задач, включая актуализацию своей энергетической стратегии, разработку и реализацию программ для повышения энергосбережения и эффективности использования энергии.

Один из основных принципов работы холдинга – это использование инновационных технологий и методов, направленных на повышение эффективности и экономии энергоресурсов. Все это говорит о том, что холдинг «Российские железные дороги» является ведущим игроком в экологической сфере и занимается важной работой по снижению негативного влияния промышленности на окружающую среду.

Холдинговая компания ОАО «РЖД» занимает ведущие позиции в реализации энергосберегающих мероприятий и повышении энергетической эффективности. Достижение лидерских позиций стало возможным благодаря многолетнему практическому опыту и современному технологическому оснащению, а также существенному влиянию действующего законодательного регулирования. Нормативно-правовые документы, включая Федеральный закон №35-ФЗ «Об электроэнергетике» и Федеральный закон №261-ФЗ «Об энергосбережении», устанавливают четкие регламенты осуществления деятельности в рассматриваемой сфере. Дополнительное регулирование обеспечивают ведомственные акты Министерства энергетики Российской Федерации, Министерства транспорта РФ и Федеральной службы по тарифам.

Компания демонстрирует устойчивую тенденцию к постоянному развитию, регулярно осуществляя модернизацию методологических подходов и рабочих практик. Приоритетным направлением деятельности является внедрение прогрессивных технологических разработок, направленных на оптимизацию энергопотребления в железнодорожной отрасли. Особое внимание уделяется созданию комплексной системы учета и контроля потребления энергетических ресурсов, что позволяет достигать значительных показателей энергоэффективности при обеспечении бесперебойного транспортного сообщения.

Обратим внимание на концепцию новой энергетической стратегии ОАО «РЖД», что является важным в контексте настоящего исследования:

«Концепция прогнозной Энергетической стратегии ОАО «РЖД» крайне важна для предупреждающего и сопутствующего технико–технологического и инвестиционного развития отрасли и компании. Своевременно спрогнозированная Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2050 года позволит эффективно развивать энергетическую и технологическую инфраструктуру, а также прибыльно строить бизнес Холдинга «РЖД» и входящих в него структур» [16].

Таким образом, «благодаря комплексному подходу и соблюдению нормативных требований, холдинг «Российские железные дороги» продолжает занимать лидирующие позиции в сфере энергосбережения и повышения энергетической эффективности в России» [16].

Для эффективной деятельности в сфере транспортной логистики и перевозок холдингу «РЖД» необходимо «разработать энергетическую стратегию, учитывающую внешние и внутренние факторы, влияющие на рынок перевозок в России. Одной из главных задач холдинга является обеспечение эффективной деятельности в этой области» [21].

«Для достижения этой цели в холдинге разрабатываются и регулярно актуализируются внутренние стратегические документы, среди которых выделяется энергетическая стратегия компании. Она определяет основные задачи и направления энергетической политики ОАО «РЖД» с учетом влияния внутренних и внешних факторов, складывающихся на железнодорожном транспорте и в топливно–энергетическом комплексе России в условиях реформирования» [14]. Структура законодательства об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности представлена на рисунке 1.

Важно понимать, что «энергетическая стратегия не только помогает холдингу «РЖД» решить текущие проблемы в сфере транспортной логистики и перевозок, но и позволяет заранее планировать действия на будущее. Также она способствует улучшению экологической ситуации в России, так как

холдинг стремится к использованию более эффективных и экологически чистых источников энергии» [16].

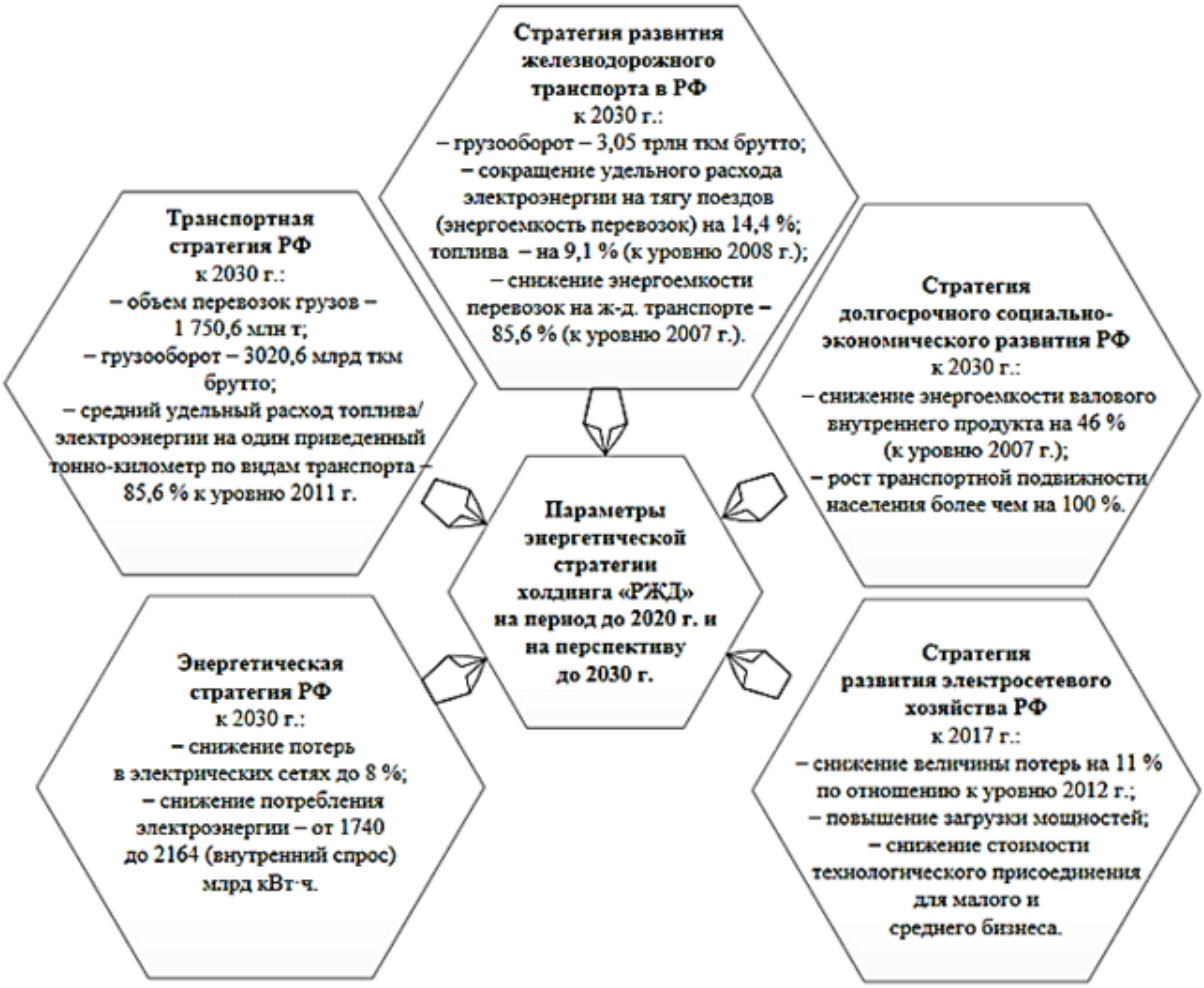



Рисунок 1 – Структура законодательства об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности

Энергетическая стратегия ПАО «Российские железные дороги» представляет собой постоянно развивающийся нормативный документ, документальная база которого подвергается систематическому пересмотру и актуализации. Корректировки вносятся с учетом трансформации ключевых внешних факторов влияния, включая экономические, политические и экологические аспекты. Организационная структура холдинга демонстрирует

высокую адаптивность к изменяющимся условиям, что позволяет сохранять стабильно высокие показатели операционной эффективности и поддерживать устойчивое конкурентное положение на рынке.

Как отмечается в академических источниках [14], в рамках стратегии сформулированы современные методологические подходы к энергоэффективности, что делает данный документ основополагающим инструментом стратегического развития корпорации. Особое внимание уделяется вопросам ценовой динамики на энергетические ресурсы и необходимости оптимизации их потребления. Следует отметить, что в 2021 году был инициирован процесс разработки перспективной концепции развития с горизонтом планирования до 2050 года, однако на текущий момент процедура окончательного утверждения документа не завершена.

В числе стратегических приоритетов особое место занимает программа технологической модернизации, в рамках которой инновационные технологические решения последовательно внедряются в производственные процессы. Результатом становится существенная оптимизация энергопотребления и параллельное снижение негативного экологического воздействия. Значительные организационные ресурсы направляются на профессиональное развитие персонала через реализацию комплексных образовательных инициатив по энергосбережению, где сотрудники осваивают передовые методики управления энергоресурсами.

Как свидетельствуют исследования [15], внедрение энергетической стратегии приводит к значительному сокращению операционных затрат при одновременном усилении конкурентных преимуществ компании. Особую актуальность в данном контексте приобретают вопросы стандартизации процессов рекуперации энергии, совершенствование методик организации работы локомотивных депо, где применение инновационных решений обеспечивает существенное снижение эксплуатационных издержек. Все эти меры в совокупности способствуют последовательной реализации принципов

устойчивого развития в деятельности одного из ключевых транспортных предприятий страны

Основные результаты деятельности РЖД в энергосберегающей области.

«В 2023 году в компании реализованы все обязательные энергосберегающие мероприятия как на тягу поездов, так и на стационарные нужды, что позволило выполнить целевые показатели в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, определенные Долгосрочной программой развития ОАО «РЖД» до 2025 года. Повышение энергоэффективности производственной деятельности ОАО «РЖД» к уровню 2022 года составило 0,6%» [23].

«Общий объем экономии топливно–энергетических ресурсов от выполнения мероприятий Программы энергосбережения в 2023 году составил 5 872,4 ТДж на сумму 6,463 млрд руб» [23].

«Реализация энергосберегающих мероприятий, направленных на повышение энергоэффективности перевозочного процесса, позволила получить экономию 5,3 млрд руб. (4,5 млрд в 2022 году), в том числе 548,3 млн. кВт/ч электрической энергии и 50,8 тыс. т дизельного топлива. Наибольшее значение экономии достигнуто в результате улучшения показателей использования локомотивного парка (62,8%), а также совершенствования технологии управления движением поездов (28,8%)» [23].

«Реализация мероприятий по повышению энергоэффективности систем тягового электроснабжения обеспечила экономию 16,9 млн кВт/ч электроэнергии на сумму 70,6 млн руб., на объектах стационарной энергетики экономия составила 1,2 млрд руб., в том числе:

- экономия ТЭР от мероприятий на объектах теплогенерации и систем теплоснабжения – 466,9 млн руб.;

- экономия ТЭР от мероприятий в рамках технологических процессов и объектов инфраструктуры – 208,6 млн руб.;
- экономический эффект от внедрения светодиодной техники, применения энергоэкономичных светильников, оптимизации режимов работы систем освещения – 189,3 млн руб» [23].

«В 2023 году в рамках инвестиционного проекта «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте» внедрено 410 единиц технических средств на сумму 0,8 млрд руб. Экономический эффект, полученный в 2023 году от использования ресурсосберегающих технических средств, внедренных в 2022 году, составил 203,2 млн руб. (112,7% от планируемых объемов).

Показатель потребления возобновляемой и низкоуглеродной энергии за 2023 год равен 18,6 млрд кВт/ч, что составляет 39,5% от совокупного объема поставляемой для нужд ОАО «РЖД» электрической энергии за год» [23].

## 1.3 Рекуперативное торможение, как главный технологический прием энергосберегающих технологий на железнодорожном транспорте

В числе исследователей, которые внесли «большой вклад в разработку методов тяговых расчетов, а также способов определения затрат энергии, необходимо назвать В. П. Закарюкина, А. В. Крюкова, А. Б. Косарева, А. Н. Марикина и Л. А. Германа и др.» [11].

Другой группой исследований, результаты которых играют важную роль, являются «исследования, предметом которых стала оптимизация режима движения электропоездов, направленная на минимизацию затрат энергии. Авторами этих работ стали А.В. Плакс, Г.В. Фаминский, Ю.П. Петров, Ю.М. Пульер, Л.А. Баранов, А.П. Новиков, Е.В. Ерофеев, А.Н. Астрахан» [11].

Большой вклад в решение обозначенных выше проблем внесли коллективы ВНИИЖТ, ДВГУПС, ИрГУПС, МИИТ, ПГУПС, РГУПС, СамГУПС, ОИВТ РАН и др.

В ходе проведенного исследования был осуществлен комплексный анализ научных публикаций вышеуказанных авторов, что позволило выявить систему доминирующих факторов, оказывающих непосредственное воздействие на эффективность процесса рекуперативного торможения [34]. В результате аналитической работы удалось установить, что к числу наиболее значимых детерминант относятся: особенности управления железнодорожным подвижным составом, технико-эксплуатационные параметры системы тягового электроснабжения, а также организационные особенности движения поездов [28].

Следует особо отметить, что все перечисленные факторы требуют комплексного системного рассмотрения, так как обладают свойством взаимного влияния и взаимозависимости. Для объективной оценки эффективности рекуперации энергии в современных условиях могут применяться различные методологические подходы, которые условно классифицируются на две основные группы. Расчетно-аналитические методы, составляющие первую группу исследовательских инструментов, основаны на математическом моделировании и теоретических выкладках. Экспериментальные методики, образующие вторую значимую категорию, предполагают проведение натурных испытаний и практических измерений, что позволяет получить эмпирически подтвержденные данные

Как указывают А.А. Бакланов, В.Л. Незевак и А.П. Шатохин: «Сущность расчетно-аналитического метода заключается в определении коэффициента рекуперации, который зависит в основном от профиля пути железнодорожного рельса. Чем больше на участке спусков и чем они длиннее и круче, тем выше значение коэффициента рекуперации, показывающего

эффективность рекуперативного торможения для рассматриваемого участка» [17].

Существует метод оценки эффективности режима рекуперации «с учетом критериев суммарной экономии и наилучшего использования пропускной способности участка в зоне вредного спуска» [6]. Неоспоримым достоинством названного метода является простота расчетов.

Третьим методом является «метод расчета эффективной зоны рекуперации с учетом удаления поездов в тяговом и рекуперативном режимах, величины и соотношения их токов, а также напряжения на шинах тяговых подстанций» [6].

В состав расчетно-аналитических методов входят дополнительные методические подходы, однако их практическая значимость существенно ограничена ввиду наличия многочисленных методических недостатков. Экспериментальные методы исследования образуют вторую важную категорию, среди которой особого внимания заслуживает метод глобального эксперимента. Согласно исследованиям [18], реализация данного метода требует создания комплексной автоматизированной системы учета, охватывающей все без исключения узлы тяговой электроснабжающей сети изучаемого участка.

Ключевой особенностью метода глобального эксперимента является возможность точного измерения энергетических потоков, причем измерения могут проводиться на произвольно выбранных участках сети в течение любых временных интервалов. Полученные экспериментальные данные позволяют с высокой точностью локализовать зоны энергетических потерь, что создает научную основу для разработки эффективных мер по оптимизации работы системы тягового электроснабжения. Данный подход отличается высокой информативностью и практической ценностью, поскольку обеспечивает получение объективных данных о реальном функционировании системы в различных эксплуатационных режимах.

«При использовании метода глобального эксперимента также важно убедиться, что все оборудование установлено и работает должным образом. Для этого может потребоваться проведение дополнительных тестов и проверок. В целом, метод глобального эксперимента является эффективным инструментом для оценки работы системы тягового электроснабжения и повышения ее эффективности. Однако, для его использования требуется значительное количество ресурсов и времени.

С помощью метода «локального» эксперимента можно провести исследование структуры использования энергии рекуперации на выбранном участке железной дороги.

При этом на участке организуется специальный график движения поездов и специальные схемы питания тяговой сети. Благодаря этому проведение эксперимента становится возможным с меньшими затратами, чем при использовании других методов» [18].

Как указывают В.Т. Черемисин, М.М. Никифоров и А.С. Вильгельм, «использование метода локального эксперимента с одной стороны, позволяет с меньшими затратами провести исследование структуры использования энергии рекуперации, а, с другой стороны, получить с высокой точностью оценку эффективности использования энергии рекуперации при различных графиках движения поездов и параметрах системы тягового электроснабжения» [25].

В рамках метода «сравнения удельного расхода электроэнергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций на участках работы локомотивных бригад с применением и запретом на применение рекуперативного торможения, можно выделить основной недостаток – отсутствие учета режимов работы системы тягового электроснабжения.

Этот метод позволяет рассматривать эффективность рекуперативного торможения не только на уровне локомотивов и поездов, но и на уровне локомотивных бригад и серии локомотивов» [25].

Тем не менее, методика имеет свои недочеты, которые заключаются в игнорировании некоторых важных аспектов, оказывающих влияние на эффективность системы восстановительного торможения. Подобные проблемы также наблюдаются в подходе к определению эффективности этого процесса на основе анализа путей следования поездов. Следовательно, для надежного определения эффективности восстановительного торможения требуется комплексный анализ, который бы принимал во внимание все рабочие условия системы электроснабжения, а также разные уровни сбора и обработки информации в условиях депо.

Альтернативный набор техник базируется на принципах моделирования поведения систем, что обеспечивает оценку производительности восстановления энергии на определенных участках железнодорожного пути, учитывая при этом множество релевантных переменных. Эти подходы отличаются повышенной точностью и подходят для оценивания результативности процесса рекуперации между железнодорожными станциями.

На основе анализа, «необходимо учитывать, что реальный перевозочный процесс может отличаться от моделируемого, что может приводить к неточным результатам оценки эффективности рекуперации. Поэтому, использование нескольких методов оценки и сравнение их результатов может дать более точную картину эффективности использования энергии рекуперации в железнодорожном транспорте» [25].

Классификация методов оценки эффективности рекуперативного торможения представлена на рисунке 2.

«Для более точной оценки эффективности рекуперативного торможения необходимо использовать комплексный подход, который учитывает все факторы, влияющие на процесс. Такой подход позволит достичь максимальной эффективности и экономии энергии в транспортных системах» [11].

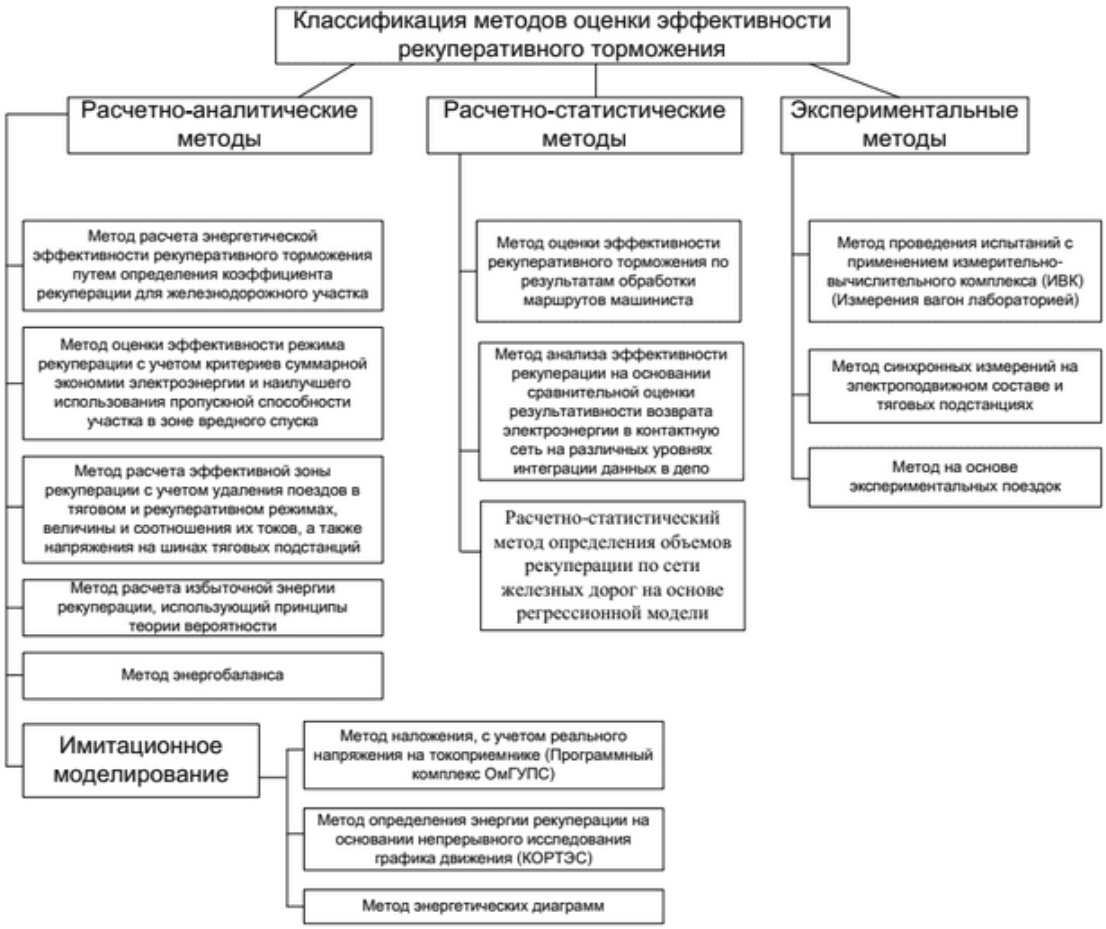



Рисунок 2 – Классификация методов оценки эффективности рекуперативного торможения

В рамках настоящего исследования предлагается применение инновационного метода синхронных измерений, предполагающего проведение измерительных процедур как непосредственно на электроподвижном составе, так и на тяговых подстанциях. Согласно данным научных публикаций [11], для повышения эффективности рекуперации энергии требуется системный анализ энергосберегающих методик управления подвижным составом. В частности, как отмечается в работе [13], квалифицированный машинист способен эффективно использовать инерционные характеристики поезда, что позволяет существенно сократить потребление энергетических ресурсов при регулировании скорости

движения. Однако отсутствие комплексного анализа подобных приемов приводит к неполной реализации потенциала рекуперативных систем.

Совершенствование транспортной эффективности и повышение точности измерений требует существенной доработки существующей методики синхронных замеров. В качестве ключевых направлений модернизации следует выделить: учет влияния метеорологических условий на эксплуатационные характеристики локомотивов, внедрение специализированных обучающих программ для машинистов, а также совершенствование систем диагностики неполадок в схемах рекуперативного торможения [13].

Таким образом, качественное улучшение измерительных и контрольных процедур в системе тягового электроснабжения представляет собой необходимое условие для достижения более высоких показателей энергетической эффективности железнодорожных перевозок. Реализация предложенных мер позволит оптимизировать энергопотребление и повысить экономическую эффективность работы железнодорожного транспорта в целом.

## 1.4 Анализ эффективности использования рекуперативного торможения в ОАО «РЖД»

Один из способов повышения энергоэффективности подвижного состава — это рекуперативное торможение. Сошлемся на мнение М.М. Никифорова: «повышение эффективности использования энергии рекуперации относится к одному из наиболее значимых мероприятий в части ресурсосбережения на железнодорожном транспорте» [10]. Кроме того, «исследования по оценке потенциала повышения энергоэффективности электротяги, проведенные на сети железных дорог, показали, что реализация комплекса мероприятий, направленных на повышение эффективности

использования рекуперативного торможения и энергии рекуперации, обеспечивает получение 50,4% от суммарного потенциала энергосбережения в системе тягового электроснабжения и на электроподвижном составе» [21]. Динамика объемов энергии рекуперации в ОАО «РЖД» представлена на рисунке 3.

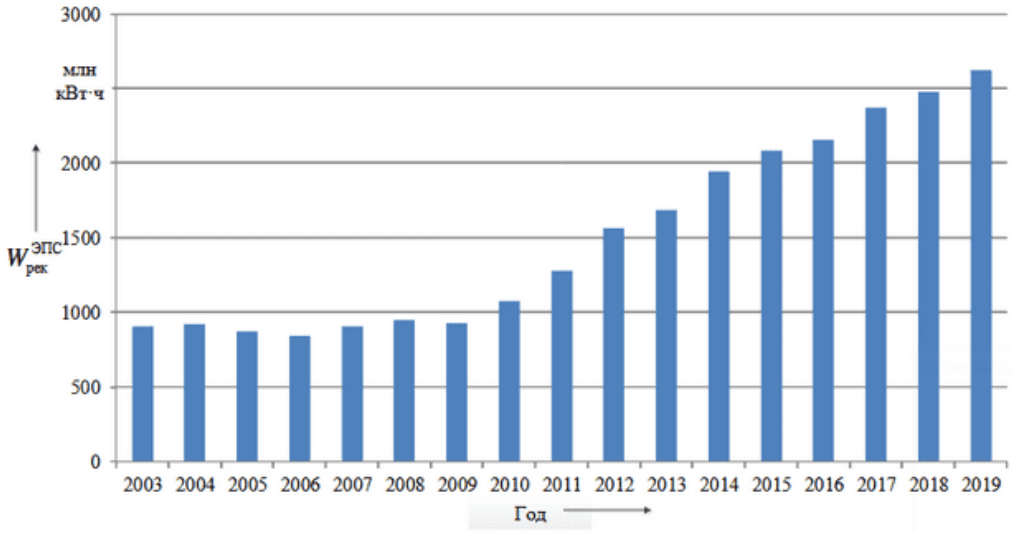



Рисунок 3 – Динамика объемов энергии рекуперации в ОАО «РЖД» в период с 2003 по 2019 годы

Как заметил М.М. Никифоров, в числе факторов, которые оказывают влияние на возможность применения рекуперативного торможения и эффективность использования энергии рекуперации, следует выделить «наличие на участке потребителей возвращенной энергии рекуперации электроподвижного состава, движущегося в режиме тяги, выпрямительно–инверторных преобразователей на тяговых подстанциях постоянного тока, накопителей электроэнергии на постах секционирования и др.; схемы питания межподстанционных зон, типы контактной подвески на участке, неравномерность тонно–километровой работы в четном и нечетом направлениях, уровень напряжения холостого хода на шинах тяговых подстанций» [10].

«Исходя из выше сказанного, для повышения эффективности использования энергии в грузовом движении можно предусмотреть следующие меры, обозначенные также в Энергетической стратегии ОАО «РЖД»:

- замена подвижного состава и технических средств с истекшим сроком эксплуатации на новую технику с высокой производительностью и энергоэкономичностью;
- освоение производства нового поколения энергоэкономичных электровозов, тепловозов и электропоездов с повышенными КПД и тяговыми свойствами;
- повышение среднего веса поезда и участковых скоростей в грузовом движении;
- повышение осевых нагрузок и снижение коэффициента тары грузовых вагонов;
- дальнейшая электрификация железных дорог и модернизация систем тягового электроснабжения на ключевых направлениях сети» [14].

Опираясь на практический источник, можно определить, что «для улучшения использования рекуперации локомотивными бригадами необходимо:

- своевременно осуществлять мониторинг;
- тщательно анализировать причины неприменения описанной технологии;
- организовывать контрольные и контрольно–инструкторские поездки;
- в обязательном порядке использовать выпрямительно–инверторные преобразователи на тяговых подстанциях» [14].

В то же время, результаты показывают, что «анализ отчетных данных свидетельствует о том, что новые электровозы дают больший удельный возврат энергии при рекуперативном торможении, чем ранее выпущенные модели» [4].

Для примера, на основе анализа определяется, что в «локомотивном депо Барнаул были получены статистические данные о временных рядах фактических удельных возвратов электроэнергии при рекуперативном торможении для пассажирских электровозов переменного тока ЭП1» [4]. Данные представлены на рисунке 4.

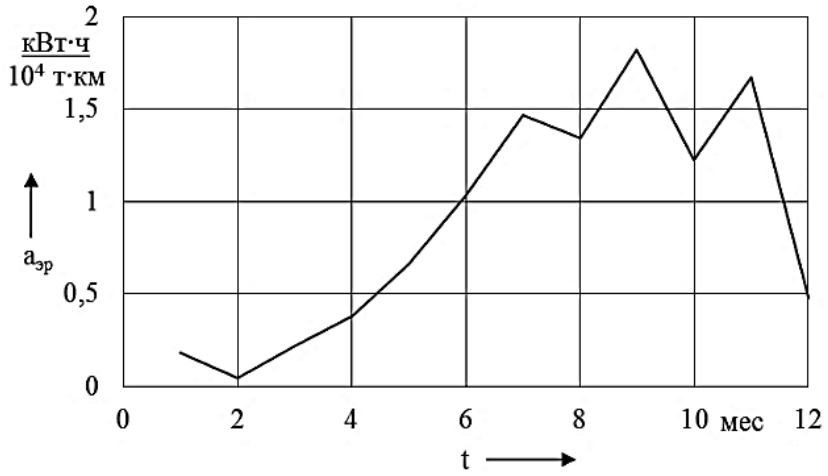



Рисунок 4 – Динамика изменения объемов энергии рекуперации пассажирских электровозов ЭП1 локомотивного депо Барнаул

В рамках исследовательской работы был осуществлен комплексный мониторинг эксплуатационных показателей локомотивных депо Уральской железнодорожной магистрали. Полученные данные свидетельствуют о значительной вариативности энергетических показателей, в частности параметров удельной рекуперации, демонстрирующих существенные колебания. Наблюдаемые различия обусловлены как спецификой отдельных поездоучастков, так и особенностями конкретных депо.

Графическая интерпретация структуры рекуперационных показателей представлена на рисунке 5. Аналитическая обработка результатов выявила наличие аномальных значений - на определенных маршрутах фиксировались пониженные показатели, при которых уровень возврата электроэнергии в сеть не достигал средних значений, характерных для соответствующих участков движения. Данное обстоятельство требует дополнительного изучения факторов, влияющих на эффективность рекуперативных процессов в различных эксплуатационных условиях.

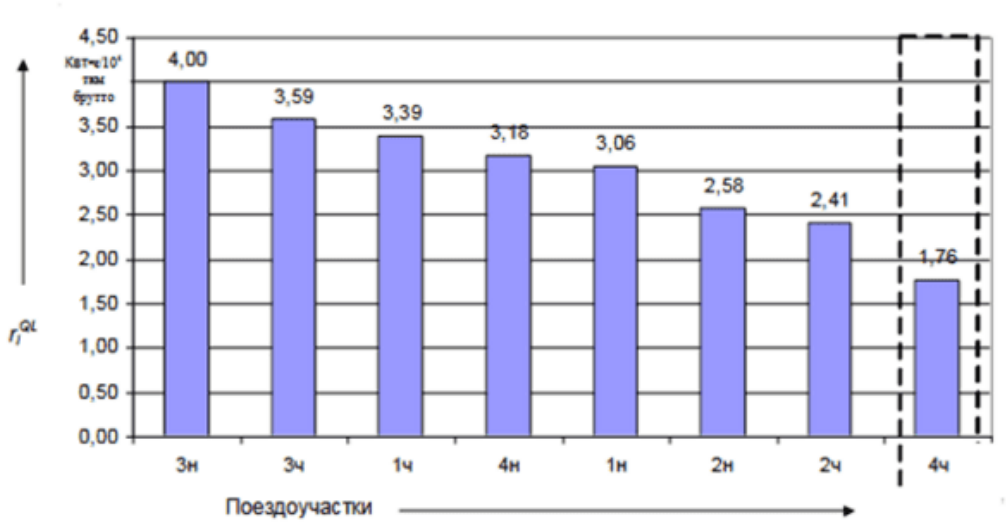



Рисунок 5 – Эффективность рекуперации по участкам работы локомотивных бригад

«На рассматриваемых участках железных дорог в нашей стране есть неиспользованный потенциал для возврата большего объема энергии рекуперации. Анализ отчетных данных по поездкам показал, что базовыми причинами снижения уровня рекуперации являются:

- неисправности системы на локомотиве,
- отсутствие необходимых условий в системе тягового электроснабжения,
- одиночное следование поезда по межподстанционной зоне (МПЗ),

– неприменение машинистом рекуперативного торможения и другие факторы.

Следует заметить, что своевременное выявление названных причин и их минимизация позволят в значительной степени максимизировать уровень удельной рекуперации.

В соответствии с энергетической стратегией ОАО «РЖД», на сети железных дорог внедряются различные энергосберегающие мероприятия и технологии, такие как:

- энергооптимальные графики движения поездов;
- вождение тяжеловесных поездов;
- выпрямительно–инверторные преобразователи;
- накопители электрической энергии» [26].

## 1.5 Анализ способов возврата электрической энергии при применении рекуперативного торможения

В рамках исследования механизмов рекуперативного торможения анализируются различные подходы к оценке возврата электрической энергии. Основное внимание уделяется пяти ключевым концепциям, каждая из которых характеризует определенный аспект энергетической эффективности [31].

Концепция абсолютного рекуперативного потенциала отражает теоретически возможный максимум возвращаемой в тяговую сеть энергии, рассчитываемый на основе электромеханических характеристик подвижного состава и параметров движения на заданном участке пути. Избыточная рекуперативная энергия представляет собой невостребованный другими потребителями излишек, который подлежит преобразованию или поглощению специальными устройствами компенсации.

Показатель фактически восстановленной энергии является расчетной величиной, учитывающей полное использование возвращаемой энергии как тяговыми электропоездами, так и компенсирующими устройствами [1]. Нереализованный рекуперативный потенциал характеризует разницу между теоретически возможным и практически достигнутым уровнями возврата энергии, определяемую путем сопоставления расчетных и фактических данных [32].

Показатель потенциала повышения эффективности количественно отражает расхождение между расчетными значениями и фактическими показаниями приборов учета на конкретных участках железнодорожного пути. Данная система концепций позволяет комплексно оценить эффективность рекуперативных процессов и выявить резервы для повышения энергетической эффективности железнодорожных перевозок

«Разработка метода оценки эффективности рекуперативного торможения и использования восстановленной энергии на конкретном участке железной дороги включает в себя несколько ключевых этапов:

– сбор данных путем наблюдения и синхронных измерений тяговых подстанций и электроподвижного состава;
– оценка эффективности рекуперативного торможения с учетом таких факторов, как режимы работы системы тягового электроснабжения, методы движения поездов и организация движения поездов в данном районе;
– установление ограничений на количество восстановленной энергии, разрешенное для каждого сегмента;
– составление окончательного отчета, основанного на повседневной деятельности локомотивных бригад, для содействия принятию обоснованных управленческих решений» [4].

«Однако проведение обширного спектра экспериментов на месте является невероятно трудоемким и дорогостоящим мероприятием. Более

того, эти эксперименты не позволяют нам точно определить и оценить конкретное влияние отдельных параметров или характеристик исследуемого объекта. На практике невозможно контролировать все параметры и характеристики, кроме исследуемого, не говоря уже о повторении эксперимента в идентичных условиях.

Следовательно, наиболее эффективным подходом к исследованиям, особенно когда проведение нескольких измерительных экспериментов нецелесообразно, в настоящее время является имитационное моделирование. Этот метод отличается высокой детализацией, возможностью тщательного изучения динамики развития процесса и высокой надежностью получаемых результатов.

Экспериментальный период относится к временным рамкам, отведенным для проведения экспериментальных исследований на месте с использованием синхронизированных приборов для измерения электрической энергии на фидерах тяговых подстанций и контактной сети электроподвижного состава. Чтобы установить минимальную продолжительность эксперимента, мы оценим время, затрачиваемое одним поездом на прохождение исследуемой зоны между подстанциями» [18].

Для организации эффективной системы контроля был разработан специализированный методологический подход, графическое представление алгоритмической последовательности которого приведено на рисунке 6. В качестве ключевого оценочного критерия эффективности процесса рекуперации энергии выступает удельный показатель восстановления, подробно рассмотренный в предыдущих разделах данного исследования [11]. Предлагаемый метод позволяет систематизировать процесс мониторинга и обеспечить объективную оценку эффективности работы рекуперативных систем на железнодорожном транспорте. «На начальном этапе алгоритма информация об электровозах в зоне мониторинга передается на сервер из информационно–измерительных комплексов ЭПС.

Рисунок 6 – Алгоритм определения эффективности рекуперативного торможения границах произвольной зоны мониторинга

Эта информация включает:

- $E_k$ – серия локомотива;
- $m_k$ – масса поезда;
- $N_k$ – участок следования;
- $t_i$ – глобальное время;
- $S_{ki}$ – координата пути в момент записи показаний;
- $U_{ki}$ – действующее значение напряжения на токоприемнике в момент записи показаний;
- $I_{ki}$ – действующее значение тока электровоза в момент записи показаний;
- $W_{расх.ki}$ – приращение расхода электроэнергии;
- $W_{возв.ki}$ – приращение возврата электроэнергии.

Впоследствии определяется реальная удельная отдача электровоза $w_{pki}$ в зоне между подстанциями и сравнивается с заданной скоростью отдачи.

Составляющие использования энергии рекуперации на участках постоянного тока, для оценки эффективности рекуперативного торможения с измерительных систем, можно проиллюстрировать в виде блок–схемы на рисунке 7» [8].

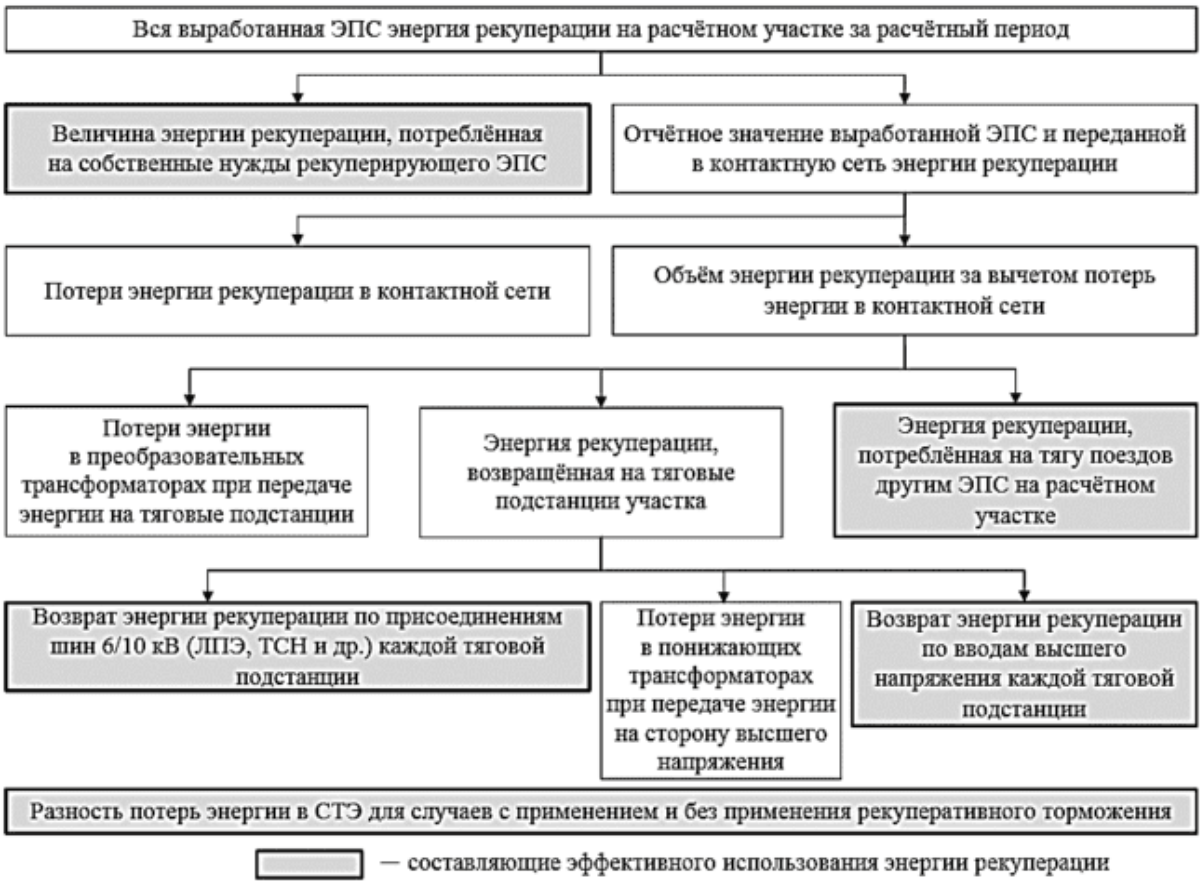



Рисунок 7 – Схема составляющих использования энергии рекуперации на участках

«Чтобы определить коэффициент возврата в межстанционных зонах для участка $N_k$, серии локомотивов $E_k$ и массы поезда $m_k$, вы можете получить его с помощью статистического анализа рейсов $w_{pki}$ (при условии наличия

базы данных для этих рейсов) или с помощью имитационного моделирования для $w_{pki}$.» [21].

Наиболее эффективным способом представления результатов моделирования энергопотребления и рекуперации является графическая визуализация данных. Разработанная методика предполагает построение специализированных энергетических профилей, которые наглядно демонстрируют минимальные показатели энергопотребления, необходимые для тяги, и предельные значения возможной рекуперации на различных участках железнодорожной инфраструктуры. Как отмечается в источнике [21], несмотря на наличие определенных методологических ограничений, в данном исследовании основное внимание уделяется двум ключевым аспектам: выполнению точных тяговых расчетов и практическому построению энергетических диаграмм для конкретных участков обслуживания локомотивных бригад.

Тяговые расчеты представляют собой важный аналитический инструмент, позволяющий количественно оценить как расход энергии, так и параметры энергетических перетоков в системе. Данный комплексный подход обеспечивает наглядное представление энергетических характеристик движения и создает основу для дальнейшей оптимизации процессов энергопотребления на железнодорожном транспорте [33]. Для точного определения объемов рекуперируемой энергии в киловатт-часах в работе применяется специально разработанная формула (1):

$$W_{Pi}^{\text{ЭПС}\prime} = \frac{\sum U'_{\text{Э}i} I'_{\text{Эср}i} \Delta t'_i}{1000}, \quad (1)$$

где «$t_i$ – время в рекуперации по *i–й* МПЗ, ч;

$I_{Эсрi}$ – средний ток электровоза в рекуперации по *i–й* МПЗ, А;

$U_{Эi}$ – «среднее напряжение на токоприемнике ЭПС, рассчитанное по результатам анализа РПДА и заданное в тяговом расчете по *i–й* МПЗ, В» [21].

«Для определения удельной рекуперации для каждой категории поездов рассчитывается объем работы, выполненной по *i–й* МПЗ, 104 т·км брутто по формуле (2)» [21]:

$$A'_{\text{пр}i} = \frac{I'_{\text{пр}i} \cdot m'_k}{10^4}, \quad (2)$$

где «$m_k$ – вес k–го поезда, т;

$l_{\text{пр}i}$ – длина рассматриваемой i–й МПЗ, км» [21].

«Удельная рекуперация по i–й МПЗ определяется по формуле, кВт·ч/10 тыс. т·км брутто, по формуле (3)» [21]:

$$w'_{Pi} = \frac{W_{Pi}^{\text{эпс}\prime}}{A'_{\text{пр}i}}, \quad (3)$$

«Используя результаты наших вычислений, мы можем сгенерировать энергетические диаграммы для указанного участка $N_k$, конкретной серии локомотивов $E_k$ и массы поезда $m_k$. Как в четном, так и в нечетном направлениях для каждого МПЗ $P_{i–i+1}$ происходит непрерывный поток и возврат электроэнергии, как показано на рисунке 8» [24].

Расчетную информацию по методу энергетических диаграмм можно представить в виде таблицы 1.

Данные, сгенерированные с использованием метода энергетических диаграмм, обрабатываются компьютером и архивируются в базе данных для каждого рейса каждого локомотива. Это включает различные массы поездов как в прямом, так и в обратном направлениях вдоль участка. Цель состоит в

том, чтобы обеспечить возможность последующего сравнения объемов рекуперативного торможения.

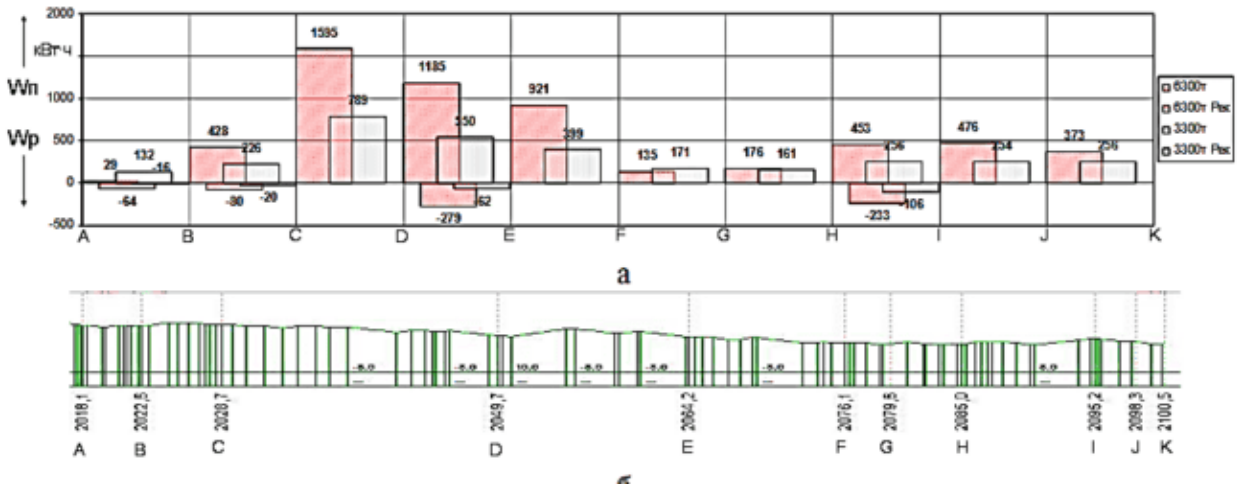



Рисунок 8 – Энергетические диаграммы участка $N_k$, электровоз серии $E_k$, массой состава $m_k$

Таблица 1 – Пример данных, получаемых при расчете методом энергетических диаграмм

| Серия локомотива | Масса состава, т | Участок следования | Перегон | Координата начала МПЗ, км | Время хода по МПЗ, чч:мм:сс | Расход электроэнергии на МПЗ, кВт·ч | Возврат электроэнергии на МПЗ, кВт·ч | Удельный возврат электроэнергии на МПЗ, кВт·ч/10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $E_к$ | $m_к$ | $N_k$ | $P_{12}$ | $S_{k0}$ | $t_0$ | $W_{расх.0}$ | $W_{возв.0}$ | $W_{pok}$ |
| | | | $P_{23}$ | $S_{k1}$ | $t_1$ | $W_{расх.1к}$ | $W_{возв.1к}$ | $W_{p1к}$ |
| | | | … | … | … | … | … | … |
| | | | $P_{i\text{-}i+1}$ | $S_{ki}$ | $t_i$ | $W_{расх.кi}$ | $W_{возв.кi}$ | $W_{ркi}$ |

В ходе исследования было выполнено комплексное имитационное моделирование энергетических процессов, позволившее установить критические значения рекуперации для каждого технологического участка МПЗ. Рассчитанные пороговые показатели восстановления энергии

демонстрируют выраженную зональную специфику, что требует дифференцированного подхода к анализу. Параллельно с процессами моделирования была инициирована система мониторинга и регистрации данных об аварийных отключениях оборудования. Совокупность выполненных мероприятий, включающая как теоретические расчеты, так и организацию эмпирического наблюдения, дает основания констатировать успешное завершение подготовительного этапа экспериментальных исследований. Данный результат создает необходимые предпосылки для перехода к основной фазе практической реализации проекта.

Выводы по разделу 1.

Энергосбережение на железнодорожном транспорте является ключевым направлением в условиях роста энергопотребления и экологических требований. Внедрение энергоэффективных технологий позволяет снизить энергоемкость перевозок и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду.

ПАО «РЖД» активно реализует политику энергосбережения, опираясь на федеральное законодательство (например, ФЗ № 261 «Об энергосбережении») и внутренние стратегии. Компания демонстрирует лидерство в отрасли, внедряя инновационные решения и сокращая энергопотребление.

Современная политика энергосбережения в железнодорожной отрасли базируется на трех стратегически важных направлениях. Первое направление предполагает системное увеличение коэффициента полезного действия транспортных операций через внедрение инновационных технологий. Второе приоритетное направление сосредоточено на последовательном сокращении непроизводительных энергозатрат в распределительной сетевой инфраструктуре. Третье значимое направление охватывает комплекс вопросов, связанных с рациональным потреблением энергоносителей стационарными энергоустановками и вспомогательными системами.

Реализация данных мероприятий в отчетном 2023 году подтвердила их высокую практическую эффективность. Совокупный энергосберегающий эффект выразился в экономии 5872,4 ТДж энергоресурсов, что в денежном выражении соответствует 6,463 миллиарда рублей. Значительная часть достигнутой экономии получена благодаря оптимизации методов эксплуатации тягового подвижного состава и внедрению энергоэффективных технологий управления. Существенный вклад в общий результат внесла масштабная программа технического перевооружения объектов энергоснабжения, включающая модернизацию трансформаторных подстанций и систем распределения электроэнергии.

Рекуперативное торможение – один из наиболее перспективных методов энергосбережения, позволяющий возвращать до 50,4% потенциально сберегаемой энергии. Его эффективность зависит от профиля пути, графика движения и технического состояния оборудования.

Анализ применения рекуперации выявил основные проблемы: неисправности локомотивов, отсутствие потребителей возвращаемой энергии, низкая квалификация машинистов. Устранение этих факторов позволит повысить эффективность технологии.

Наиболее точные результаты дает комплексный анализ, учитывающий режимы работы системы электроснабжения и условия движения поездов.

Перспективы развития связаны с внедрением новых технологий:

- энергоэкономичного подвижного состава;
- накопителей электроэнергии;
- оптимизированных графиков движения;
- обучения машинистов энергоэффективным приемам вождения.

Энергетическая стратегия РЖД до 2050 года направлена на устойчивое развитие отрасли, снижение зависимости от традиционных энергоресурсов и переход на возобновляемые источники энергии.

# 2 Анализ текущего состояния применения энергосберегающих технологий на АО «ВНИИЖТ»

## 2.1 Система сбора и анализа данных о потреблении электроэнергии при движении электропоездов

«Когда локомотивная бригада отправляется в путь, набор данных начинает накапливаться из измерительной системы электровоза. В соответствии с заранее определенным алгоритмом выполняется первоначальный анализ. В частности, он оценивает, соблюдена ли установленная норма для зоны МПЗ  или нет, основываясь на условии, описанном в уравнении (4):

$$\left|\omega_{pki} - \omega'_{pki}(\omega''_{pki})\right| \leq \omega_{\text{рДОП}}, \quad (4)$$

где $w_{pki}$ – удельная рекуперация на МПЗ по результатам поездки;

$w_{pki}$ – удельная рекуперация на МПЗ по результатам имитационного моделирования;

$w_{pki}$ – удельная рекуперация на МПЗ по результатам статистическо обработки поездок машинистов;

$w_{рДОП}$ – установленная норма удельной рекуперации для МПЗ» [21].

«Если условие выполняется для каждой зоны МПЗ, информация о поездке заносится в базу данных. В случае, если условия не выполняются, следующий шаг алгоритма включает проверку функциональности системы рекуперативного торможения» [6].

Чтобы оценить состояние системы электроснабжения тяги, мы «рассматриваем данные от измерительных систем, расположенных на переднем крае тяговых подстанций. Кроме того, информация собирается из автоматизированного рабочего пространства энергодиспетчера, обеспечивая

всестороннюю информацию о состоянии двухпозиционных переключаемых устройств и режимах работы оборудования в системе тягового электроснабжения» [6]. Эти системы автономно собирают данные с помощью телемеханики и передают их в систему мониторинга, придерживаясь принципов, изложенных в [15].

«Измерительные системы, установленные на фидерах тяговых подстанций в соответствии с запатентованным Российской Федерацией устройством, представленным на рисунке 9, обеспечивают возможность определения основных рабочих состояний тяговой подстанции. Они могут обнаруживать перебои, колебания и скачки напряжения на фидерах контактной сети во время рекуперативного торможения. В конкретных инфраструктурах полученные данные позволяют контролировать режимы и параметры СТЭ с целью повышения эффективности рекуперативного торможения» [2].

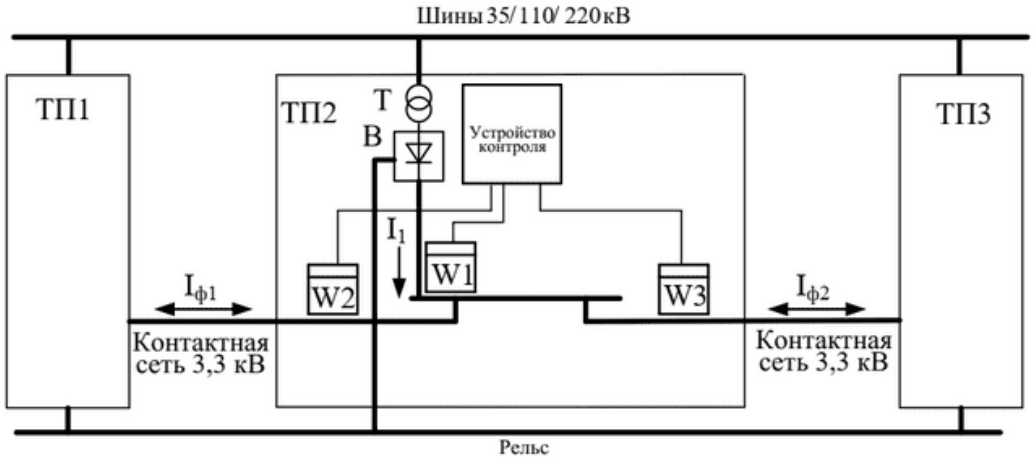



Рисунок 9 – Устройство контроля режимов работы тяговых подстанций постоянного тока

«Тщательно изучить расписание и условия, при которых поезда курсируют по железнодорожному участку, с целью выявления случаев одиночного движения в межстанционных зонах, задержек на входных

сигналах и других перебоев в движении, вызывающих эксплуатационные проблемы, а также оценить общую ситуацию с поездами в межстанционной зоне, рекомендуется использовать программный комплекс «Руководство ВНИИЖТ». Этот инструмент облегчает извлечение даты расписания для маршрута всех поездов, пересекающих исследуемый участок. Данные представлены как в графическом, так и в табличном формате, что позволяет получить представление о времени прохождения станций и продолжительности остановок. На рисунках 10, 11 показана информация о поезде, доступная в системе путеводителей ВНИИЖТ, и подробные сведения о станциях прохождения поездов.

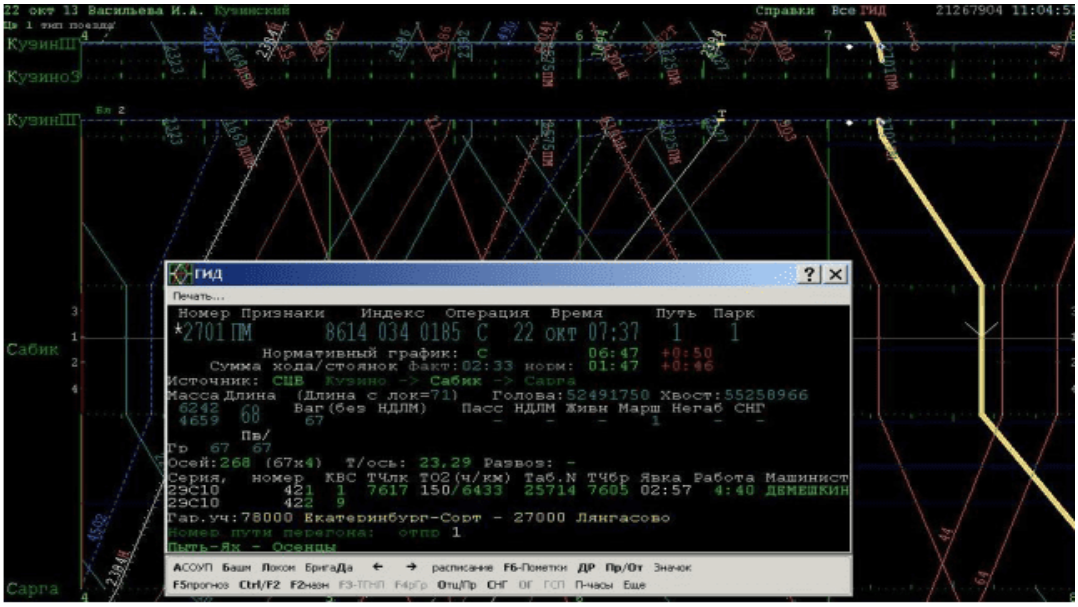



Рисунок 10 – Информация о поезде, содержащаяся в системе ГИД «ВНИИЖТ»

Кроме того, мы собираем исходные данные из отчетных и аналитических форм, предоставляемых ОАО «Российские железные дороги», для каждого расчетного цикла, уделяя особое внимание каждому конкретному разделу. К примеру, сведения, полученные с бланка отчётности ТХО–125, содержат детализированные данные о возврате использованной

энергии, протяженности пути, а также об общей оперативной скорости и скорости электрических поездов. Система автоматизированного управления заданиями действует как интегрированный ресурс, обеспечивающий доступ к сложной информации о численности основных путей и характеристиках маршрутного профиля. Также, в координации с ВНИИЖТ, которое контролирует и внимательно проверяет заполнение расписаний движения, автоматизированная система способствует получению данных о среднем весе и размерах поездов в движении» [9].

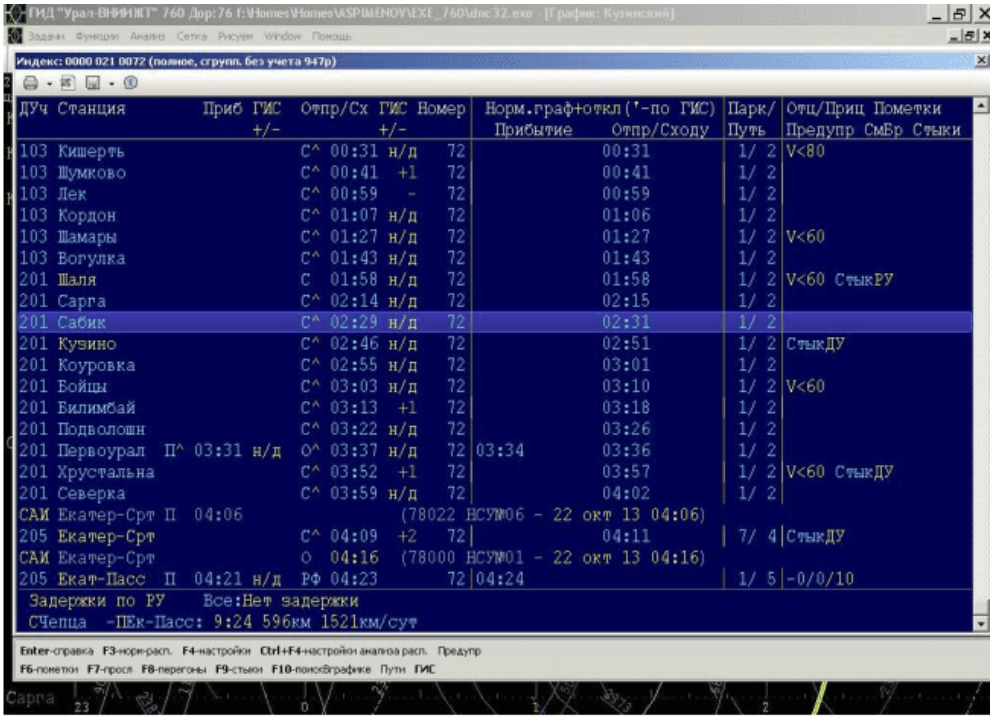



Рисунок 11 – Информация о проследовании поездом станций

«Управление электрификацией и подачей электроэнергии в системах автоматического управления электроэнергетикой (АСУ–Э) осуществляется через интегрированную автоматическую систему. Эта система предоставляет критически важную информацию, включающую в себя обзор количества тяговых подстанций и высоковольтных изоляторов, разновидности системы

контактной сети и степень износа этих элементов. Она также дает детализированный отчет о длине и настройках мощности различных зон подстанций в пределах данного объекта. Информация о потерях электрической энергии, обусловленных операциями подключения и замыкания на землю трансформаторов на тяговых подстанциях, также включена в отчетность системы» [9].

Для точной оценки количества рекуперированной электроэнергии, возвращаемой в тяговые подстанции, организуется комплексный сбор статистических данных, источником которых выступает автоматизированная система учета электроэнергии (АСУ-Э). Основной фокус исследования сосредоточен на детальном анализе параметров секции постоянного тока, для каждой исследуемой подстанции разрабатываются специализированные табличные формы. В указанных таблицах систематически фиксируются: показатели передачи электроэнергии через высоковольтные вводы со стороны переменного тока, данные об энергосбережении через вводы понижающих трансформаторов 6(10) кВ, а также параметры энергопотребления через высоковольтные вводы.

Параллельно осуществляется анализ характеристик секций переменного тока, полученные параметры заносятся в индивидуальные табличные формы для каждой тяговой подстанции. Особое внимание уделяется учету энергии, возвращаемой от фидеров контактной сети, тщательно анализируются данные о рекуперации через вводы понижающего трансформатора 27,5 кВ, фиксируются и систематизируются показатели энергопотребления для тяги поездов по показаниям счетчиков на вводах 27,5 кВ. Дополнительно проводится детальное исследование геометрических параметров пути, позволяющее выявить участки с повышенным энергопотреблением [7]. Ключевым методологическим аспектом является определение наиболее энергозатратного («сложного») направления анализируемого участка вне зависимости от его четности. Для этого

выполняется расчет эквивалентных уклонов участка в обоих направлениях (условно называемого «комплексным направлением») с применением формулы (5):

$$\boldsymbol{i}_{\text{экв}} = \frac{\sum_{j=1}^{j} \boldsymbol{i}_j \cdot \boldsymbol{S}_j}{\sum_{i=1}^{j} \boldsymbol{S}_j}, \quad (5)$$

где «$i_j$ – уклон j–го элемента профиля пути расчётного участка, ‰;

$S_j$ – длина j–го элемента профиля пути расчётного участка в нечётном направлении, м;

J – количество элементов профиля расчётного участка» [9].

Применяемая методика обеспечивает получение объективных количественных показателей и позволяет выявлять потенциальные резервы для повышения энергоэффективности системы тягового электроснабжения. Идентификация сложного направления осуществляется на основе сравнительного анализа значений эквивалентных уклонов различных участков. Как указано в источнике [9], при проведении расчетов в качестве ключевого параметра учитывается средняя масса грузовых составов, являющаяся определяющим фактором процесса энергорекуперации. В рамках анализа реализуется четкая классификация направлений движения по степени энергоемкости на сложные и легкие категории.

В целях повышения эффективности рекуперативного торможения, оптимизации временных затрат на принятие решений и усиления системы информационной безопасности в ОАО «РЖД» организовано формирование комплексных отчетных документов. Данные отчеты, основанные на статистике поездо-километров, характеризуются унифицированной структурой при варьирующемся уровне детализации - от общих маршрутных показателей до параметров отдельных зон многократного питания в формате trip-отчетов. Как отмечалось ранее, детальный анализ участков позволяет:

выявлять проблемные зоны энергопотребления, корректировать режимные карты для машинистов, разрабатывать мероприятия по модернизации системы тягового электроснабжения. Агрегированные статистические данные служат основой для составления итоговых отчетов, содержащих детализированные сведения о объемах возвращенной в сеть электроэнергии, степени соответствия установленным нормативам и других значимых эксплуатационных параметрах.

## 2.2 Автоматизированная система мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса

Современная научная парадигма определяет мониторинг как систематизированный процесс наблюдения за состоянием объектов, динамикой технологических процессов и изменением характеристик физических явлений. Данная методология предполагает последовательную реализацию трех ключевых компонентов: обработку первичных данных посредством аналитических процедур, экспертную оценку полученных результатов, а также построение прогностических моделей развития наблюдаемых процессов.

В рамках данного исследования реализуется специализированный мониторинговый подход, основанный на сборе, обработке и анализе информации, регистрируемой прецизионными измерительными комплексами. Выбор такой методологии обусловлен спецификой исследовательских задач, сформулированных в методологическом разделе работы. Техническое оснащение мониторинговой системы включает разнообразные сенсорные устройства: тахометрические датчики для контроля скоростных параметров, преобразователи давления, фиксирующие изменения в гидравлических системах, а также температурные сенсоры, отслеживающие тепловой режим работы тормозных агрегатов.

Критически важным аспектом обеспечения эффективности мониторинга является обоснованный выбор контролируемых характеристик и параметров. Автоматизированная платформа обработки данных выполняет сложные вычисления и формирует практические рекомендации по оптимизации рекуперативных процессов. Таким образом, система мониторинга энергетической эффективности рекуперации представляет собой важный инструмент повышения производительности тормозных систем и рационализации энергопотребления в железнодорожном транспорте, позволяющий существенно улучшить технико-экономические показатели эксплуатации подвижного состава

«Для увеличения эффективности перевозочного процесса различные методы и технологии используются в современном мире. Одним из предложенных способов является использование автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса (АСМЭПП). Эта система состоит из трех подсистем, которые включают в себя:

- автоматизированную систему мониторинга и учета электроэнергии на фидерах контактной сети тяговых подстанций (АСМУЭ ФКС);
- информационно–измерительные комплексы учета электрической энергии на электроподвижном составе (ИИК ЭПС);
- единую систему сбора и обработки данных» [21].

Здесь необходимо привести мнение Ю.В. Плотникова: «…сама АСМУЭ не повышает энергоэффективность напрямую, а участвует в этом косвенно, предоставляя уникальную информацию, на основе которой можно выполнять необходимые мероприятия по совершенствованию системы тягового электроснабжения» [11].

Структурные элементы системы АСМЭПП представлены на рисунке 12.

Рисунок 12 – Структурные элементы системы АСМЭПП

Автоматизированная система мониторинга энергопотребления подвижного состава (АСМЭПП) обладает существенным технологическим преимуществом, заключающимся в обеспечении комплексной оценки эффективности процессов рекуперативного торможения. Параметры энергопотребления фиксируются специализированными системами учета электроэнергии фидеров контактной сети (АСМУЭ ФКС), а дополнительные данные регистрируются интеллектуальными измерительными комплексами электроподвижного состава (ИИК ЭПС). Вся собираемая информация передается в централизованную систему обработки данных, где осуществляется ее интегрированная обработка и анализ.

Графическое представление на рисунке 13 иллюстрирует архитектурные особенности системы, демонстрируя иерархическую организацию информационных потоков подсистемы АСМЭПП. Разработанная структура специально адаптирована для проведения точного анализа эффективности рекуперативных процессов и позволяет получать

достоверные данные о энергетической эффективности тормозных систем подвижного состава. Такая система обеспечивает возможность постоянного мониторинга и своевременной оптимизации параметров рекуперативного торможения.

Рисунок 13 – Информационное взаимодействие подсистем АСМЭПП в рамках оценки эффективности рекуперативного торможения

Автоматизированный мониторинг энергоэффективности критически важен для современного транспортного комплекса, представляя собой технологическую платформу, обеспечивающую сбор точных данных о

параметрах энергопотребления и предоставляющую инструменты для оценки эффективности рекуперативных технологий. Реализация такой системы приводит к существенной экономии эксплуатационных расходов и способствует снижению экологической нагрузки от железнодорожных перевозок.

Для обеспечения максимальной эффективности система должна соответствовать ряду требований: обладать интуитивно понятным пользовательским интерфейсом, предусматривать гибкие механизмы настройки, демонстрировать высокую техническую надежность и обеспечивать надежную защиту конфиденциальных данных. Эти характеристики в совокупности определяют практическую ценность системы для операторов и управленческого персонала.

В контексте совершенствования управления транспортными процессами необходимо учитывать три фундаментальных аспекта: во-первых, обязательность интеграции специализированных автоматизированных систем управления (таких как ГИД "Урал–ВНИИЖТ", АРМ ТУ, СВЛ ТЧ, САУ и другие); во–вторых, критическую важность качественной подготовки исходных данных для последующего анализа в АСМЭПП; в–третьих, необходимость организации эффективных процедур сбора и надежного хранения результатов при оценке энергетической эффективности рекуперативных процессов. Комплексный подход к реализации этих аспектов обеспечивает значительное повышение эффективности использования энергетических ресурсов в железнодорожном транспорте.

«С точки зрения оценки эффективности применения и использования энергии рекуперации, основными достоинствами АСМЭПП являются:

- возможность учета параметров и режимов работы системы тягового электроснабжения;

– возможность получения данных от сторонних систем, для более детального анализа эффективности рекуперативного торможения;
– синхронизация по времени измерений на электроподвижном составе и в системе тягового электроснабжения;
– возможность уменьшения участков мониторинга, вплоть до межподстанционной зоны, благодаря применению глобального позиционирования» [13].

Теоретическое обоснование базируется на выявленных эксплуатационных преимуществах автоматизированной системы мониторинга энергопотребления подвижного состава (АСМЭПП), которая представляет собой технологически совершенный инструмент управления энергетическими процессами в железнодорожной промышленности. Для комплексного мониторинга рекуперируемой энергии и сбора соответствующих метрологических данных требуется внедрение специализированных автоматизированных информационно-измерительных комплексов (АИИК) на тяговом подвижном составе.

Ключевой особенностью современных АИИК является способность интеграции данных от сторонних систем, что существенно повышает детализацию и точность анализа эффективности рекуперативного торможения. Применение технологий глобального позиционирования (GPS) дополнительно позволяет оптимизировать зоны мониторинга, включая межподстанционные участки контактной сети.

Организация процессов сбора, обработки и анализа данных должна строго соответствовать техническим требованиям ОАО «РЖД», изложенным в распоряжении №3226р от 31 декабря 2014 года. Обязательной функциональной характеристикой АИИК является возможность регистрации параметров, характеризующих эффективность использования рекуперируемой энергии, что создает основу для последующей оптимизации технологических процессов и снижения эксплуатационных затрат.

При проведении измерений электроэнергетических параметров особое внимание уделяется метрологическому обеспечению, гарантирующему высокую точность и достоверность получаемых результатов. Совокупность указанных мер позволяет создать эффективную систему мониторинга и управления энергетической эффективностью железнодорожных перевозок

Приведем цитату из работы М.М. Никифорова, С.Ю. Ушакова и А.Л. Каштанова: «С целью обеспечения необходимой точности измерений электроэнергии, соответствующей коммерческому учету, устанавливаются следующие требования:

- класс точности блока учета электроэнергии при измерениях – не хуже: по активной энергии: 0,5S по ГОСТ 30206–94 для переменного тока и ГОСТ 10287–83 для постоянного тока; по реактивной энергии: 1,0 по ГОСТ 26035–83;
- классы точности первичных измерительных преобразований (ПИП) токаи напряжения – не ниже 0,5;
- потери напряжения во вторичной измерительной цепи не должны превышать 0,25% номинального вторичного напряжения ПИП» [10].

Корректность осуществления учёта электроэнергии представляет собой один из наиболее значимых факторов, определяющих эффективность энергетического менеджмента. Данный фактор обеспечивает возможность рационального регулирования объёмов потребляемой энергии, что способствует оптимизации эксплуатационных процессов. Помимо этого, он играет важную роль в снижении финансовых расходов, связанных с потреблением электрической энергии. Грамотный подбор специализированного измерительного оборудования является необходимым условием для обеспечения достоверности получаемых данных. Не менее существенное значение имеет проведение систематического контроля исправности и соответствия метрологических характеристик установленным

нормативам. Указанные мероприятия способствуют достижению значительного повышения уровня энергетической эффективности на объектах различного назначения. Кроме того, их реализация позволяет обеспечить устойчивое сокращение экономических издержек в долгосрочной перспективе.

## 2.3 Нормативные данные, применяемые АО «ВНИИЖТ» для оценки энергоэффективности перевозочного процесса

АО «ВНИИЖТ» стремится повысить энергоэффективность электрической тяги «за счет использования рекуперативной энергии и поддержания высокого коэффициента полезного действия. В железнодорожных сетях с электрификацией переменным током полупроводниковые устройства, такие как диоды и тиристоры, играют решающую роль в выпрямлении контактного напряжения для питания тяговых двигателей и преобразовании рекуперативной энергии обратно в переменный ток» [8, 29, 23]. Однако «использование управляемых полупроводниковых приборов в электровозах переменного тока для достижения высоких тяговых характеристик негативно сказывается на эффективности сетей электроснабжения из–за нелинейности их вольтамперных характеристик. Это приводит к искажению форм сигналов тока и напряжения и отклонению от синусоиды. Искажение синусоидальной формы сигнала является важным параметром, определенным ГОСТ 32144–2013, поскольку оно влияет на эксплуатационные характеристики электровозов и тяговой системы. Искажение формы тока и напряжения обычно характеризуется спектрами высших гармонических составляющих» [5].

Гармонические искажения в токе и напряжении оказывают вредное влияние на кабельные и проводные линии связи, которые находятся возле

железнодорожных путей. «Они подрывают эффективность автоматических систем управления на электроподстанциях, так как из–за гармоник более высокого порядка возникают лишние потери в обмотках тяговых электродвигателей» [9, 23]. Помимо этого, «данные гармоники могут мешать работе телемеханических аппаратов, систем централизованной блокировки и релейной защиты, применяемых в системах тягового электроснабжения, снижая их производительность или даже нарушая работу» [9, 23]. В трансформаторах «использование таких гармоник приводит к росту потерь в металлическом сердечнике из–за явления гистерезиса, к увеличению потерь в медных обмотках, а также к сокращению продолжительности службы изоляции» [9, 23].

На территории Российской Федерации с 1 июля 2014 года был официально принят и введен в действие национальный стандарт ГОСТ 32144–2013, регулирующий качество электроэнергии. Указанный стандарт частично интегрирует положения европейского норматива EN 50160:2010, что свидетельствует о стремлении к гармонизации технических требований. Однако отдельные параметры, определяющие качество электроэнергии, демонстрируют значительные расхождения с европейскими аналогами. Данные отличия объясняются сохранением ряда устаревших нормативных критериев, заимствованных из предыдущего стандарта ГОСТ 13109–97.

Согласно данным, представленным в источнике [18], искажение синусоидальной формы напряжения в тяговых электрических сетях может быть количественно оценено с помощью двух ключевых показателей. Первым из них является коэффициент n–й гармонической составляющей напряжения $К_{U(n)}$, отражающий уровень отдельных гармоник. Вторым показателем выступает суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $К_U$, характеризующий совокупное влияние искажений. Установленные ГОСТ 32144–2013 предельно допустимые значения для данных коэффициентов строго регламентированы.

Соответствующие нормативные величины систематизированы и представлены в таблицах 2 и 3 цитируемого источника [18].

Таблица 2 – Нормативные значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения $К_{U(n)}$

| Порядок гармонической составляющей n | Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $К_{U(n)}$, %, в зависимости от напряжения электрической сети, кВ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0,38 | 6–25 | 35 | 110–220 |
| 3 | 5 | 3 | 3 | 1,5 |
| 5 | 6 | 4 | 3 | 1,5 |
| 7 | 5 | 3 | 2,5 | 1 |
| 9 | 1,5 | 1 | 1 | 0,4 |

Таблица 3 – Нормативные значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения KU для сетей различного класса напряжения

| Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $К_{U(n)}$, %, в зависимости от напряжения электрической сети, кВ | | | |
|---|---|---|---|
| 0,38 | 6–25 | 35 | 110–220 |
| 12,0 | 8,0 | 6,0 | 3,0 |

Согласно указанным нормам:

– «значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $К_{U(n)}$ не должны превышать значений, указанных в таблице 2.

– среднее значение суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения $К_U$ в течение 10–минутного интервала времени не должно превышать значений, указанных в таблицах 2 и 3. Значения соответствуют 95% и 100% времени интервала в течение одной недели» [18].

Важно отметить, что «ГОСТ 32144–2013 не нормирует качество тока, поэтому в отечественной технической литературе под качеством электроэнергии в основном понимается качество напряжения» [20]. Именно

поэтому «все стандарты РФ по Коэффициенту электрической энергии (КЭ) устанавливают показатели и нормы, касающиеся только напряжения, а не тока» [20].

В действующем российском стандарте ГОСТ 32144–2013 полностью отсутствуют какие-либо нормативные требования, касающиеся гармонических составляющих тока нагрузки. В отличие от него, международные стандарты IEEE 519–1992 и IEC 61000–3–2:2009 содержат четкие регламентации по данному вопросу. Указанные международные нормативы строго определяют предельно допустимые уровни гармонических составляющих тока. Помимо этого, в них устанавливаются требования к коэффициенту искажения напряжения для различных электроустановок и систем электроснабжения.

Российский ГОСТ 32144–2013 не предусматривает нормирования гармонических составляющих тока, что создает значительный пробел в регулировании. В нормативной базе Российской Федерации предельные значения высших гармоник тока зафиксированы исключительно в Правилах 1987 года. Данные правила регламентируют допустимое процентное содержание гармоник тока, возникающих на токоприемнике электровоза. Однако их действие ограничивается только режимом рекуперативного торможения.

Существенным недостатком является отсутствие учета типа вентильного преобразователя, применяемого на электроподвижном составе. Также не принимается во внимание мощность конкретного электроподвижного состава. Совершенно игнорируется влияние различных режимов работы электровоза. Не анализируется наличие и эффективность компенсирующих устройств в системе. Кроме того, не учитываются параметры схемы расположения ЭПС в системе тягового электроснабжения. Все перечисленные факторы оказывают существенное влияние на степень искажения формы кривых тока.

Вследствие особенностей работы «тиристорных выпрямителей на электрической передающей системе (ЭПС), на токоприемнике электровоза возникает суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, который может быть в диапазоне от 5% до 15%, в зависимости от загруженности фидерной зоны электроснабжения и расположения электровозов относительно трансформаторной подстанции (ТП)» [9, 23]. «В тяговой сети, это обычно происходит, когда электровоз находится в середине магистральной питательной зоны (МПЗ) при двустороннем питании или в конце консоли при одностороннем питании зон кабельных соединений (КС). Кроме того, следует отметить, что электровозы магистральных железных дорог развивают значительную мощность (6–12 МВт), что способствует увеличению суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения за счет значительных значений высших гармоник в кривых тока и напряжения» [9].

Гармонический состав тока в действующей системе тягового электроснабжения характеризуется непрерывной динамикой изменений. Указанные колебания спектрального состава обусловлены существенной вариативностью нагрузочных характеристик системы.

Согласно результатам научных изысканий, представленных в источниках [9, 23], процесс эксплуатации электровозного подвижного состава имеет выраженную специфику. Особенно ярко данная специфика проявляется при реализации режима рекуперативного торможения. Указанный режим принципиально отличается по своим параметрам от стандартного режима тяговой работы. Важнейшим следствием данного отличия является существенная трансформация гармонических составляющих как токовых, так и вольтажных характеристик.

В связи с выявленными закономерностями возникает объективная необходимость проведения тщательного анализа. Предметом анализа должны стать экспериментальные данные, собранные в ходе

эксплуатационных испытаний электроподвижного состава. Указанные испытания проводились на железнодорожном участке между станциями Анисимовка и Фридман. Основной целью проводимого исследования является всесторонняя оценка качественных показателей электроэнергии

Выводы по разделу 2.

Одним из способов оптимизации энергопотребления является правильная запись и синхронизация показаний расхода и возврата электроэнергии, а также географического местоположения. Кроме того, необходимо синхронизировать запись всех этих показаний с глобальным временем. Описанные требования были утверждены ОАО «РЖД» и позволяют оценить эффективность данного подхода в полном объеме.

Применение рекуперативного торможения на железнодорожном транспорте может быть эффективным способом экономии энергии. Однако, для оценки эффективности такого подхода необходимо учитывать множество факторов. В данном контексте были определены методы оценки эффективности применения и использования рекуперативного торможения, и представлена их классификация.

«Тем не менее, в ходе исследования были выявлены основные недостатки данных методов. Сошлемся на мнение К. Кузнецова, который к числу недостатков выше описанных методов отнес следующее:

- нет возможности учесть состояние системы тягового электроснабжения;
- исправность или неисправность схемы рекуперативного торможения с указанием неисправности;
- отсутствие возможности учета поездной ситуации;
- умение машиниста применять правильные приемы движения;
- оценка эффективности рекуперации вплоть до межподстанционной зоны, в целях выявления узких мест» [3].

Таким образом, анализ эффективности применения рекуперативного торможения на железнодорожном транспорте является сложным многопараметрическим процессом, который требует учета множества факторов и возможных ограничений.

В свете растущей экологической осознанности и экономической эффективности, становится все более важным разработка систем, которые позволяют оптимизировать использование ресурсов. В этом контексте были разработаны основные требования к системе сбора, обработки и анализа данных об эффективности применения рекуперативного торможения. Такие системы позволяют сократить расходы на энергию и снизить вредные выбросы в атмосферу, что в свою очередь положительно сказывается на окружающей среде.

Техническая возможность достоверного определения объемов рекуперативного торможения на участке следования локомотивной бригады является одним из ключевых требований к таким системам. Это позволяет не только оценить эффективность использования данной технологии, но и выявить возможные проблемы и улучшить производственный процесс.

Однако, разработка подобных систем является сложной задачей, требующей высокой квалификации и опыта. Необходимо учитывать множество факторов, таких как характеристики транспортных средств, особенности маршрута и климатические условия. Только при наличии достаточного объема данных и их правильной обработке можно получить полную и точную картину использования рекуперативного торможения.

В итоге, системы сбора, обработки и анализа данных об эффективности применения рекуперативного торможения являются необходимым элементом современного производства. Они способствуют экономии ресурсов, уменьшению вредных выбросов и повышению эффективности работы транспортных средств.

# 3 Разработка мероприятий, направленных на снижение электропотребления при перевозке грузов по железной дороге

## 3.1 Нормирование и планирование возврата электроэнергии в контактную сеть при применении рекуперативного торможения по результатам поездов

«Нормирование рекуперации энергии предполагает научное определение сроков возврата электроэнергии на рабочих местах локомотивных бригад» [8].

Процесс разработки оптимальных стратегий рекуперации электроэнергии в железнодорожной отрасли требует комплексного подхода к временным параметрам. В рамках данного подхода необходимо учитывать как оперативные, так и краткосрочные временные периоды функционирования системы.

Особе внимание следует уделять анализу долгосрочных временных отрезков, включая суточные, месячные и квартальные циклы работы. Дополнительно требуется рассмотрение годовых и перспективных периодов эксплуатации железнодорожного транспорта. С точки зрения аналитических методов исследования, суточный объем рекуперируемой энергии может быть формализован. Указанный формализованный показатель представляет собой интегральную характеристику работы всего парка электровозов на конкретном участке.

Величина данного показателя находится в сложной зависимости от множества технологических и эксплуатационных факторов [27]. Математическое выражение указанной зависимости представлено в формуле (6) рассматриваемого исследования:

$$W_{\text{возв}} = \sum_{k=1}^{K} W_k \left(E_k, m_k, q_{0k}, V_k, t, P, Z\right), \quad (6)$$

где $W_k$ – объем энергии рекуперации $k$ – *м* электровозом, кВт·ч;

$E_k$ – серия локомотива;

$m_k$ – масса состава, т;

$q_{0k}$ – нагрузка на ось вагона, т/ось;

$V_k$ – скорость движения по участку, км/ч;

$t$ – температура на участке следования, $^0$С;

$P$ – тип профиля участка;

$Z$ – тип системы электроснабжения (постоянный/переменный)» [4].

В практике эксплуатации железнодорожного транспорта широкое применение находят однофакторные регрессионные модели. Указанные математические модели активно используются для целей нормирования объёмов возвращаемой в сеть электроэнергии. Для каждого конкретного участка железнодорожного пути рассчитывается индивидуальная норма удельной рекуперации энергии. Основным параметром, влияющим на величину данной нормы, является полная масса состава.

Математическая взаимосвязь между массой поезда и нормой рекуперации формализована в виде уравнения (7), которое позволяет с достаточной точностью прогнозировать объёмы возвращаемой энергии для различных эксплуатационных условий:

$$w_{\text{рек.н}} = a_0 + \frac{a_1}{m}, \quad (7)$$

где $a_0$, $a_1$, – коэффициенты регрессионной зависимости удельной рекуперации от массы поезда;

$m$ – масса поезда [4].

Методика ее построения предполагает классификацию подвижного состава по дискретным массовым интервалам. Для каждого выделенного массового интервала рассчитывается усредненный показатель удельной

энергии рекуперации. На основе полученных усредненных значений осуществляется построение аппроксимирующей гиперболической кривой. Данная кривая выполняет функцию нормативного ориентира для конкретного участка железнодорожного пути. Результаты сравнительного анализа демонстрируют, что применение линейной регрессионной модели ко всему массиву статистических данных также обеспечивает удовлетворительную точность. Для минимизации погрешностей расчетов в данном исследовании применяется современный метод оптимизации абсолютных отклонений, известный как метод наименьших модулей (8):

$$d[Y, f(x)] = \|Y - f(x)\| = \sum_{i=1}^{n} |y_i - f(xi)|, \quad (8)$$

Классический метод наименьших квадратов демонстрирует недостаточную эффективность при решении рассматриваемой задачи. Основная причина неудовлетворительных результатов заключается в значимом отклонении распределения остаточных величин от гауссовского закона. Разработанный в рамках данного исследования новый методический подход обладает существенными преимуществами. Важнейшим достоинством предложенного метода является возможность достижения функции максимального правдоподобия. Методологическая обоснованность подхода базируется на учете особенностей распределения погрешностей по закону Лапласа. Математическое выражение указанной закономерности представлено в уравнении (9) настоящей работы, что подтверждает теоретическую валидность предложенного метода и его практическую применимость для решения рассматриваемого класса задач:

$$f(x) = \frac{\alpha}{2} e^{-a|x-\beta|}, -\infty < x < +\infty, \quad (9)$$

Разрабатываемый алгоритмический подход специально предназначен для минимизации статистического влияния аномальных значений. Указанные аномалии в данных о возврате энергии преимущественно обусловлены систематическими ошибками при регистрации показаний. Дополнительным источником искажений служат возможные технические неполадки в работе измерительных устройств. Теоретические расчеты позволяют прогнозировать значительное улучшение точности получаемых аппроксимационных зависимостей. В качестве основного математического инструментария был задействован современный метод наименьших абсолютных отклонений.

В результате проведенных расчетов удалось вывести систему регрессионных уравнений для ключевых разделов исследования. Для каждого из полученных уравнений был выполнен детальный анализ статистической эффективности. Полученные в ходе исследования эмпирические данные систематизированы и наглядно представлены в сводной таблице 4, что позволяет наглядно оценить преимущества предложенного подхода по сравнению с традиционными методами анализа.

Таблица 4 – Регрессионные модели для различных участков железных дорог

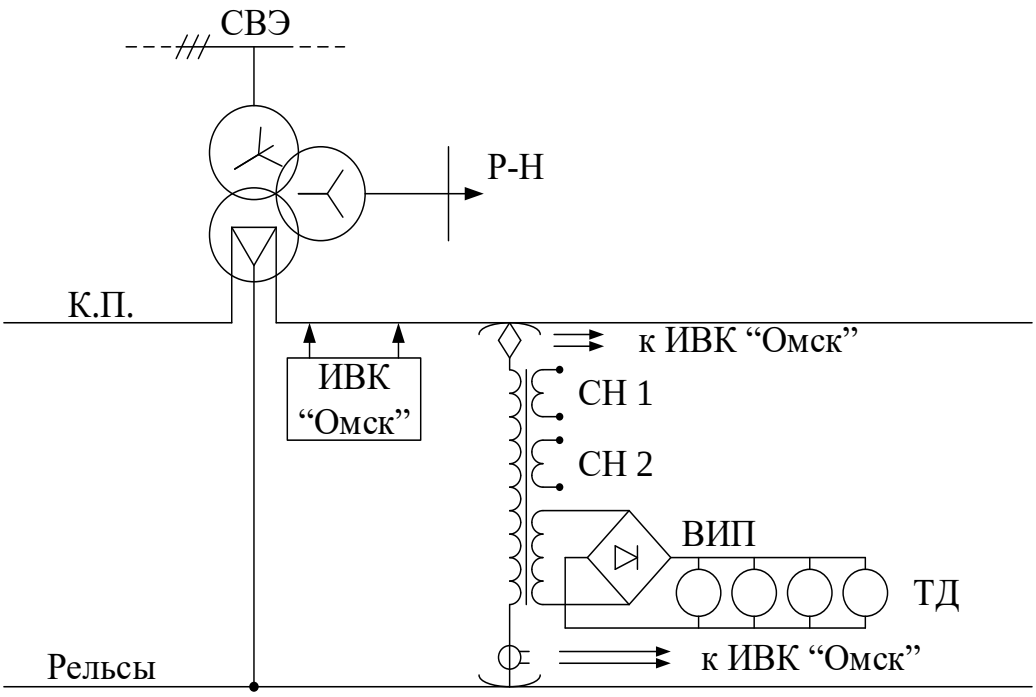
| Участок следования | $R^2$ | Уравнения регрессии |
|---|---|---|
| Черепаново – Разъезд Иня | 0,97 | $y=15,87–0,0012m+0,28q_0$ |
| Инская – Белово | 0,98 | $y=–2,21+0,0005T+0,24q_0$ |
| Малинино – Беркуты | 0,98 | $y=0,67–0,0004T+0,1q_0$ |
| Абрамово – Каменка | 0,96 | $y=0,77–0,0005T+0,19q_0$ |
| Помельцево – Крещенский | 0,98 | $y=3,09–0,0003га+0,125q_0$ |
| Ишим – Московка | 0,98 | $y=2,48–0,0003m+0,06q_0$ |
| ст. Инская – ст. Тайга | 0,98 | $y=15,31–0,002m+0,52q_0$ |

Уравнение регрессии, описанное ранее, разработано для стандартизации возврата электроэнергии в пределах участка маршрута локомотивной бригады. При наличии базы данных тот же метод может быть применен для установления норм для зоны множественного энергопотребления

### 3.2 Анализ результатов экспериментальных поездок ЭПС в режиме рекуперации

В 2020 году на участке Анисимовка – Фридман сотрудниками ДВЖД и АО «ВНИИЖТ» были проведены экспериментальные поездки ЭПС с использованием РТ.

Рисунок 14 демонстрирует схему проведения эксперимента на рассматриваемом участке.




СВЭ – система внешнего электроснабжения; Р–Н – районная нагрузка; ТД – тяговые двигатели; ВИП – выпрямительно–инверторный преобразователь

Рисунок 14 – Схема проведения эксперимента на участке Анисимовка – Фридман

В рамках экспериментальных исследований была применена методика одноплечного нагружения микропроцессорных защитных устройств. Каждый проход тестового электровоза через контролируемую зону строго

соответствовал установленным нормативным весовым параметрам. Специальное внимание уделялось непрерывному контролю показателей качества электроэнергии непосредственно на электроподвижном составе. Параллельно осуществлялся мониторинг параметров электроэнергии на шинах 27,5 кВ смежных тяговых подстанций, питающих исследуемый участок.

Для сбора и обработки экспериментальных данных использовался высокоточный измерительно-вычислительный комплекс ИВК «Омск». В ходе исследований было успешно зарегистрировано более тысячи осциллографических записей рабочих параметров. Дополнительно получены детальные амплитудные спектры токовых и вольтажных характеристик системы, снятые непосредственно с токоприемника подвижного состава. Измерение величины первичного тока выполнялось с помощью прецизионного измерительного трансформатора тока с коэффициентом 600/5А. Контроль уровня напряжения на токоприемнике осуществлялся посредством трансформатора напряжения типа ЗНОМ 35, обеспечивающего необходимую точность измерений.

Для гармонического анализа были отобраны наиболее репрезентативные спектральные характеристики тока, полученные в серии экспериментальных поездок. Исследование охватило широкий диапазон нагрузочных токов, достигающих 400 ампер, с особым акцентом на режимы работы с рекуперативным торможением [11]. Для повышения статистической значимости результатов и достоверности выводов требуется существенное расширение базы спектральных измерений.

Визуализация полученных зависимостей амплитуд гармонических составляющих тока от величины токовой нагрузки электроподвижного состава представлена на рисунках 15, 16 и 17, что позволяет наглядно оценить характер и степень влияния нагрузочных параметров на гармонический состав токов в системе.

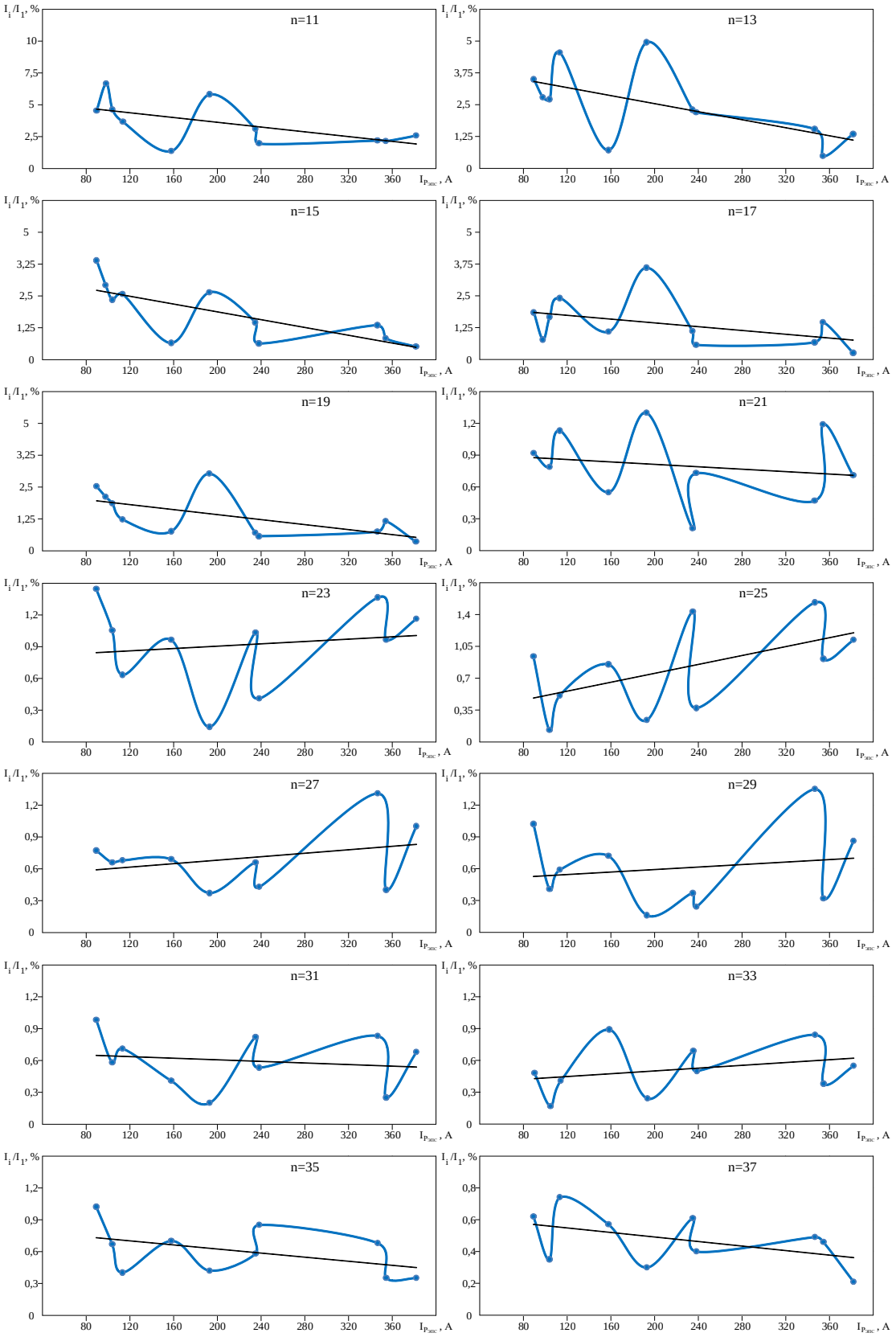



Рисунок 15 – Зависимости изменения амплитуды $A_n$ гармоник тока от нагрузочных токов ЭПС

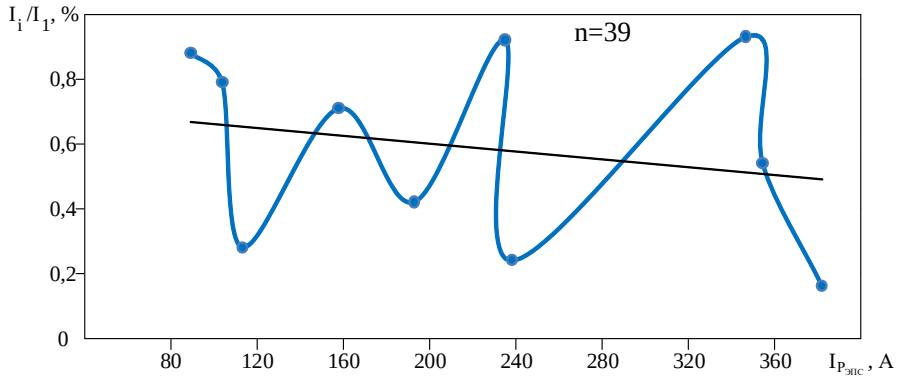



Рисунок 16 – Зависимости изменения амплитуды $A_n$ гармоник тока от нагрузочных токов ЭПС

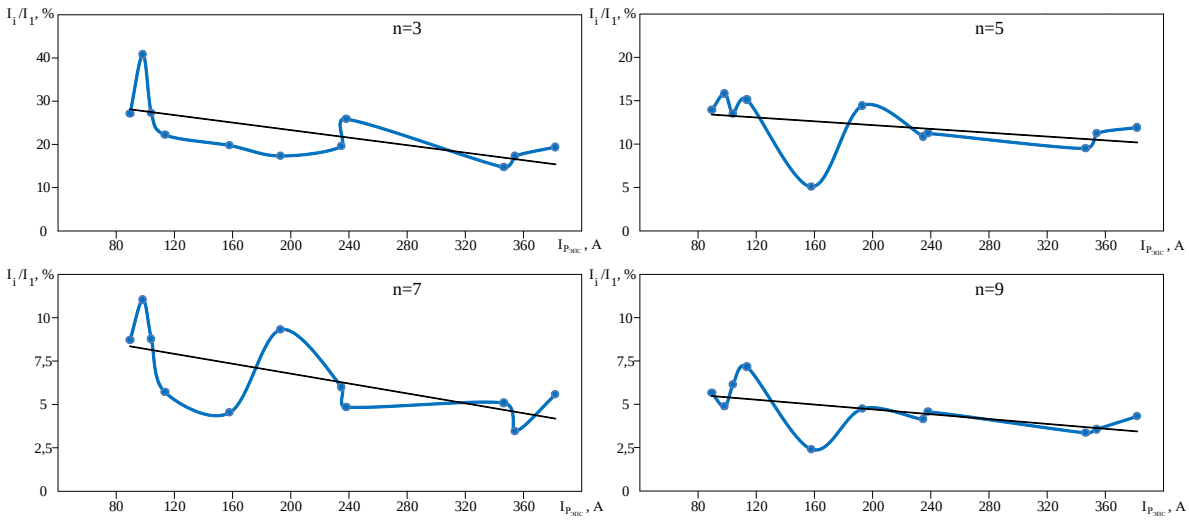



Рисунок 17 – Зависимости изменения амплитуды $A_n$ гармоник тока от нагрузочных токов ЭПС

Амплитуды гармоник тока в электрической системе изменяются в широком диапазоне при увеличении нагрузки. Волнообразное изменение амплитуд гармоник тока наблюдается при росте нагрузки. Гармоники тока с 3–й по 21–ю уменьшаются с увеличением нагрузки, а гармоники с 23–й по 33–ю увеличиваются. Наибольшая амплитуда гармоник наблюдается при нагрузке в 193 А. Гармоники с 35–й по 39–ю уменьшаются с увеличением нагрузки.

### 3.3 Разработка рекомендаций по оптимизации массы поездов

В исследовательской работе применяется специализированный программный комплекс КОРТЭС. Разработка данного программного обеспечения была выполнена научными сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ). Функциональные возможности комплекса включают выполнение точных тяговых расчетов для различных эксплуатационных условий. Расчетные алгоритмы учитывают параметры железнодорожных составов с различной массой, что позволяет моделировать реальные условия работы подвижного состава.

Особое внимание в расчетах уделяется моделированию процессов рекуперативного торможения, что обеспечивает комплексный анализ энергетических показателей. Управление работой программного комплекса осуществляется через специализированный интерфейс приложения KtMain, обеспечивающий удобный доступ ко всем функциям системы. Графическое представление основного рабочего интерфейса системы, демонстрирующее ее функциональные возможности и элементы управления, приведено для наглядности на рисунке 18. Данный программный комплекс представляет собой эффективный инструмент для анализа транспортной работы и энергетических показателей железнодорожного транспорта.

«Программный комплекс КОРТЭС предназначен для решения различных расчетных задач, связанных с подбором параметров, определением эксплуатационных характеристик и грузоподъемности систем тягового электроснабжения» [21].

«КОРТЭС включает в себя следующие основные функции:

- «определение тяговой нагрузки с учетом рекуперации энергии.
- выполнение электрических расчетов на основе моделирования графиков движения поездов для различных категорий поездов.

– расчет схем электроснабжения фидерных зон от нескольких тяговых подстанций со смежными участками.
– рассмотрение реальной схемы подключения фидерных подстанций и секционирующих постов к контактной сети с заданными воздушными зазорами» [21].

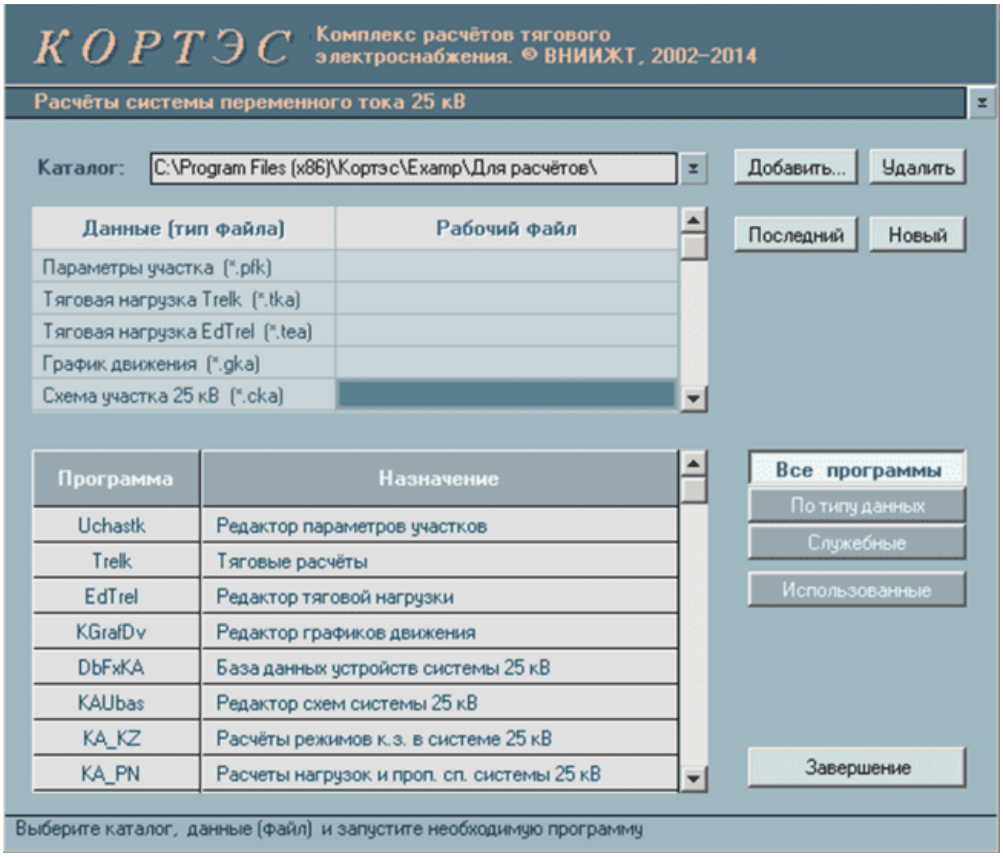



Рисунок 18 – Главное окно программы КОРТЭС

Комплекс КОРТЭС «имеет гибкую структуру и состоит из программных модулей различного назначения, которые связаны между собой посредством общих баз данных и методов управления» [9].

«Во время расчетов мы будем использовать следующие программные модули:

– расчеты тяги (Trelk).

– редактор графика движения (KGrafDv).

– редактор схем системы 25 кВ (KAUbas).

– расчеты нагрузки и пропускной способности (KA_PN)» [9].

В рамках научного исследования планируется выполнить серию расчетных операций по определению тяговых характеристик для железнодорожных составов с различными массогабаритными параметрами. Особое внимание в расчетах уделяется учету параметров рекуперативного торможения на участке пути между станциями Анисимовка и Фридман.

Для выполнения расчетов будет задействован специализированный программный модуль Trelk, являющийся составным элементом комплекса КОРТЭС. Алгоритмы программы предусматривают моделирование процессов рекуперации энергии на основе комплекса исходных параметров, включающих характеристики продольного профиля и плана трассы участка. Исходными данными являются точное расположение контрольных точек на маршруте, ограничения по максимально допустимым скоростям, а также классификационные признаки подвижного состава. В исследовании анализируются три типовых варианта движения: состав массой 6300 тонн в четном направлении, 4500 тонн в том же направлении и 3700 тонн в нечетном направлении.

Полный перечень исходных параметров для расчетов, включая специфические характеристики каждого варианта, систематизирован и представлен в таблице 5 согласно источнику [9].

Таблица 5 – Исходные данные для тягового расчёта поездов массой 6300, 4500, 3700 тонн

| Состав | Локомотив | Масса, т | | | Длина поезда, м |
|---|---|---|---|---|---|
| | | состава | локомотива | поезда | |
| Грузовой 6300 т | 2ЭС5К | 6300 | 192 | 7068 | 1178 |
| Грузовой 4500 т | 2ЭС5К | 4500 | 192 | 5269 | 881 |
| Грузовой 3700 т | 2ЭС5К | 3700 | 192 | 4468 | 749 |

На основании анализа данных, приведенных в таблице 5, в качестве основного локомотива для проведения исследований был определен электровоз 2ЭС5К «Ермак». В рамках методики исследования предусмотрено выполнение сравнительных расчетов для двух принципиально различных режимов эксплуатации: стандартного режима движения с использованием электрической тяги и режима с применением системы рекуперативного торможения (РТ). В процессе выполнения тяговых расчетов особое внимание уделяется определению точных значений потребляемого электрического тока, параметры которого находятся в непосредственной зависимости от характеристик участка пути и установленных скоростных режимов движения [4]. Для комплексной визуализации полученных результатов планируется построение графических зависимостей, отражающих динамику изменения ключевых параметров.

Дополнительно будет выполнена систематизация данных в виде специализированных отчетных документов, характеризующих особенности прохождения различных участков тяговой сети. Графическое представление результатов исследования для составов массой 6300, 4500 и 3700 тонн приведено на рисунках 19, 20 и 21 соответственно.

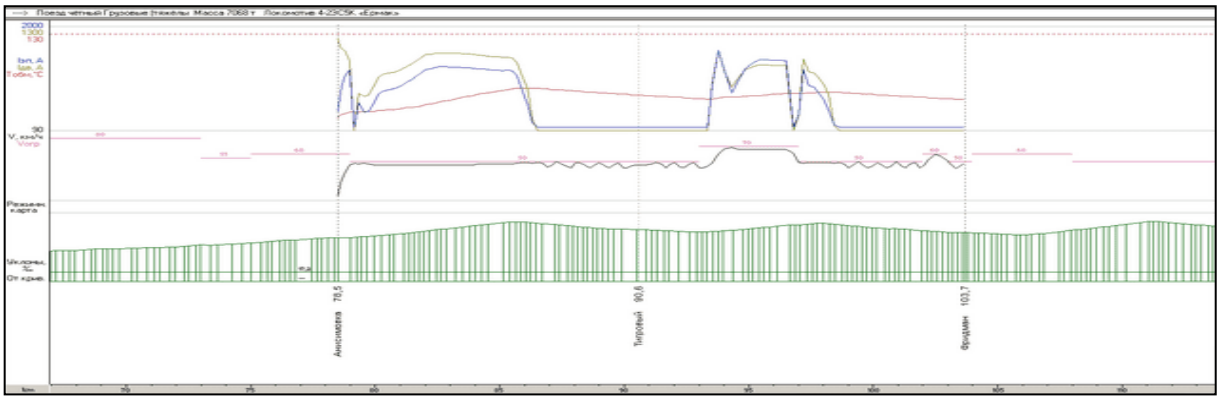


Рисунок 19 – График тягового расчета состава массой 6300 тонн, движущегося в четном направлении на участке Анисимовка – Фридман в режиме тяги

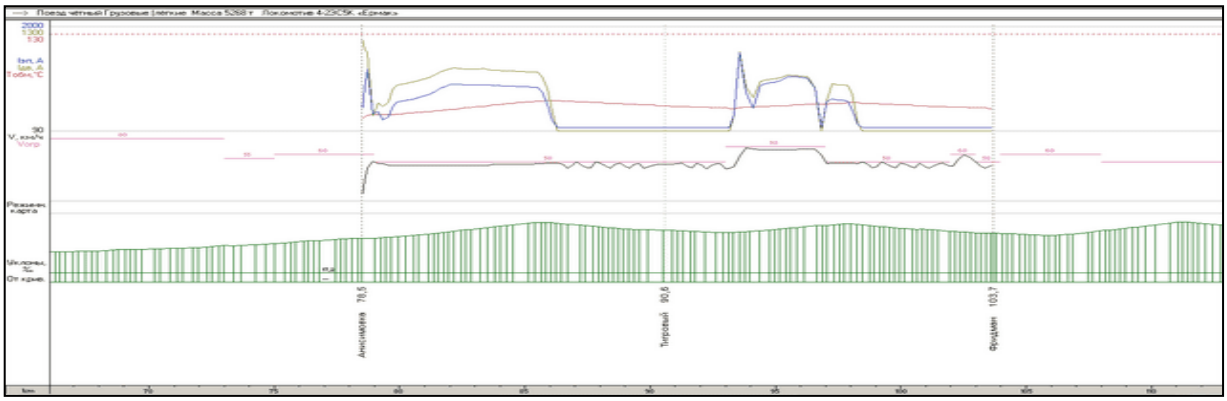


Рисунок 20 – График тягового расчета состава массой 4500 тонн, движущегося в четном направлении на участке Анисимовка – Фридман в режиме тяги

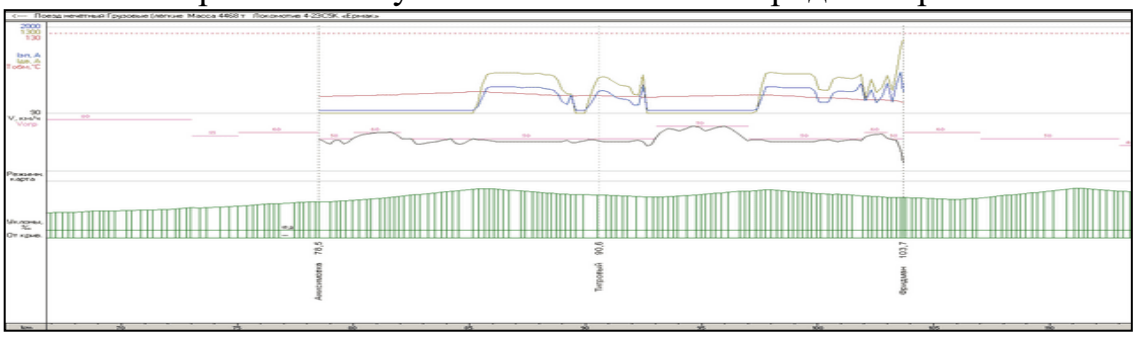


Рисунок 21 – График тягового расчета состава массой 3700 тонн, движущегося в нечетном направлении на участке Анисимовка – Фридман в режиме тяги

Представленные графики наглядно демонстрируют особенности движения составов различной грузоподъемности как в четном, так и в нечетном направлениях по маршруту Анисимовка–Фридман, что позволяет провести сравнительный анализ эффективности работы системы в различных условиях эксплуатации. В процессе выполнения комплекса тяговых расчётов, учитывающих особенности движения железнодорожных составов в различных направлениях, были получены и систематизированы следующие ключевые показатели: точные значения перегонного времени хода, количественные характеристики расхода электроэнергии, а также интегральные результаты расчётных операций, отражающие совокупное

влияние исследуемых параметров Полученные результаты представлены в таблицах 6, 7, 8.

Таблица 6 – Перегонные времена хода и расход энергии для четного направления поездов массой 6300, 4500 тонн

| Перегон | Длина , км | Масса, т | Время хода, мин | | Расход энергии | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | полн | п.током | кВт·ч | кВт·А·ч |
| Анисомовка – Тигровый | 12,1 | 6300 | 16,3 | 10,2 | 3886,7 | 4317,2 |
| | | 4500 | 16,0 | 9,9 | 2929,3 | 3249,2 |
| Тигровый – Фридман | 13,1 | 6300 | 15,6 | 4,5 | 2106,9 | 2346,4 |
| | | 4500 | 15,6 | 4,4 | 1690,3 | 1887,6 |
| Анисимовка – Фридман | 25,2 | 6300 | 31,9 | 14,7 | 5993,6 | 6663,6 |
| | | 4500 | 31,9 | 14,3 | 4619,6 | 5136,9 |

Таблица 7 – Перегонные времена хода и расход энергии для нечетного направления поезда массой 3700 тонн

| Перегон | Длина , км | Масса, т | Время хода, мин | | Расход энергии | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | полн | п.током | кВт·ч | кВт·А·ч |
| Анисомовка – Тигровый | 13,1 | 3700 | 15,6 | 10,4 | 2053,6 | 2294,2 |
| Тигровый – Фридман | 12,1 | 3700 | 15,2 | 5,8 | 1377,3 | 1543,8 |
| Анисимовка – Фридман | 25,2 | 3700 | 30,8 | 16,2 | 3430,9 | 3838,0 |

Таблица 8 – Основные параметры и интегральные результаты расчёта для четного и нечётного направлений поездов массой 6300, 4500 и 3700 тонн

| Параметры | Масса поезда, т | | |
|---|---|---|---|
| | 6300 | 4500 | 3700 |
| Техническая скорость, км/ч | 47,4 | 47,8 | 49,1 |
| Максимальный ток поезда, А | 1623 | 1640 | 1554 |
| Максимальный перегрев обмоток двигателя, °С (допустимое значение 130 °С | 57 | 41 | 35 |
| Расход энергии, кВт·ч | 5993,6 | 4619,6 | 3430,9 |

В результате детального анализа статистических данных, представленных в таблице 8, были сделаны важные выводы о рабочих

параметрах системы. Температурные параметры обмоток тяговых электродвигателей полностью соответствуют установленным техническим нормативам, а контролируемые скоростные показатели электроподвижного состава находятся в пределах регламентированных значений. Для обработки данных применяется временной интервал усреднения 0,25 минуты, что позволяет получить репрезентативные результаты. Основной параметр исследования - изменение тока в зависимости от местоположения состава на участке железнодорожного пути между станциями Анисимовка и Фридман.

Исходные данные для анализа получены из отчетных форм программного комплекса КОРТЭС, обеспечивающего высокую точность расчетов. Особое внимание будет уделено комплексному анализу характеристик энергопотребления подвижным составом различной массы. Полученные результаты будут представлены в графической форме на рисунке 22 с использованием единой масштабной сетки, что обеспечивает наглядность и сопоставимость данных [15].

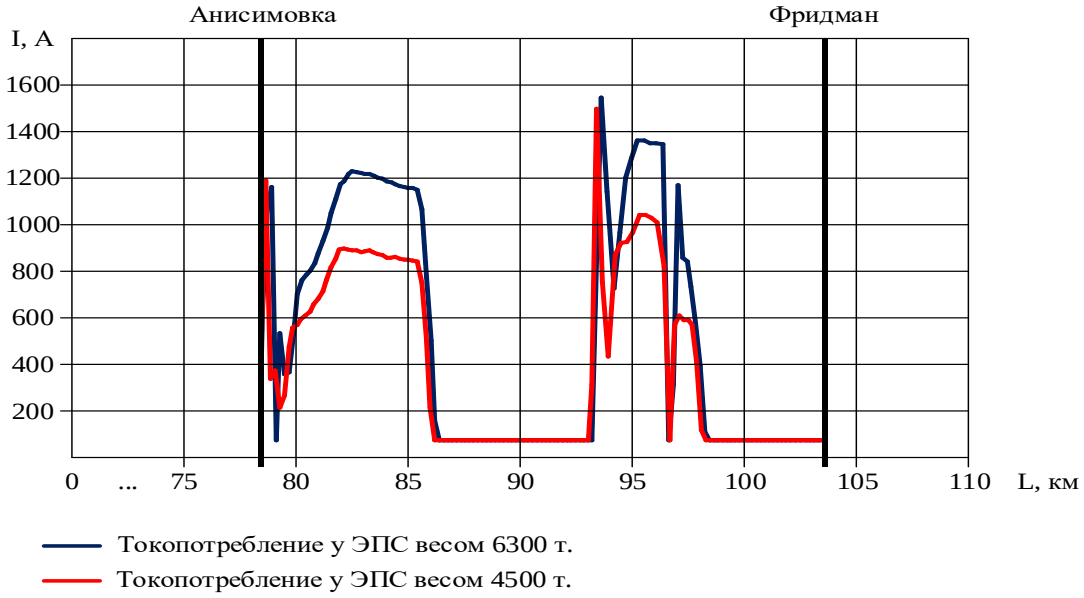



Рисунок 22 – Зависимости токопотребления ЭПС различной массы на участке Анисимовка – Фридман в режиме тяги

Анализ графических данных, представленных на рисунке 22, позволяет выявить устойчивую зависимость между массой состава и потребляемым током. Экспериментально установлено, что величина потребляемого тока электроподвижным составом пропорционально возрастает при увеличении массы состава. На участках пути с положительным уклоном фиксируются максимальные значения токовой нагрузки, тогда как при движении на спусках наблюдается переход системы в режим холостого хода (выбега).

Контрольные измерения подтверждают, что температурные показатели обмоток электродвигателей не превышают допустимых технических нормативов, а мониторинг скоростных характеристик свидетельствует о их соответствии установленным регламентным значениям.

На рисунках 23, 24 и 25 представлены результаты комплексных тяговых расчетов для составов с массой 6300, 4500 и 3700 тонн соответственно. Исследование учитывало особенности работы системы в режиме рекуперативного торможения при движении как в четном, так и в нечетном направлениях на участке железнодорожного пути между станциями Анисимовка и Фридман.

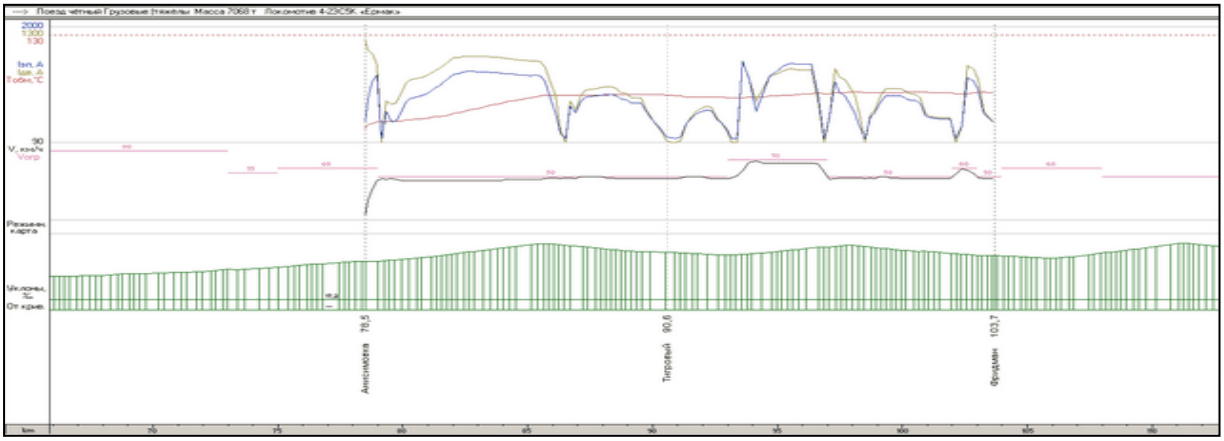


Рисунок 23 – График тягового расчета состава массой 6300 тонн, движущегося в четном направлении на участке Анисимовка – Фридман с применением РТ

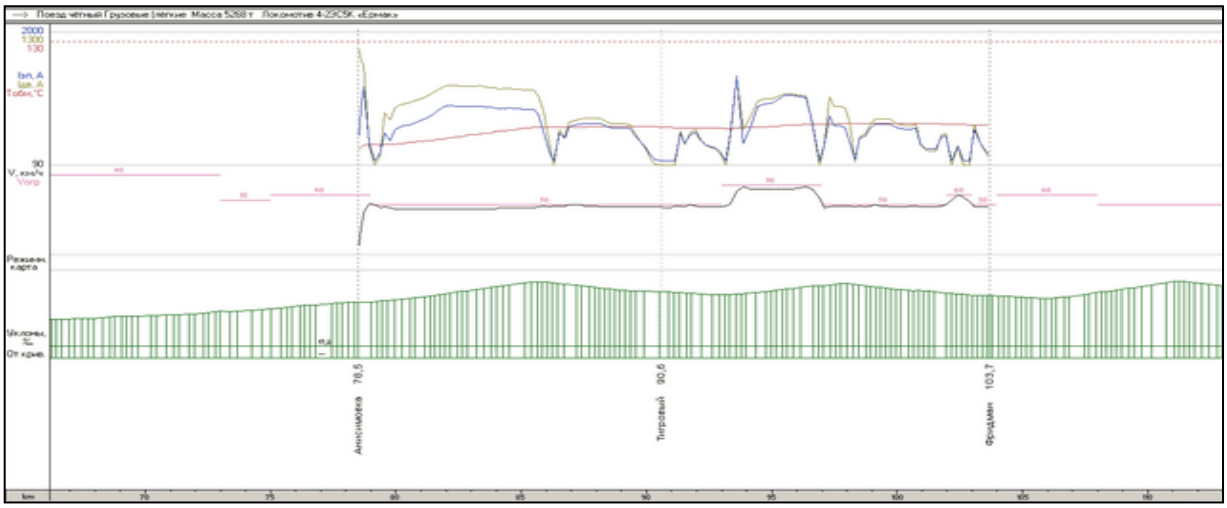


Рисунок 24 – График тягового расчета состава массой 4500 тонн, движущегося в четном направлении на участке Анисимовка – Фридман с применением РТ

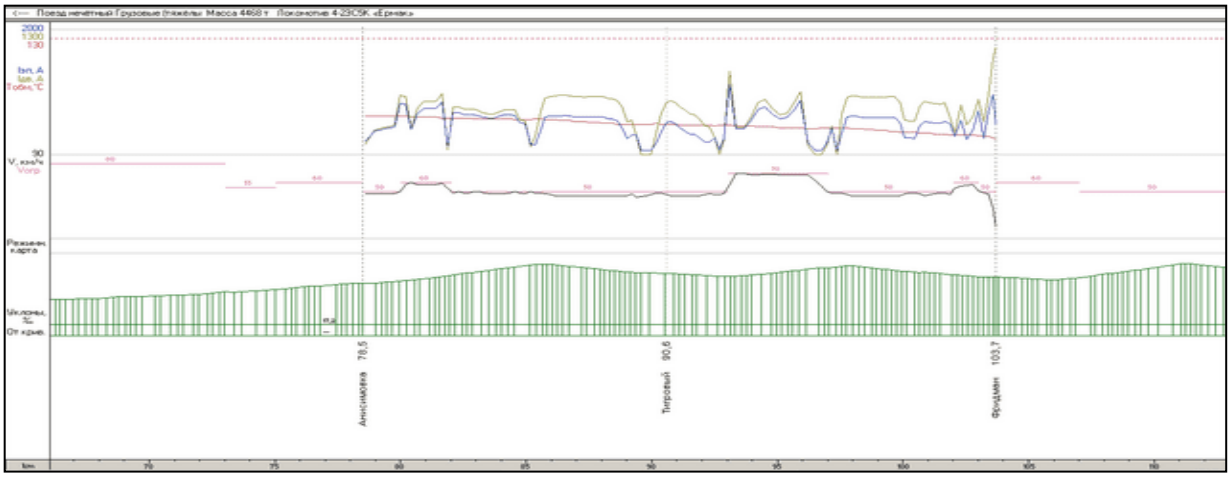


Рисунок 25 – График тягового расчета состава массой 3700 тонн, движущегося в нечетном направлении на участке Анисимовка – Фридман с применением РТ

Полученные данные позволяют провести сравнительный анализ энергетических характеристик подвижного состава различной грузоподъемности в различных условиях эксплуатации. Расчеты для четного и нечетного направлений поездов трех весов и интегральные результаты расчета для режима ведения поезда с использованием РТ представлены соответственно в таблицах 9, 10, 11.

Таблица 9 – Перегонные времена хода и расход энергии для четного направления поездов массой 6300, 4500 тонн

| Перегон | Длина, км | Масса, тонн | Время хода, мин | | Расход энергии | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Полн. | П. током | кВт·ч | кВ·А·ч |
| Анисимовка – Тигровый | 12,100 | 6300 | 16,0 | 15,2 | 3756,9 | 5465,5 |
| | | 4500 | 15,7 | 14,4 | 2772,6 | 4084,3 |
| Тигровый – Фридман | 13,100 | 6300 | 15,0 | 13,0 | 1803,6 | 3933,7 |
| | | 4500 | 14,9 | 11,7 | 1423,5 | 2939,2 |
| Анисимовка – Фридман | 25,200 | 6300 | 31,0 | 28,1 | 5560,5 | 9399,2 |
| | | 4500 | 30,7 | 26,1 | 4196,1 | 7023,5 |

Таблица 10 – Перегонные времена хода и расход энергии для нечетного направления поезда массой 3700 тонн

| Перегон | Длина, км | Масса, тонн | Время хода, мин | | Расход энергии | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Полн. | П. током | кВт·ч | кВ·А·ч |
| Фридман – Тигровый | 13,1 | 3700 | 15,4 | 13,1 | 1921,4 | 2994,2 |
| Тигровый – Анисимовка | 12,100 | 3700 | 14,9 | 13,0 | 1182,1 | 3139,0 |
| Фридман – Анисимовка | 25,200 | 3700 | 30,2 | 26,1 | 3103,6 | 6133,2 |

Таблица 11 – Основные параметры и интегральные результаты расчёта для четного и нечётного направлений поездов массой 6300, 4500 и 3700 тонн

| Параметры | Масса поезда, тонн | | |
|---|---|---|---|
| | 6300 | 4500 | 3700 |
| Техническая скорость, км/ч | 48,8 | 49,3 | 50,0 |
| Максимальный ток поезда, А | 1627 | 1617 | 1554 |
| Максимальный перегрев обмоток двигателя, °С (допустимое 130°С) | 61 | 44 | 43 |
| Расход энергии, кВт·ч | 5560,5 | 4196,1 | 3103,6 |
| Рекуперация, кВт·ч | 1463,1 | 944,5 | 1225,3 |

Экспериментальные данные, представленные в таблице 11, были подвергнуты детальному анализу. Результаты проведённого анализа свидетельствуют о том, что температурные показатели обмоток двигателя остаются в пределах установленных норм. Контрольные замеры подтвердили, что скорость движения электроподвижного состава соответствует регламентированным требованиям. В ходе исследования была изучена корреляционная зависимость между величиной потребляемого тока и массой электроподвижного состава. Указанное исследование проводилось

на железнодорожном перегоне между станциями Анисимовка и Фридман. Экспериментальные испытания осуществлялись в условиях работы системы рекуперативного торможения. Измерительные данные регистрировались при помощи специализированной системы КОРТЭС. Графическая интерпретация полученных результатов отображена на рисунке 23.

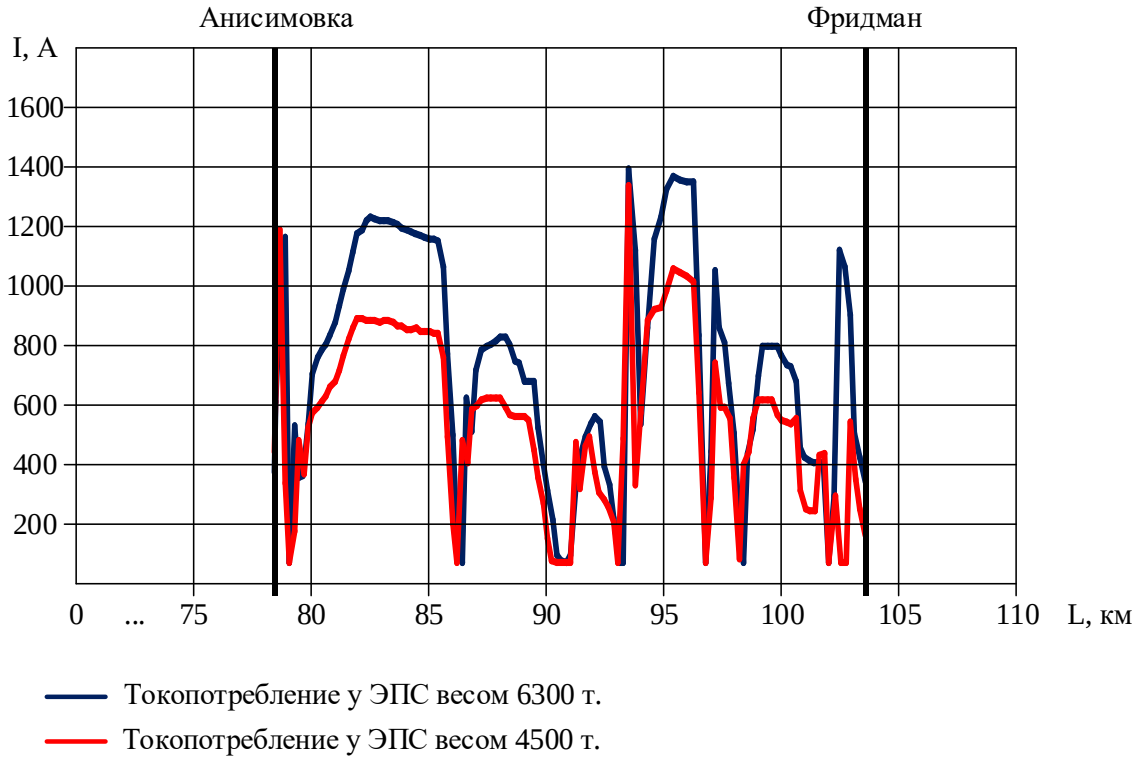



Рисунок 23 – Зависимости токопотребления ЭПС различной массы на участке Анисимовка – Фридман в режиме РТ

Проведенный анализ графических данных позволяет выявить существующую взаимосвязь. Экспериментально установлено, что повышение массы железнодорожного состава приводит к пропорциональному росту силы тока. Исследуемый электровоз осуществлял движение с использованием режима рекуперативного торможения. В течение всего временного интервала прохождения контрольного участка наблюдалось стабильное потребление электроэнергии. Наиболее

интенсивное использование энергоресурсов зафиксировано при преодолении участков с положительным профилем пути. Визуализированные данные, представленные на рисунке 24, демонстрируют четкую зависимость. Количественные показатели энергопотребления электроподвижного состава определяются применяемым режимом управления. Дополнительным фактором влияния выступает полная масса железнодорожного состава. Экспериментальные наблюдения проводились на перегоне между станциями Анисимовка и Фридман.

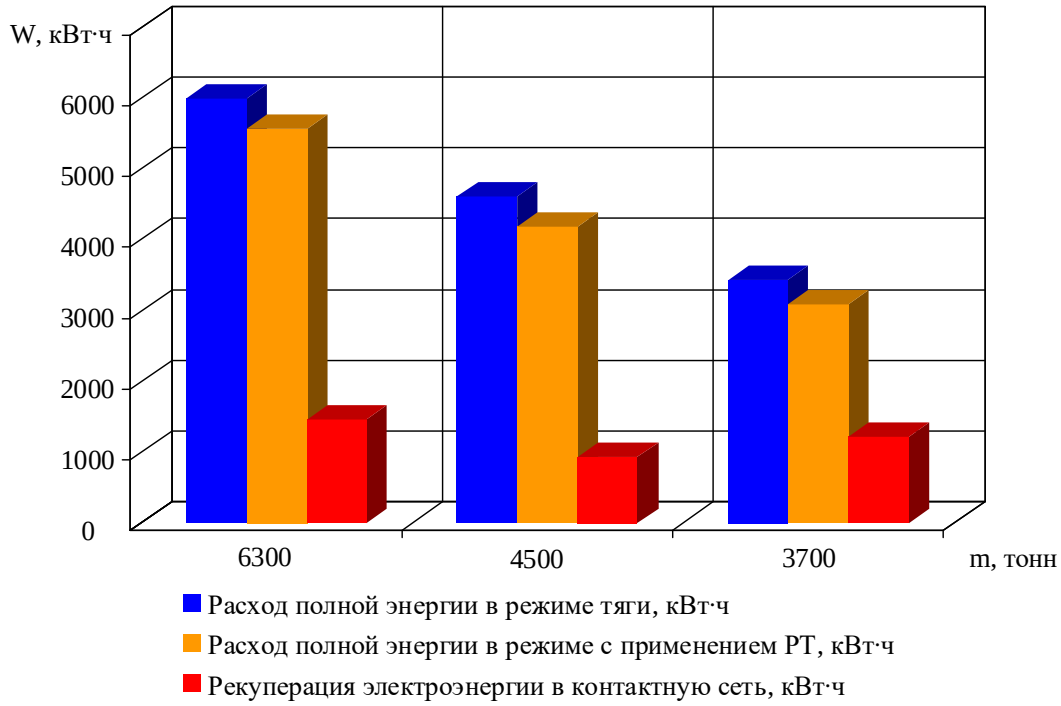



Рисунок 24 – Расходы полной энергии при различных режимах ведения поезда по участку Анисимовка – Фридман

Проведенные экспериментальные исследования наглядно демонстрируют существенную разницу в показателях энергопотребления. Железнодорожный подвижной состав с массой 6300 тонн, работающий в стандартном тяговом режиме, демонстрирует повышенное потребление электроэнергии. Установленная разница в энергопотреблении между

разными режимами работы составляет значительные 7,23 процентных пункта. Технология рекуперативного торможения обеспечивает эффективный возврат в контактную сеть 23,6% от общего объема использованной электроэнергии. Полученные результаты свидетельствуют о достижении существенного энергосберегающего эффекта при эксплуатации. Анализ данных подтверждает прямую зависимость энергопотребления от массы подвижного состава. Совокупное энергопотребление тяжелого состава массой 6300 тонн превышает аналогичный показатель на 22,9%. Сравнительный анализ проводился с более легким составом массой 4500 тонн, движущимся в четном направлении. Практическое применение полученных результатов включает использование данных для точных расчетов параметров системы. Научные источники, подтверждающие данные, приведены в библиографических ссылках под номерами [4, 13].

### 3.4 Разработка рекомендаций по применению рекуперативного торможения при эксплуатации электрифицированного подвижного состава

Для расчёта параметров системы тягового электроснабжения (СТЭ), используем программу KA_PN, которая также известна как «Расчёт нагрузок и пропускной способности системы 25 кВ» в программном пакете КОРТЭ [11]. С помощью подпрограммы «по графику движения» мы получим «следующие показатели:

- $U_{КС}$ – минимальное напряжение (в тяговой сети) на токоприёмнике электрической передачи системы, измеряемое в кВ;
- W – электроэнергия, потребляемая подстанциями одной магистральной передающей зоны, выраженная в кВт·ч;
- $t_{КС}$ – температура нагрева проводов системы, измеряемая в градусах Цельсия;

- $I_{ЭФ}$ – эффективные токи контактной подвески, измеряемые в амперах;
- $K_{П}$ – коэффициенты перегрузки трансформаторов точек подключения» [11].

Затем проведём расчёт параметров СТЭ для двух режимов движения поезда в соответствии с заданным графиком движения поездов (ГДП) с использованием данной подпрограммы.

### 3.4.1 Расчет и анализ параметров системы тягового электроснабжения без учета рекуперативного торможения

Для расчета параметров системы тягового электроснабжения (СТЭ) на участке Анисимовка – Фридман, мы будем учитывать следующие параметры:

- категория поезда – грузовая;
- масса поездов: для четного направления – поезда следуют пакетом из двух составов, с весовыми нормами 6300 тонн (тяжелые) и 4500 тонн (легкие), с чередованием весовых норм 6300 тонн – 4500 тонн – 6300 тонн – 4500 тонн; для нечетного направления – все поезда имеют массу 3700 тонн (порожние);
- интервал между поездами четного и нечетного направления $\Theta$чет = $\Theta_{нечет} = \Theta_{min} = 8$ минут;
- количество поездов в пакете составляет 80 штук, а период пакета равен 632 минутам;
- схема питания контактной сети и секционирования межподстанционной зоны Анисимовка – Фридман представлена на рисунке 25.

Эти параметры будут использованы для проведения расчетов и получения необходимых данных.

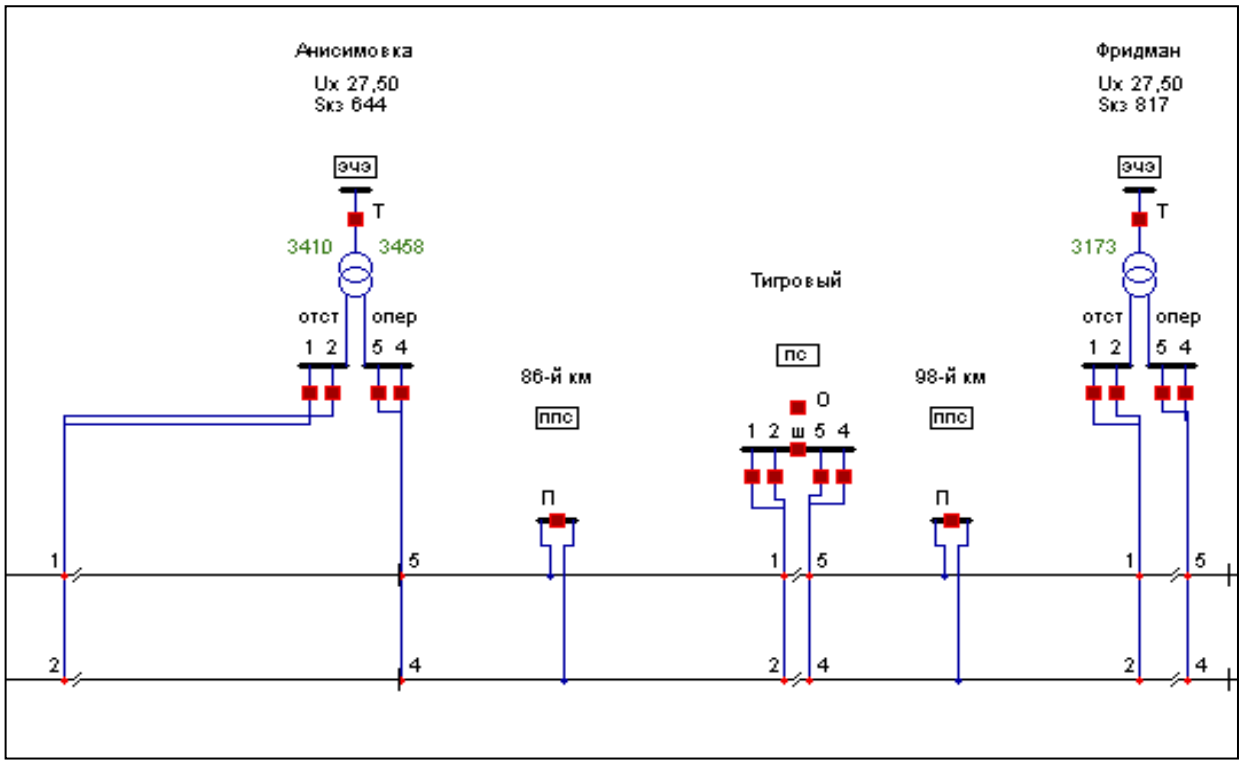



Рисунок 25 – Схема питания контактной сети и секционирования межподстанционной зоны Анисимовка – Фридман

Для питания межподстанционных зон на участке Анисимовка – Фридман используются две тяговые подстанции – «Анисимовка» и «Фридман». Каждая из них оснащена двумя тяговыми трансформаторами типа ТДТНЖ–40000/110–71У1. На данном участке также установлен пост секционирования «Тигровый» и два пункта параллельного соединения – «86–й км» и «98–й км». Все выключатели подстанций, поста секционирования и пунктов параллельного соединения включены.

Для электроснабжения системы переменного тока 27,5 кВ на рассматриваемом участке Анисимовка – Фридман заданы параметры устройств, которые представлены в таблице 12.

«В расчете принимаем, что на обеих тяговых подстанциях – Анисимовка и Фридман, работают по два трансформатора, функционирующих параллельно» [11].

Таблица 12 – Расчётные параметры устройств СТЭ участка Анисимовка – Фридман

| Наименование ТП | Длина зоны, км | Суммарная мощность трансформаторов, МВА | КУ левого плеча $Q_{лп}$ | КУ правого плеча $Q_{пп}$ | Данные межподстанционной зоны | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Наличие включенных ПС(С), ППС(П) | Марки проводов контактной сети пути |
| Анисимовка | 24,5 | 2 × 40,0 | 3410 | 3458 | ПСП | М–95+МФ 100+А–18 |
| Фридман | | | 3173 | – | | |

Согласно источнику [11], «системы тягового электроснабжения должны обеспечивать пропускную и провозную способность участка в соответствии с заданными параметрами грузового движения при следующих условиях работы участка и СТЭ:

- мощность нагрузки основного оборудования тяговых подстанций не должна превышать номинальных значений при заданных параметрах движения поездов и при нормальной схеме СТЭ;
- нагрев проводов контактной сети не должен превышать допустимых значений при использовании отдельного питания для каждого пути;
- нормативы уровня напряжения в тяговой сети должны соблюдаться во время движения поездов при нормальной (проектной) схеме питания и секционирования контактной сети» [11].

Результаты расчета коэффициентов перегрузки трансформаторов тяговых подстанций Анисимовка и Фридман показаны в таблице 13.

Их значения позволяет обеспечить пропускную и провозную способность участка при заданных размерах грузового движения и условиях работы участка и СТЭ. Как следует из таблицы 13 коэффициенты перегрузки трансформатора находятся в допустимых пределах (ниже $K_{ПЕР1'}$=2, $K_{ПЕР10'}$=1,5 и $K_{ПЕР60'}$=1,3 соответственно) при длительности перегрузки

равной 1, 10 и 60 минут.

Таблица 13 – Коэффициенты перегрузки трансформаторов тяговых подстанций Анисимовка и Фридман

| Наименование подстанции | Коэффициенты перегрузки | | | Температура обмоток, °С | Температура масла, °С |
|---|---|---|---|---|---|
| | t = 1 мин | t = 10 мин | t = 60 мин | | |
| Анисимовка | 1,41 | 1,07 | 0,86 | 91 | 71 |
| Фридман | 1,38 | 1,04 | 0,82 | 90 | 71 |

В таблице 14 приведены результаты расчётов параметров СТЭ межподстанционной зоны Анисимовка – Фридман, а именно температура нагрева проводов и эффективные токи контактной подвески. По результатам расчёта, построены диаграммы температуры нагрева проводов и эффективных токов контактной подвески, представленные на рисунках 26 и 27.

Таблица 14 – Температура нагрева проводов и эффективные токи контактной подвески

| Параметры схемы | ТП | ФКС | Эффективные токи контактной подвески, А | | | Температура нагрева проводов КС, °С | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 мин | 3 мин | 20 мин | 1 мин | 3 мин | 20 мин |
| М–95+МФ–100+А–185 Включение трансформаторов 2 × 40 | Анисимовка | Ф5-п | 841 | 761 | 608 | 46 | 46 | 4 |
| | | Ф4-п | 1264 | 1155 | 944 | 547 | 57 | 5 |
| | Фридман | Ф1-л | 1078 | 942 | 824 | 52 | 52 | 5 |
| | | Ф2-л | 1019 | 942 | 697 | 49 | 49 | 4 |

В соответствии с источником [11], можно «провести проверку проводов на нагревание, используя наибольшие эффективные значения тока нагрузки. В источнике» [11] указаны допустимые длительные значения тока «для неизношенных проводов контактной сети переменного тока и воздушных линий электропередачи при температуре окружающего воздуха плюс 40 °С и скорости ветра 1 м/с.

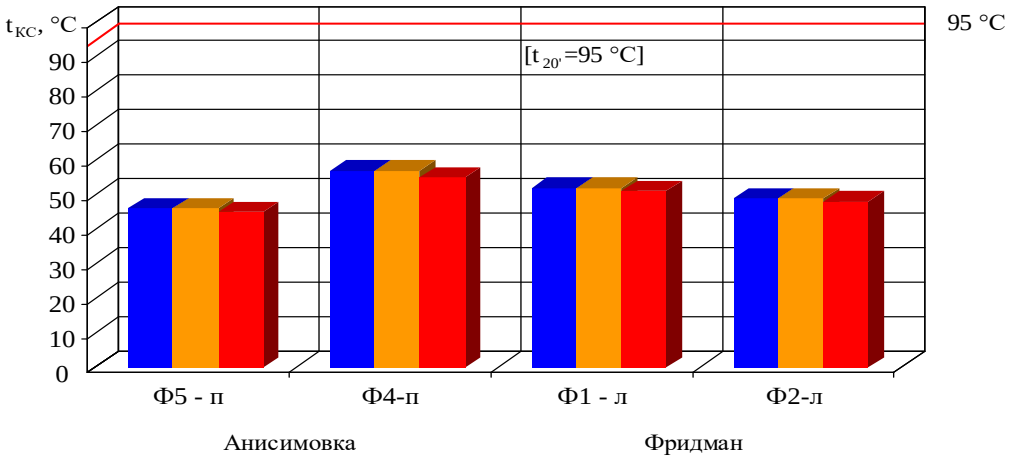



Рисунок 26– Температуры нагрева проводов КС

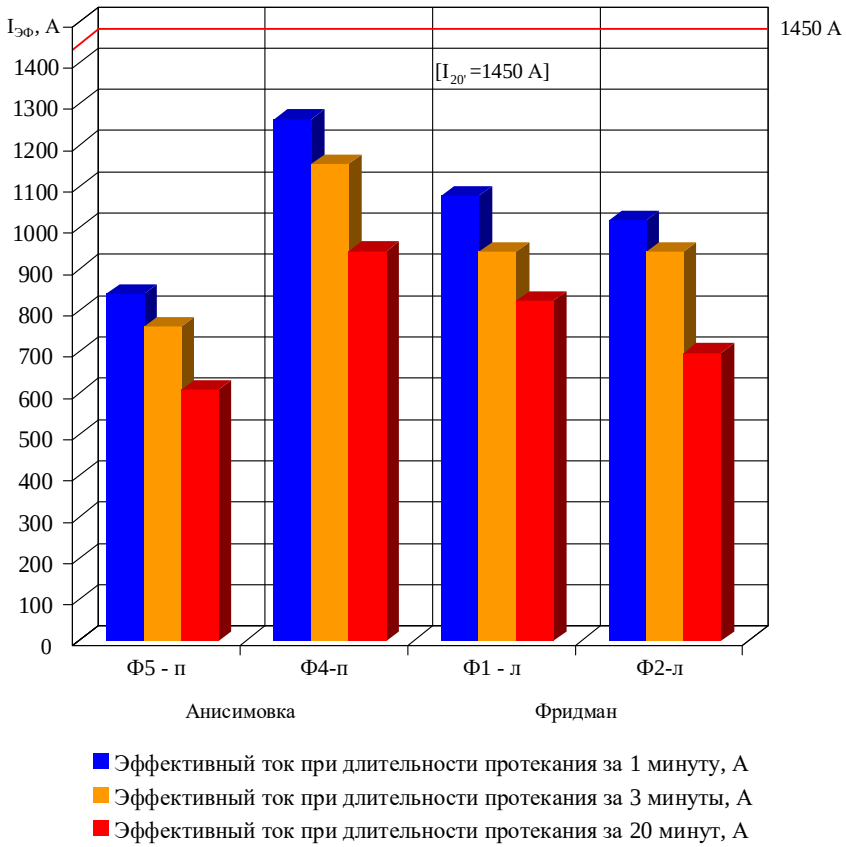



Рисунок 27 – Эффективные токи контактной подвески

Из таблицы 14 и рисунка 26 видно, что температура в контактной сети на участке Анисимовка – Фридман колеблется от 45 до 60 °С. Поэтому не происходит перегрев проводов сверх норм, указанных в источнике [11]. Максимально допустимая температура нагрева проводов, обозначенная красной линией на рисунке 26, составляет 95 °С при продолжительности протекания тока 20 минут и более.

В таблице 14 также приведены значения эффективных токов при продолжительности протекания тока в течение 1 минуты, 3 минут и 20 минут. Из рисунка 27 видно, что эти значения также соответствуют нормативным условиям. Для марки контактной подвески М–95+МФ–100+А–185, в соответствии с источником [11], максимально допустимое значение тока, обозначенное красной линией на рисунке 26, составляет 1450 А.

На рисунке 28 показаны «минимальные напряжения в тяговой сети при работе электровоза в режиме тяги на участке Анисимовка – Фридман» [11].

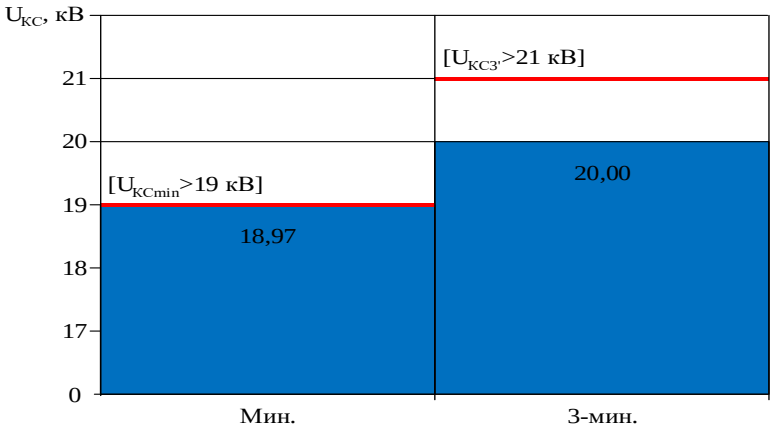



Рисунок 28 – Минимальные напряжения в тяговой сети

Как показано на рисунке 28, рассчитанное значение минимального напряжения в тяговой сети в режиме тяги для электровоза составляет 18,97 кВ, что ниже допустимого значения, указанного в источнике [11] и равного 19 кВ. Кроме того, «рассчитанное значение среднего трехминутного

напряжения в тяговой сети на участке Анисимовка – Фридман в режиме тяги составляет 20 кВ, что также ниже допустимого значения, указанного в источнике» [11].

Согласно источнику [11], «напряжение на токоприемнике ЭПС (среднее значение за 3 минуты) должно быть не менее 21 кВ при переменном токе» [11].

Таким образом, при заданном ГДП невозможно пропустить поезда на участке Анисимовка – Фридман. «Минимальное напряжение в тяговой сети является ограничивающим параметром для данного режима движения поезда. Далее рассмотрим, как изменятся условия пропуска поездов при применении РТ» [11].

### 3.4.2 Расчет и анализ параметров системы тягового электроснабжения с учетом рекуперативного торможения

Расчет параметров СТЭ по заданному ГДП на участке Анисимовка – Фридман проводится по исходным данным, представленным в таблице 15. В ней указаны коэффициенты перегрузки трансформаторов тяговых подстанций Анисимовка и Фридман, полученные в результате расчета.

Таблица 15 – Коэффициенты перегрузки трансформаторов тяговых подстанций Анисимовка и Фридман

| Наименование подстанции | Коэффициенты перегрузки | | | Температура обмоток, °С | Температура масла, °С |
|---|---|---|---|---|---|
| | t = 1 мин | t = 10 мин | t = 60 мин | | |
| Анисимовка | 1,42 | 1,14 | 0,92 | 94 | 73 |
| Фридман | 1,42 | 1,12 | 0,89 | 92 | 72 |

Как следует из таблицы 15, коэффициенты перегрузки трансформатора находятся в допустимых пределах (ниже $K_{ПЕР1}$,=2, $K_{ПЕР10}$,=1,5 и $K_{ПЕР60}$,=1,3 соответственно) при длительности перегрузки равной 1–ой, 10 и 60 минут.

В таблице 16 приведены результаты расчётов параметров СТЭ межподстанционной зоны Анисимовка – Фридман, а именно температура нагрева проводов и эффективные токи контактной подвески.

Таблица 16 – Температура нагрева проводов и эффективные токи контактной подвески

| Параметры схемы | ТП | ФКС | Эффективные токи контактной подвески, А | | | Температура нагрева проводов КС, °С | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 мин | 3 мин | 20 мин | 1 мин | 3 мин | 20 мин |
| М–95+МФ–100+А–185 Включение трансформаторов 2 × 40 | Анисимовка | Ф5-п | 933 | 900 | 784 | 51 | 50 | 50 |
| | | Ф4-п | 1254 | 1113 | 960 | 57 | 57 | 55 |
| | Фридман | Ф1-л | 1052 | 907 | 839 | 52 | 52 | 52 |
| | | Ф2-л | 1080 | 961 | 844 | 53 | 53 | 51 |

По результатам расчёта, приведенным в таблице 16, были построены диаграммы температуры нагрева проводов и эффективных токов контактной подвески, представленные на рисунках 29 и 30.

Рисунок 29 – Температура нагрева проводов КС

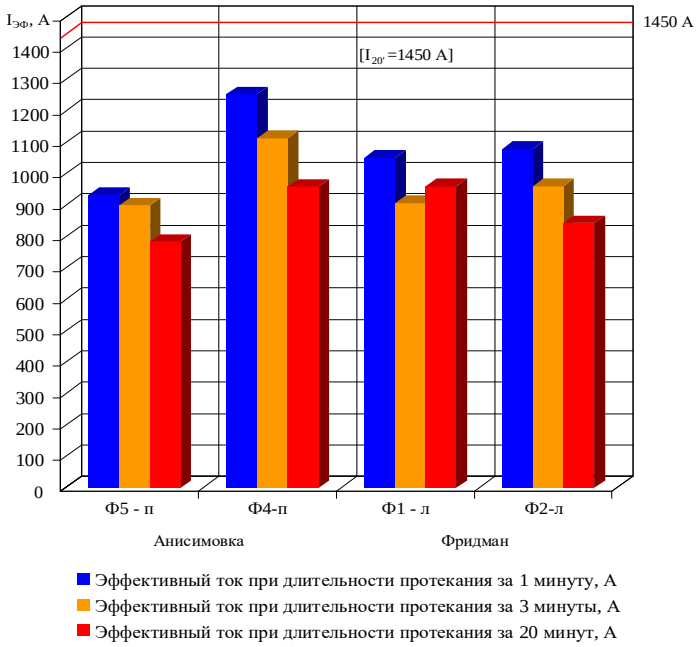



Рисунок 30 – Эффективные токи контактной подвески

Для определения средних токов, необходимо провести расчет значений токов подстанций в амперах. Учитывая, что расчет показателей качества электроэнергии проводится на границе балансовой принадлежности (высоковольтные шины подстанции), все значения токов приводятся к высокому напряжению:

$$i_{\text{п/ст.а}} = \frac{\sqrt{3}\cdot W_{\text{Ргод}}}{8760\cdot U_{\text{ном}}}, \quad (10)$$

$$i_{\text{п/ст.р}} = \frac{\sqrt{3}\cdot W_{Q\text{год}}}{8760\cdot U_{\text{ном}}}, \quad (11)$$

где $U_{\text{ном}}$ = 220 кВ – номинальное напряжение сети;

$W_{\text{Ргод}}$ и $W_{Q\text{год}}$ – среднегодовые значения соответственно активной (кВт·ч) и реактивной (кВАр), которые определяются по формулам (12 и 13)

$$W_{\text{Ргод}} = \sum_{j=1}^{12} W_{a(i,j)}, \quad (12)$$

$$W_{Q\text{год}} = \sum_{j=1}^{12} W_{p(i,j)}, \quad (13)$$

где $W_{a(i,j)}$ и $W_{p(i,j)}$ – расход активной (кВт·ч) и реактивной (кВАр·ч) энергии i–ой подстанции за j–ый месяц.

Согласно рекомендациям из источника [15], «определение средних и эффективных токов для фаз обмотки трансформатора напрямую зависит от класса электростанции. Для фазы обмотки, отстающей по фазе, комплексное значение среднего тока (обозначаемого как А) определяется следующим образом:

для отстающей фазы:

$$\overline{I_{\text{от.ф}}} = \frac{2}{3} \cdot \overline{I_{\text{от}}} \cdot e^{j\overline{\varphi_1}} + \frac{1}{3} \cdot \overline{I_{\text{оп}}} \cdot e^{j\overline{\varphi_2}} + \frac{2}{3} \cdot \overline{I_{\text{ку/фку}}}, \quad (14)$$

для опережающей фазы:

$$\overline{I_{\text{оп.ф}}} = \frac{1}{3} \cdot \overline{I_{\text{от}}} \cdot e^{j\overline{\varphi_1}} - \frac{2}{3} \cdot \overline{I_{\text{оп}}} \cdot e^{j\overline{\varphi_2}} - \frac{1}{3} \cdot \overline{I_{\text{ку/фку}}}, \quad (15)$$

для свободной фазы:

$$\overline{I_{\text{св.ф}}} = -\frac{1}{3} \cdot \overline{I_{\text{от}}} \cdot e^{j\overline{\varphi_1}} + \frac{1}{3} \cdot \overline{I_{\text{оп}}} \cdot e^{j\overline{\varphi_2}} - \frac{1}{3} \cdot \overline{I_{\text{ку/фку}}}, \quad (16)$$

где $\bar{I}_{\text{от}}$, $\bar{I}_{\text{оп}}$ – модули средних значений соответственно отстающего и опережающего плеча, А; $\overline{\varphi_1}$, $\overline{\varphi_2}$ – углы сдвига фаз, зависящие от типа подстанций;

$\bar{I}_{\text{ку/уфк}}$ – ток компенсирующего или фильтрокомпенсирующего устройства, который определяется по формуле (17)

$$\overline{I_{\text{ку/уфк}}} = C_1 \cdot \overline{I_{\text{ку/уфкр}}}, \quad (17)$$

где $C_1$ – комплексный коэффициент: для фазы А $C_1=e^{j90^0}$, для фазы В $C_1=e^{j330^0}$, для фазы С $C_1=e^{j210^0}$;

$\overline{I}_{ку_р}$ – средний ток КУ, определяемый по формуле (18)

$$\overline{I_{ку/уфкр}} = \frac{U_ш}{X_с - X_р} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot U_ш}{U_{ном}}. \quad (18)$$

При определении токов без КУ значение $I_{ку/уфкр}$ принимается равным 0. Определение комплексных значений среднеквадратичного отклонения токов в фазах обмоток трансформатора проводится с учетом технических параметров и условий эксплуатации.

для отстающей фазы:

$$\overline{\sigma_{от.ф}} = \frac{2}{3} \cdot \overline{\sigma_{от}} \cdot e^{j\overline{\varphi_1}} + \frac{1}{3} \cdot \overline{\sigma_{оп}} \cdot e^{j\overline{\varphi_2}}, \quad (19)$$

для опережающей фазы:

$$\overline{\sigma_{от.ф}} = -\frac{1}{3} \cdot \overline{\sigma_{от}} \cdot e^{j\overline{\varphi_1}} - \frac{2}{3} \cdot \overline{\sigma_{оп}} \cdot e^{j\overline{\varphi_2}}, \quad (20)$$

для свободной фазы:

$$\overline{\sigma_{св.ф}} = -\frac{1}{3} \cdot \overline{\sigma_{от}} \cdot e^{j\overline{\varphi_1}} + \frac{1}{3} \cdot \overline{\sigma_{оп}} \cdot e^{j\overline{\varphi_2}}, \quad (21)$$

В рамках электроэнергетики для энергоснабжения тяговых подстанций железнодорожного транспорта установлены стандартные критерии расчета ежемесячного потребления энергии. Для i–ой подстанции в j–ом квартале отчетного года проводится расчет среднего значения активной и реактивной

энергии за k–ый месяц. Такие расчеты необходимы для обеспечения эффективной работы подстанций и оптимизации процессов потребления электроэнергии в системе железнодорожного транспорта:

$$W_{Pi}^{j} = \frac{1}{3}\sum_{k=1}^{3} W_{pk}, \quad (22)$$

$$W_{Qi}^{j} = \frac{1}{3}\sum_{k=1}^{3} W_{Qk}, \quad (23)$$

где $W_{Pi}$, $W_{Qi}$ – расход активной и реактивной энергии за месяц i–ой подстанцией.

Согласно [11], провода проверяются на нагревание по наибольшим значениям тока нагрузки. Допустимые значения тока при определенных условиях окружающей среды приведены в [11]. Из таблицы 16 и рисунка 29 видно, что температура в контактной сети на участке Анисимовка – Фридман находится в допустимых пределах. Значения эффективных токов также соответствуют нормам, как показано на рисунке 30. На рисунке 31 показаны минимальные напряжения в тяговой сети при работе электровоза в режиме рекуперации.

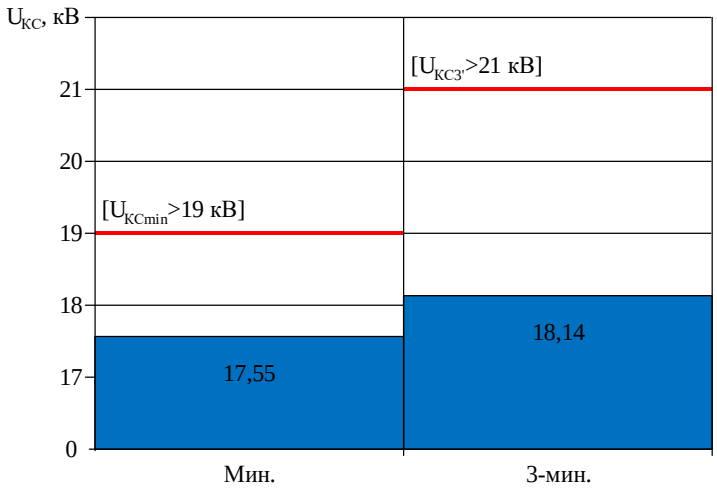



Рисунок 31 – Минимальное напряжение в тяговой сети

Как видно из рисунка 31, при использовании РТ в работе электровоза, рассчитанное значение минимального напряжения в тяговой сети составило 17,55 кВ. Это значение ниже допустимого значения, указанного в [11], которое равно 19 кВ. Кроме того, рассчитанное значение среднего трехминутного напряжения на участке Анисимовка – Фридман составило 18,14 кВ, что также ниже допустимого значения из [11]. Согласно этому документу, напряжение на токоприемнике ЭПС (среднее значение за 3 минуты) должно быть не менее 21 кВ при переменном токе. Таким образом, из–за заданного ГДП невозможно осуществить пропуск поездов на участке Анисимовка – Фридман. Минимальное напряжение в тяговой сети также является лимитирующим параметром СТЭ в данном режиме работы поезда. Далее сравним параметры СТЭ для двух режимов работы поезда.

### 3.4.3 Сравнительный анализ результатов расчета двух режимов движения поездов

На рисунке 32 представлены для сравнения коэффициенты перегрузок трансформаторов подстанций Анисимовка и Фридман.

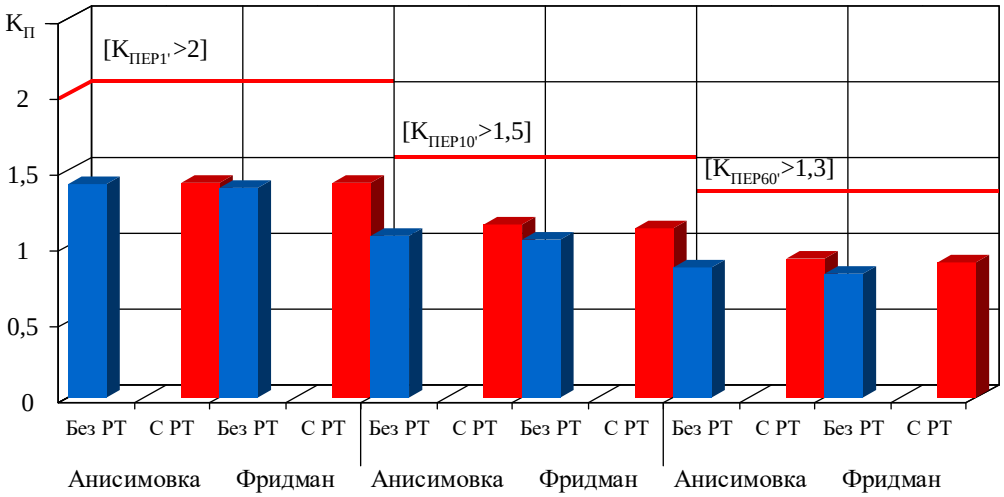



Рисунок 32 – Коэффициенты перегрузки трансформаторов ТП

Как показано на рисунке 32, значения коэффициентов перегрузки трансформаторов на подстанциях Анисимовка и Фридман при использовании РТ в работе электровоза несколько выше, чем в обычном режиме. Конкретно, значения коэффициентов перегрузки трансформаторов на обеих подстанциях при использовании РТ в среднем на 0,075 больше, чем в обычном режиме работы поезда. Однако, несмотря на этот небольшой рост, значения коэффициентов перегрузки трансформаторов на подстанциях Анисимовка и Фридман остаются в пределах, допустимых согласно [17].

На рисунке 33 приведены диаграммы температур нагрева проводов КС для сравнения двух режимов работы поезда.

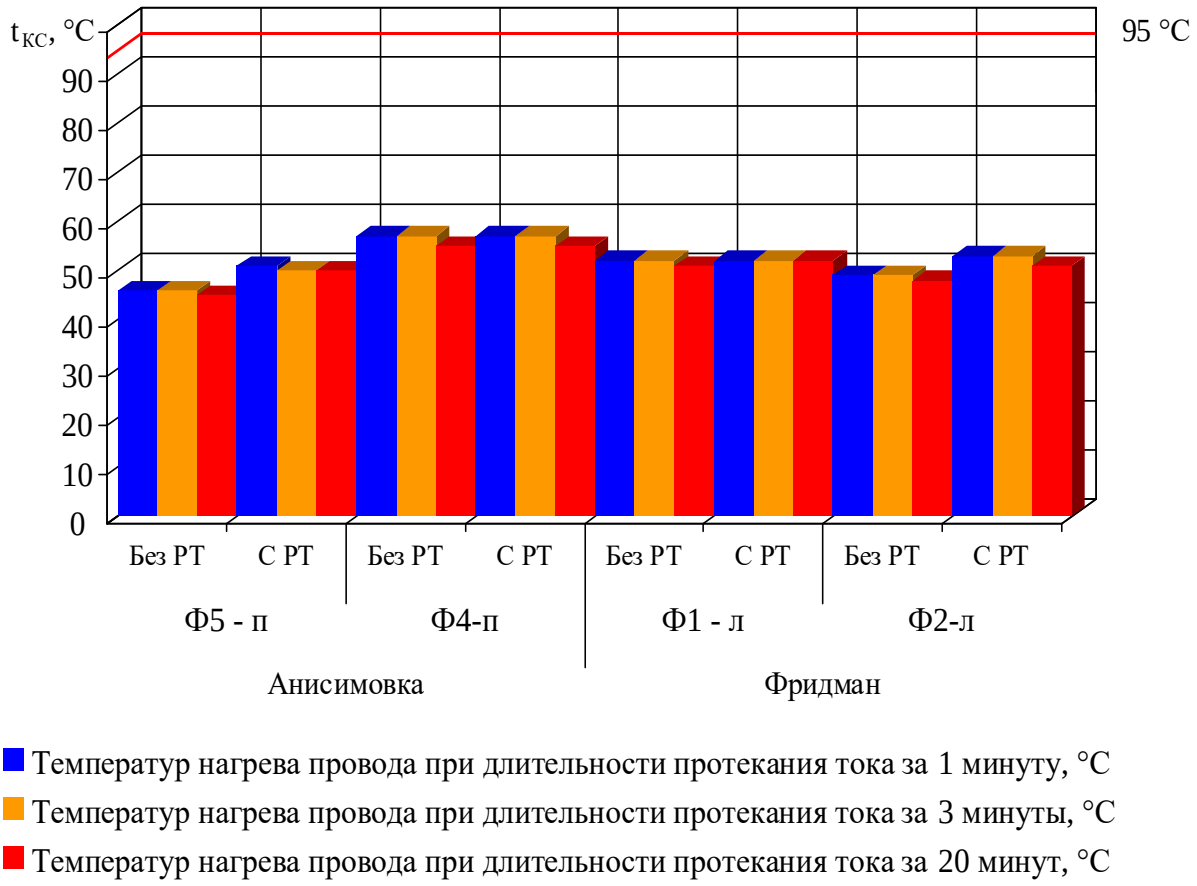



Рисунок 33 – Температура нагрева проводов КС

Как показано на рисунке 33, температура нагрева проводов КС при использовании РТ в работе электровоза несколько выше, но не значительно, чем в обычном режиме тяги. Например, на фидере «Ф5 – п» подстанции Анисимовка температура нагрева проводов КС при длительности протекания тока в течение 1 минуты выше на 5 °С по сравнению с работой электровоза в режиме тяги. На фидере «Ф4 – п» подстанции Анисимовка температура нагрева проводов КС при длительности протекания тока в течение 1 минуты остается неизменной. На фидере «Ф1 – л» подстанции Фридман температура нагрева проводов КС при длительности протекания тока в течение 1 минуты остается неизменной, а на фидере «Ф2 – л» подстанции Фридман она выше на 4 °С по сравнению с работой электровоза в режиме тяги. Незначительное повышение температуры нагрева проводов КС не оказывает влияния на работу СТЭ, так как значения температур остаются в пределах, допустимых согласно [17].

На рисунке 34 представлены для сравнения минимальные напряжения в тяговой сети в двух режимах работы поезда при прохождении ЭПС по участку Анисимовка – Фридман.

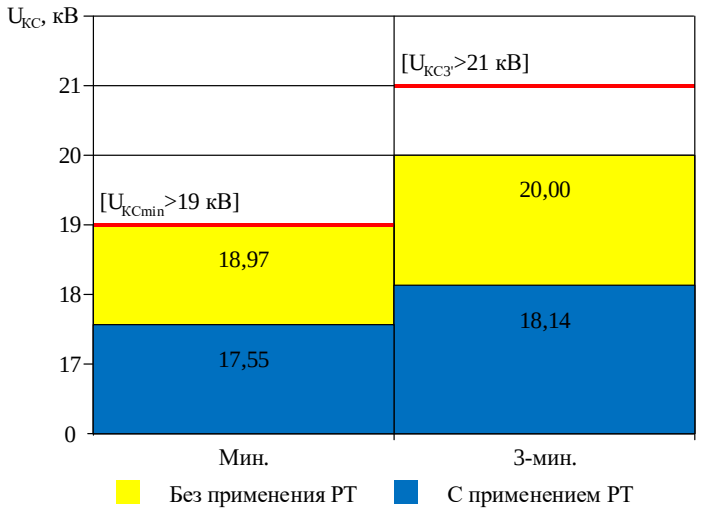



Рисунок 34 – Минимальное напряжение в тяговой сети

Результаты анализа параметров СТЭ позволяют сделать следующие выводы:

- ограничивающим параметром для межподстанционной зоны Анисимовка – Фридман является минимальное напряжение на токоприёмнике ЭПС как при режиме тяги, так и при использовании РТ;
- параметры СТЭ, такие как температура нагрева, эффективный ток нагрузки проводов КС и коэффициент перегрузки трансформатора ТП, находятся в пределах допустимых норм;
- использование РТ приводит к незначительному ухудшению минимального и среднего трёхминутного напряжения в тяговой сети, по сравнению с режимом тяги.

Таким образом, ограничивающим параметром для пропускной способности СТЭ является напряжение в тяговой сети. Дальнейшее рассмотрение включает варианты усиления СТЭ для повышения этого напряжения при использовании РТ

Выводы по разделу 3.

Нормирование рекуперации энергии позволяет научно обосновать сроки возврата электроэнергии в контактную сеть, учитывая такие факторы, как масса поезда, скорость движения и профиль участка, что повышает эффективность энергосбережения.

Многофакторный анализ показал, что масса поезда является ключевым параметром, влияющим на удельную рекуперацию, в то время как нагрузка на ось и температура оказывают меньшее воздействие, особенно на сложных участках пути.

Экспериментальные поездки подтвердили, что использование рекуперативного торможения (РТ) позволяет вернуть до 23,6% потребляемой энергии, что значительно снижает общее электропотребление. Гармонический анализ токов выявил зависимость амплитуд гармоник от

нагрузки, что требует дополнительного контроля качества электроэнергии при использовании РТ. Тяговые расчёты для поездов разной массы (3700–6300 тонн) показали, что увеличение массы приводит к росту энергопотребления, но применение РТ компенсирует этот рост, обеспечивая экономию до 7,23%.

Параметры СТЭ (напряжение, температура проводов, токи) остаются в допустимых пределах при использовании РТ, хотя минимальное напряжение в тяговой сети может снижаться ниже нормативных значений. Сравнение режимов (с РТ и без) выявило незначительное увеличение коэффициентов перегрузки трансформаторов и температуры проводов при РТ, что не критично для работы системы.

Ограничивающий фактор — напряжение в тяговой сети, которое при использовании РТ может опускаться ниже 19 кВ, что требует дополнительных мер усиления СТЭ. Оптимизация массы поездов и применение РТ на участках со сложным профилем позволяют максимизировать возврат энергии и снизить общие затраты на электроэнергию.

Рекомендации по усилению СТЭ включают использование компенсирующих устройств и оптимизацию схем питания для поддержания напряжения в сети, что особенно важно при увеличении массы грузовых поездов.

## 4. Технико–экономическая оценка предложенных мероприятий по снижению электропотребления

«При оценке эффективности рекуперативного торможения мы используем концепцию – абсолютная рекуперация и избыточная энергия.

Первая концепция — это максимальная энергия, которую система электроснабжения (ЭПС) позволила вернуть в тяговую сеть в режиме рекуперации. Она рассчитывается на основе характеристик тяги и представляет собой энергию, которую может произвести ЭПС при движении по железной дороге.

Вторая концепция – это часть энергии рекуперации, которая не используется электровозами в режиме тяги. Вместо этого она либо преобразуется, либо поглощается специализированными приемниками.

Основным показателем оценки эффективности восстановления является специфическое восстановление, как уже упоминалось [11].

На начальном этапе алгоритма информация об электровозах в зоне мониторинга передается на сервер из информационно–измерительных комплексов ЭПС. Эта информация включает:

- $E_k$ – серия локомотива;
- $m_k$ – масса поезда;
- $N_k$ – участок следования;
- $t_i$ – глобальное время;
- $S_{ki}$ – координата пути в момент записи показаний;
- $U_{ki}$ – действующее значение напряжения на токоприемнике в момент записи показаний;
- $I_{ki}$ – действующее значение тока электровоза в момент записи показаний;
- $W_{расх.li}$ – приращение расхода электроэнергии;
- $W_{возв.ki}$ – приращение возврата электроэнергии.

После этого определяется фактическая удельная отдача электровоза $w_{pki}$ на участке между подстанциями и сравнивается с заданной скоростью отдачи» [8].

В рамках исследования возникает необходимость проведения комплексной оценки эффективности. Оценивается система рекуперативного торможения в рабочих условиях эксплуатации. Исследования проводятся на электрифицированных участках с постоянным током. Для точных измерений применяются специализированные измерительные комплексы. Процесс преобразования и использования рекуперативной энергии включает несколько ключевых компонентов. Наиболее наглядным способом представления данных компонентов является графическая визуализация. Выбранный метод визуализации реализован в форме детализированной блок-схемы. Указанная схема представлена на рисунке 35.

Рисунок 35 – Схема составляющих использования энергии рекуперации на участках

«Для определения коэффициента возврата на участке $N_k$, серии локомотивов $E_k$ и массы поезда $m_k$, можно использовать статистический анализ рейсов $w_{pki}$ (при наличии базы данных для этих рейсов) или имитационное моделирование для $w_{pki}$.

Удобным способом представления данных, полученных из моделирования потребления тяги и отдачи мощности, является графическое представление. Это может включать создание энергетических диаграмм, которые показывают минимальное потребление энергии для тяги и максимальную потенциальную рекуперацию энергии на всех участках железной дороги. Однако, учитывая, что этот метод имеет свои ограничения, мы сосредоточимся только на расчетах тяги и построении энергетических диаграмм для определенного участка локомотивной бригады» [21].

«Для повышения уровня напряжения в тяговой сети и поддержания его в пределах допустимых значений, указанных в ПУСТЭ–97» [11], существует несколько мер:

- «применение средств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) на трансформаторе ТП, с оперативными переключениями при изменении нагрузки;
- изменение сечения проводов КС, причем использование типа провода КП М–95+МФ–100+А–185 с наименьшим сопротивлением является наиболее целесообразным из всех КП, заложенных в базе данных КОРТЭС;
- переход от раздельной схемы питания к узловой или параллельной. На участке Анисимовка – Фридман уже используется параллельная схема питания;
- применение статических компенсирующих устройств, таких как фильтркомпенсирующие установки (ФКУ), статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности и конденсаторные установки. В частности, используются установки

продольной (последовательная с нагрузкой) и поперечной (параллельная нагрузке) компенсации, как регулируемые, так и нерегулируемые» [17].

«Учитывая, что все перечисленные меры уже используются, в качестве способа усиления СТЭ будут использоваться компенсирующие установки, а именно установки продольной и поперечной компенсации.

Энергетическая стратегия железнодорожного транспорта направлена на переход к энергосберегающим технологиям и различным методам сокращения потерь электрической мощности и электроэнергии. В связи с повышенным вниманием к энергосбережению в стране, установки емкостной компенсации являются эффективным средством для снижения потерь электроэнергии как в системе тягового, так и в системе внешнего электроснабжения» [22].

«Применение установок поперечной и продольной компенсации приводит к повышению качества электроэнергии СТЭ. Установки емкостной компенсации решают проблему несинусоидальности напряжения и тока, а также несимметрии на шинах подстанций» [22].

«Тяговая нагрузка имеет свою специфику из–за широкого диапазона изменений в различных режимах работы ЭПС, а также постоянного перемещения и изменения числа ЭПС на МПЗ. Это приводит к изменению графика потребления реактивной мощности ЭПС со временем. Поэтому для нормализации режима напряжения и снижения потерь электроэнергии, мощность устройств поперечной компенсации должна быть регулируемой в зависимости от изменений в тяговой нагрузке. В Правилах технической эксплуатации электроустановок потребителей указывается, что управление конденсаторной установкой и регулирование режима работы батарей конденсаторов должно быть, как правило, автоматическим» [20].

«Установки поперечной и продольной компенсации в СТЭ железных дорог решают несколько задач: повышают пропускную способность

железных дорог, обеспечивают повышение уровня напряжения, снижают потери электроэнергии, способствуют энергосбережению, повышают эффективность работы электрооборудования, улучшают качество электроэнергии и в целом улучшают электромагнитную совместимость тяговых сетей» [24].

«На рассматриваемом участке, на подстанции Анисимовка, в базе данных КОРТЭС указаны следующие параметры установок поперечной компенсации: мощность $Q_{КУ.лев}$=3410 кВАр в левое плечо и $Q_{КУ.прав}$=3458 кВАр в правое плечо. Также на подстанции Фридман мощность установки поперечной компенсации в левом плече составляет $Q_{КУ.лев}$=3173 кВАр. Однако, как показали результаты проведенных расчетов, ограничивающим параметром пропускной способности СТЭ является напряжение в тяговой сети.

Для усиления системы тягового электроснабжения (СТЭ) поэтапно увеличим мощность установок поперечной компенсации на отстающих плечах трансформаторной подстанции (ТП) Анисимовка и Фридман. Затем добавим включение установок продольной компенсации на тех же подстанциях.

Произведем расчет параметров СТЭ при различных вариантах усиления:

- первый вариант предусматривает увеличение мощности установок поперечной компенсации на плечах ТП с 3000 до 5000 квар;
- во втором варианте включаются установки продольной компенсации на плечах ТП;
- третий вариант предполагает одновременную работу установок поперечной и продольной компенсаций на плечах ТП;
- четвертый вариант включает установки продольной компенсации в отсасывающий провод;

– пятый вариант предусматривает одновременную работу установок поперечной компенсации на плечах ТП и установок продольной компенсации в отсасывающем проводе» [8].

Для каждого варианта усиления СТЭ проведем серию расчетов, чтобы наблюдать изменение напряжения в тяговой сети.

Для обеспечения оптимального функционирования системы тягового электроснабжения необходимо учитывать оплату реактивной мощности и энергии, потребляемой группой подстанций переменного тока. «Для сокращения потребления реактивной энергии до уровня экономической эффективности вводятся в эксплуатацию компенсирующие установки (КУ) или устройства фильтрации и компенсации (УФК), осуществляющие параллельную (поперечную) емкостную компенсацию» [8].

Суммарная мощность КУ, УФК в кВАр по группе подстанций для i–го квартала равна:

$$\sum_n^i Q_{\text{ку/уфк}} = \frac{\sum_n^i W_{Qi} - W_{Q\text{э}}^i}{730}, \quad (24)$$

где $W_{Qi}$ – среднемесячное значение реактивной энергии, кВАр·ч, i–го квартала.

Расчет мощности реактивной компенсации и установленной фильтрации конденсаторов на напряжении 27,5 кВ на шинах i–ой станции тяги осуществляется путем определения:

$$Q_{\text{ку(уфк)}i} = Q_{\text{ку(уфк)}i}^{\text{год}} - \frac{\frac{1}{R_{\text{вх27,5}i}} \cdot (\sum_{i=1}^n Q_i^{\text{год}} - \sum_{i=1}^n Q_{\text{ку(уфк)}}^{\text{год}})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{\text{вх27,5}i}}}, \quad (25)$$

где «$R_{\text{вх27,5i}}$ – активное входное сопротивление до шин 27,5 кВ i–ой подстанции, Ом» [8];

$Q^{\text{год}}_{\text{ку(уфк)}}$ – среднее значение за год реактивной мощности i–ой подстанции, кВАр, определяемое по формуле (26)

$$Q^{\text{год}}_{\text{ку(уфк)}} = \frac{\sum_{к=1}^{12} W_{Qi,k}}{8760}, \quad (26)$$

Должно выполняться следующее условие:

$$Q_{\text{ку(уфк)}i} < \frac{1}{2} Q_{\text{ку(уфк)}min}, \quad (27)$$

Первый вариант заданных параметров (максимальная мощность установок поперечной компенсации при отключенных установках продольной компенсации):

– ТП Анисимовка: $Q_{КУ.лев}$=5034 кВАр и $Q_{КУ.прав}$=5034 кВАр;

– ТП Фридман: $Q_{КУ.лев}$=5034 кВАр.

Второй вариант заданных параметров (включенные установки продольной компенсации при отключенных установках поперечной компенсации):

– ТП Анисимовка: $Q_{УПК.прав}$=7560 кВАр;

– ТП Фридман: $Q_{УПК.лев}$=7560 кВАр.

Третий вариант заданных параметров (одновременно включенные установки продольной и поперечной компенсации в плечах питания ТП):

– ТП Анисимовка: $Q_{КУ.лев}$=3410 кВАр и $Q_{КУ.прав}$=3458 кВАр; $Q_{УПК.прав}$=7560 кВАр;

– ТП Фридман: $Q_{КУ.лев}$=3173 кВАр; 7560 кВАр.

Четвёртый вариант заданных параметров (включенные установки продольной компенсации в фазу С при отключенных установках поперечной компенсации):

– ТП Анисимовка: $Q_{УПК.фазаС}$=14400 кВАр;

– ТП Фридман: $Q_{УПК.фазаС}$=14400 кВАр.

Пятый вариант заданных параметров (одновременно включенные установки продольной компенсации в фазу С и установки поперечной компенсации в плечах питания ТП):

– ТП Анисимовка: QКУ.лев=3410 кВАр и QКУ.прав=3458 кВАр; QУПК.фазаС=14400 кВАр;

– ТП Фридман: $Q_{КУ.лев}$=3173 кВАр; $Q_{УПК.фазаС}$=14400 кВАр.

Результаты расчетов, полученных в программе КОРТЭС для пяти вариантов включения установок поперечной и продольной компенсации представлены на рисунках 36 и 37.

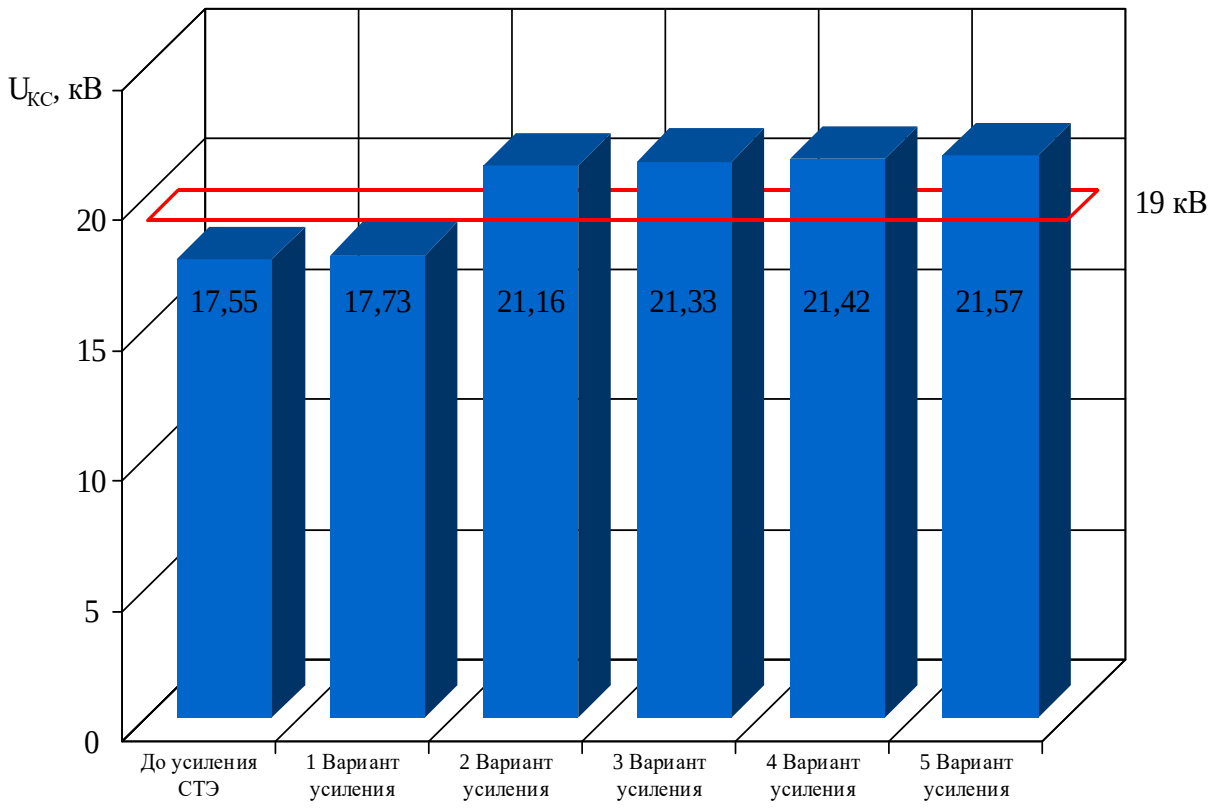



Рисунок 36 – Минимальные напряжения в тяговой сети до и после усиления СТЭ

Функциональные элементы системы тягового электроснабжения подвергаются деструктивному воздействию. Указанное воздействие обусловлено возникновением асимметричных режимов работы электрооборудования. Параметрическая несимметрия представляет собой критически важный эксплуатационный фактор. Обеспечение нормированных показателей качества электроэнергии требует специальных мер. Особую актуальность данные мероприятия приобретают для тяговых электрических сетей. Обязательным условием является поддержание стабильных параметров напряжения. Необходим постоянный мониторинг и коррекция асимметричных составляющих.

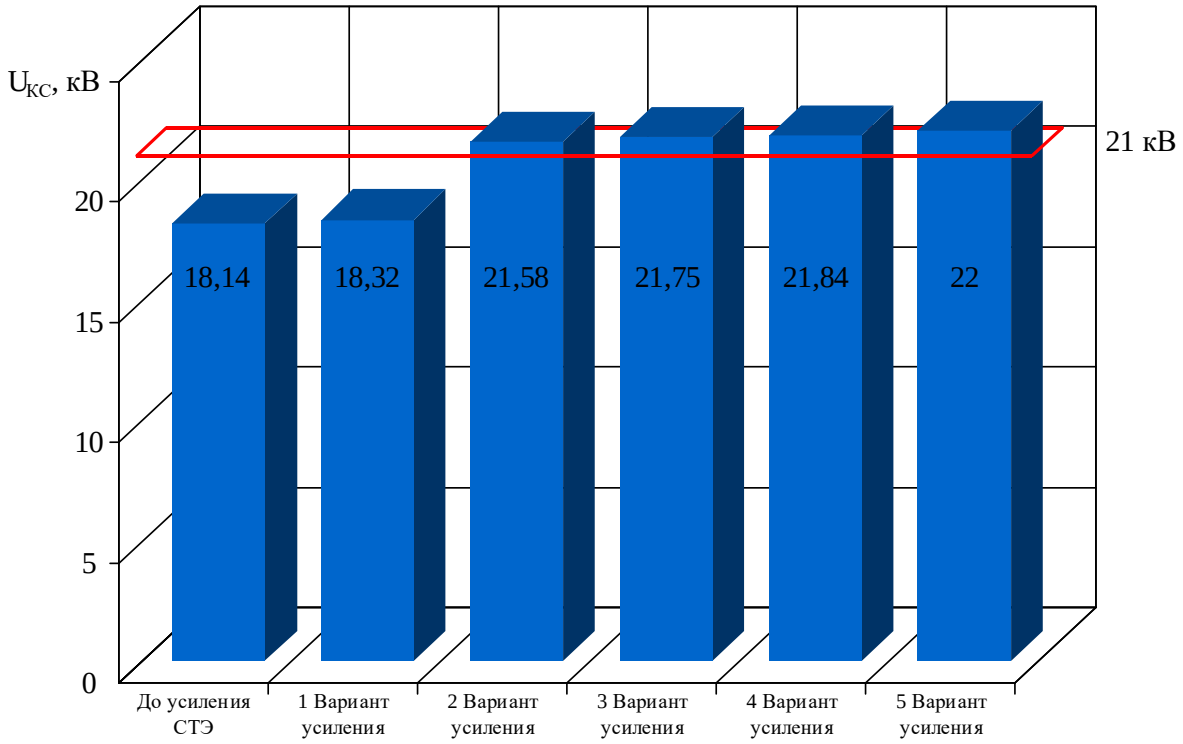



Рисунок 37 – Минимальные напряжения в тяговой сети до и после усиления СТЭ

Относительное значение напряжения обратной последовательности характеризует несимметрию, и его вектор определяется в киловольтах:

$$\dot{U_2} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{U}_A + \dot{a}^2 \cdot \dot{U}_B + \dot{a} \cdot \dot{U}_c), \quad (28)$$

где $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$ – комплексные значения напряжения фаз, a, b, c, кВ;

$\dot{a}$ – оператор поворота, рад (формула 29)

$$\dot{a} = e^{j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (29)$$

Величина, характеризующая напряжение в сети, измеряется в киловольтах и определяется на основе специальной математической формулы, учитывающей фазовые параметры системы:

$$\dot{U}_Ф = (Z_{вх} + \frac{Z_c}{3}) \cdot \dot{I}_ф \cdot 10^{-3}, \quad (30)$$

где « $Z_{вх}$ – входное сопротивление до шин тяговых подстанций на основной частоте (50 Гц), Ом;

$Z_c$ – сопротивление системы, Ом;

$\dot{I}_ф$ – комплексное значение токов в фазах a, b, c, А» [17].

Графические зависимости, представленные на рисунках 36 и 37, позволяют провести детальный анализ. Активация устройств продольной компенсации способствует стабилизации параметров напряжения. Значения напряжения поддерживаются в пределах установленных нормативных границ. Требуемые нормативные показатели приведены в ссылочном источнике [11]. В первом рассматриваемом варианте модернизации была реализована максимальная мощность поперечных компенсирующих устройств. При этом устройства продольной компенсации находились в неактивном состоянии. Полученные значения напряжения не соответствовали требованиям стандарта ПУСТЭ-97. Второй вариант модернизации предполагал включение продольных компенсирующих

устройств. Одновременно с этим поперечные компенсаторы были выведены из рабочего режима. В результате минимальное значение напряжения увеличилось на 3,61 кВ относительно исходного уровня. Третий экспериментальный вариант предусматривал совместную эксплуатацию обоих типов компенсирующих устройств. Наблюдаемое влияние на параметры напряжения оказалось статистически незначимым. В четвертом варианте исследований был задействован продольный компенсатор, установленный в фазе С. Зафиксировано несущественное увеличение показателей напряжения в сети. Пятый вариант модернизации по своим характеристикам был аналогичен первому и третьему случаям. Воздействие поперечных компенсирующих устройств на параметры сети оказалось минимальным. Проведенные расчетные исследования выявили незначительные изменения параметров. Среди всех рассмотренных вариантов наибольшую эффективность продемонстрировал пятый. Максимальное достигнутое значение напряжения составило 21,57 кВ. Указанное значение превышает исходный уровень на 4,02 кВ. Создаются благоприятные эксплуатационные условия для движения электроподвижного состава. В таблице 17 представлены результаты проведенных расчетных исследований.

Таблица 17 – Расчет параметров СТЭ для участка Анисимовка – Фридман

| Параметры СТЭ | Наименование подстанции | ФКС | Варианты усиления | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| $К_п$ при t=1 мин | Анисимовка | – | 1,4 | 1,46 | 1,42 | 1,46 | 1,42 |
| | Фридман | – | 1,39 | 1,46 | 1,4 | 1,45 | 1,40 |
| $Т_{кс}$ при длительности протекания тока 1 мин | Анисимовка | Ф5-п | 51 | 51 | 51 | 51 | 51 |
| | | Ф4-п | 57 | 57 | 57 | 57 | 57 |
| | Фридман | Ф1-л | 52 | 52 | 52 | 52 | 52 |
| | | Ф2-л | 53 | 53 | 53 | 53 | 53 |
| $I_{эф}$ при длительности протекания тока 1 мин | Анисимовка | Ф5-п | 931 | 937 | 935 | 936 | 942 |
| | | Ф4-п | 1253 | 1255 | 1257 | 1255 | 1250 |
| | Фридман | Ф1-л | 1053 | 1052 | 1050 | 1051 | 1048 |
| | | Ф2-л | 1080 | 1075 | 1072 | 1077 | 1070 |

Оптимальная конфигурация энергетической системы включает специализированные компенсирующие устройства. Устройства продольной компенсации смонтированы в фазе С электрической сети. Компенсаторы поперечного типа установлены на ответвлениях тяговых подстанций. В представленных табличных материалах содержится комплекс расчетных данных. В частности, приведены вычисленные значения коэффициентов загрузки силовых трансформаторов. В документации представлены результаты детальных тепловых расчетов для элементов сети. Была проведена систематизация данных по рабочим токам в элементах подвески. Анализ информации, содержащейся в таблице 17, демонстрирует определенные изменения. Наблюдаемые изменения параметров имеют незначительную величину. Коэффициенты перегрузки трансформаторного оборудования остаются практически неизменными. Значения эффективных токов в контактной подвеске сохраняют стабильность. Температурные показатели проводников не подвергаются существенным колебаниям. Модернизация системы электроснабжения не оказывает заметного влияния на ключевые параметры. Единственным исключением являются показатели напряжения в тяговой сети. Применение предложенной схемы компенсации обеспечивает достижение нормативных показателей. Требуемые нормативные значения приведены в ссылочном источнике [17].

Выводы по разделу 4

Эффективность рекуперативного торможения оценивается через абсолютную и избыточную рекуперацию, где первая отражает максимально возможный возврат энергии в сеть, а вторая — неиспользуемую часть, поглощаемую спецустройствами. Ключевые параметры мониторинга включают массу поезда, напряжение, ток, расход и возврат энергии, что позволяет анализировать удельную отдачу электровоза и сравнивать её с нормативами. Существуют различные технические решения для повышения напряжения. В тяговых сетях возможно применение нескольких методов

регулирования. Одним из эффективных способов является использование устройств РПН. Данные устройства устанавливаются на силовых трансформаторах подстанций. Значительного эффекта можно достичь путем оптимизации конструктивных параметров. В частности, требуется пересмотр сечения проводов контактной сети. Существенную роль играет модернизация схем электроснабжения. Перспективным направлением является переход на узловые схемы питания. Альтернативой может служить внедрение параллельных конфигураций. Современные компенсирующие установки обладают функцией автоматической адаптации. К ним относятся фазовые и статические тиристорные компенсаторы. Максимальная эффективность достигается при комплексном подходе. Оптимальная стратегия предполагает комбинацию различных типов компенсации. Поперечные компенсаторы следует устанавливать на тяговых подстанциях. Продольную компенсацию целесообразно применять в отсасывающей фазе. Реализация такого решения обеспечивает значительный рост напряжения. Конкретное значение достигает 21,57 киловольт. Абсолютный прирост составляет 4,02 киловольта. Важно учитывать ограниченное влияние на некоторые параметры. В частности, не изменяются коэффициенты загрузки трансформаторов. Сохраняются прежние температурные показатели проводников. Остаются неизменными токовые характеристики подвески. Основные преимущества касаются качества электроэнергии. Наблюдается существенное снижение потерь мощности. Уменьшается степень несимметрии фазных напряжений.

# Заключение

В рамках выполнения выпускной квалификационной работы проведено исследование эффективности применения рекуперативного торможения в системах тягового электроснабжения переменного тока. Результаты исследования позволили систематизировать ключевые технологические преимущества и выявить существующие ограничения данного метода энергосбережения.

В качестве объекта исследования выбрана межподстанционная зона Анисимовка–Фридман. На основании эксплуатационных данных, предоставленных Департаментом эксплуатации локомотивов ДВЖД, выполнены тяговые расчеты для составов различной массы с учетом применения рекуперации.

Анализ работы участка в обоих направлениях движения показал, что теоретический потенциал возврата энергии в сеть составляет 23,6% от потребленного объема (1463,1 кВт·ч на поездку). Однако мониторинг фактических показателей за пятилетний период выявил существенное несоответствие - реальный уровень возврата не превышает 4,9%.

Основные выводы исследования

Все контролируемые параметры (температура нагрева проводов, токовая нагрузка, коэффициент перегрузки трансформаторов) соответствуют требованиям ПУСТЭ-97 для обоих режимов работы. Применение рекуперации сопровождается снижением минимального напряжения в сети на 1,22 кВ по сравнению с режимом тяги.

Основным ограничивающим фактором является уровень напряжения на токоприемнике электровоза.

Для оптимизации параметров сети рассмотрены различные варианты модернизации, включая:

- установку компенсирующих устройств (продольных в фазе С и поперечных на плечах подстанций);
- корректировку межпоездных интервалов;
- оптимизацию массы составов.

Реализация предложенных мероприятий позволяет:

- повысить допустимую массу состава до 8500 тонн;
- обеспечить ежемесячную экономию 589557,6 кВт·ч;
- сохранить параметры сети в нормативных пределах.

Отдельное внимание уделено анализу качества электроэнергии. Установлены существенные расхождения между фактическими гармоническими составляющими тока и нормативными значениями, что требует корректировки методик расчетов параметров электромагнитной совместимости.

## Список используемых источников


1. Бадер М.П. Ресурсо– и энергосберегающие технологии в системе тягового электроснабжения [Электронный ресурс] : информационный ресурс «Cyberleninka». URL: https://cyberleninka.ru/article/n/programmnoe-regulirovanie-napryazheniya-na-shinah-tyagovoy-podstantsii (дата обращения: 13.03.2025).

2. Бакланов А.А., Незевак В.Л., Шатохин А.П. Классификация методов оценки эффективности рекуперативного торможения [Электронный ресурс] : информационный ресурс «DisserCat». URL: https://www.dissercat.com/content/razrabotka-metodov-i-sredstv-povysheniya-effektivnosti-primeneniya-rekuperativnogo-tormozhen (дата обращения: 13.03.2025).

3. Бакланов А.А., Шиляков А.П. Энергетическая эффективность рекуперативного торможения пассажирских электровозов постоянного тока // Известия Транссиба / Омский гос. ун–т путей сообщения. – Омск. – 2019. – №2 (38). – С. 23 – 33. URL: http://izvestia-transsiba.ru/releases/95-2019-2/983-energeticheskaya-effektivnost-rekuperativnogo-tormozheniya-passazhirskikh-elektrovozov-postoyannogo-toka (дата обращения: 13.03.2025)

4. Войтиков Д. В. Автоматизация оперативного контроля состояния схемы контактной сети тягового электроснабжения железной дороги на основе методов экспертных систем // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2012. №40. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizatsiya-operativnogo-kontrolya-sostoyaniya-shemy-kontaktnoy-seti-tyagovogo-elektrosnabzheniya-zheleznoy-dorogi-na-osnove (дата обращения: 18.04.2025).

5. ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. [Электронный ресурс] :

официальное издание. URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293800/4293800558.htm (дата обращения: 23.03.2025).

6. Григорьев Н.П., Крикун А.А. Система электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока [Электронный ресурс] : информационный ресурс «Биржа патентов». URL: https://i.moscow/patents/ru2550582c1_20150510 (дата обращения: 23.03.2025).

7. Давыдов А. И. Повышение эффективности системы анализа и нормирования энергопотребления на тягу поездов : дис... канд. тех. наук : 05.22.07 / Давыдов Алексей Игоревич. – Омск, 2012. – 178 с. URL: https://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-sistemy-analiza-i-normirovaniya-energopotrebleniya-na-tyagu-poezdov (дата обращения: 26.03.2025).

8. Ефремов С.В. Концепция энергетической стратегии ОАО «РЖД» до 2050 года – отправной документ для полномасштабной разработки триады стратегий холдинга «РЖД»: энергетической, инфраструктурного развития и развития бизнеса на долгосрочный период / С.В. Ефремов // Московский экономический журнал. – 2021. – № 2. – С. 335.

9. Комплекс программ для расчетов систем тягового электроснабжения: Общее руководство пользователя.– М.: ВНИИЖТ.– 2003.– 12с. URL: https://i.twirpx.link/file/1470902/ (дата обращения: 02.04.2025).

10. Король Ю.Н., Чернов Ю.А. Внедрение единой автоматизированной системы мониторинга и учета электроэнергии на фидерах контактной сети и ЭПС - первый шаг к созданию «Интеллектуальной» сети тягового электроснабжения // Известия Транссиба. 2012. №4 (12). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-edinoy-avtomatizirovannoy-sistemy-monitoringa-i-ucheta-elektroenergii-na-fiderah-kontaktnoy-seti-i-eps-pervyy-shag-k-sozdaniyu (дата обращения: 18.04.2025).

11. Кузнецов К. Повышение эффективности применения рекуперативного торможения на участке Инская–Мариинск / К. Кузнецов. URL: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd= &ved=2ahUKEwjJ7cKB5fz–4XYHeDs/ (дата обращения: 17.02.2025).

12. Никифоров М.М. Общие принципы оценки эффективности использования рекуперативного торможения и энергии рекуперации / М.М. Никифоров // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы пятой Всероссийской научно–технической конференции с международным участием. – Омск, 2020. – С. 150.

13. Никифоров М.М., Каштанов А.Л. Принципы построения энергетических диаграмм для оценки эффективности применения рекуперативного торможения // Известия Транссиба. 2012. №2 (10). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/printsipy-postroeniya-energeticheskih-diagramm-dlya-otsenki-effektivnosti-primeneniya-rekuperativnogo-tormozheniya (дата обращения: 18.04.2025).

14. Никифоров М.М., Ушаков С.Ю., Каштанов А.Л. Технология учета расхода электроэнергии электроподвижным составом с использованием информационно–измерительных комплексов и технические требования к таким комплексам / М.М. Никифоров, С.Ю. Ушаков, А.Л. Каштанов // Известия Транссиба. – 2017 . – № 4. – С. 103. URL: http://izvestia-transsiba.ru/search-results?search=journal_search&art_surname= %D0%9D%D0%B8%D0%BA%D0%B8%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B2 (дата обращения: 18.04.2025).

15. Об утверждении методики планирования и нормирования энергии рекуперации на уровне эксплуатационного локомотивного депо: Распоряжение ОАО «РЖД» от 15 января 2013 года № 44р / Сайт «О поездах и железной дороге». URL: https://cssrzd.ru/orders/4044_rasporyazhenie_oao_rzhd_ot_15_01_2013_n_44r_doc.php (дата обращения: 16.12.2024).

16. Плотников Ю.В. Повышение эффективности управления режимами автоматического резервирования мощности в системе электроснабжения железнодорожного электроподвижного состава переменного тока / Ю.В. Плотников. – Омск, 2022. – 29 с.

17. Порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах энергоснабжения) // Утвержден Приказом Минпромэнерго России от 22.02.2007 г. N 49 – 3с. URL: https://www.elec.ru/library/direction/prikaz-minprom-22-02-2007/ (дата обращения: 16.02.2025).

18. Разработка методики оценки энергетической эффективности энергосберегающих устройств и технологий в системе тягового электроснабжения: отчет о НИР / Комяков А. А., Пашков Д. В., Каштанов А. Л. и др. – Омск : Омский гос. ун–т путей сообщения, 2016. 60 с. URL: https://www.omgups.ru/university/employees/370/khronologicheskiy-ukazatel-trudov/ (дата обращения: 10.02.2025).

19. Рыжова Е.Л. Энергосберегающие и энергоэффективные технологии транспортной отрасли // Электронный журнал естественнонаучных исследований. Том 5. №2, 2020 URL: https://naukaru.ru/ru/nauka/article/38307/view (дата обращения: 11.03.2025).

20. Саттаров Р.С. Методологические аспекты оценки эффективности поребления топливно–энергетических ресурсов в процессе функционирования железнодорожного транспорта/ Р.С. Саттаров/ Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». 2017;(1(53)):175–180. URL: https://doi.org/10.26518/2071–7296–2017–1(53)–175–180. (дата обращения: 11.04.2025).

21. Сидорова Е.А. Статистический метод нормирования энергии рекуперации / Е.А. Сидорова, А.И Давыдов // Локомотив. – 2012. – №5. – С.35–37. URL: https://omgups.ru/science/diss/soiskateli/podgornaya-svetlana-olegovna/dis_podgornaya.pdf (дата обращения: 11.04.2025).

22. Степанов И. М. Исследование электромагнитных полей в электроустановках высокого напряжения и разработка мер по снижению их интенсивности [Текст]: дис. канд. техн. наук : 05.14.12 : защищена 26.02.09 : утв. 01.03.09 / Степанов Илья Михайлович. – Новосибирск., 2009. – 234 с. URL: https://www.dissercat.com/content/issledovanie-elektromagnitnykh-polei-v-elektroustanovkakh-vysokogo-napryazheniya-i-razrabotk (дата обращения: 17.04.2025).

23. Устойчивое развитие: ОАО «РЖД» сохраняет лидирующие позиции по энергосбережению [Электронный ресурс] : официальный сайт компании «РЖД». URL: https://company.rzd.ru/ru/9386/ page/103290?id=17513 (дата обращения: 10.03.2025).

24. Черемисин В.Т., Никифоров М.М., Вильгельм А.С. Основные положения методики оценки эффективности использования энергии рекуперации // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 1. – С. 114–120. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-sostavlyayuschih-poter-elektroenergii-elektropodvizhnym-sostavom-i-ustroystvami-elektrosnabzheniya (дата обращения: 10.03.2025).

25. Черемисин В.Т., Никифоров М.М., Вильгельм А.С. Методология оценки энергетической эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации // Известия Транссиба. 2016. №1 (25). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodologiya-otsenki-energeticheskoy-effektivnosti-primeneniya-rekuperativnogo-tormozheniya-i-ispolzovaniya-energii-rekuperatsii (дата обращения: 18.04.2025).

26. Черемисин В.Т. Эффективность использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного и переменного тока:

монография / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм. – Омск, 2018. – 216 с. URL: http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2020-3(43).pdf (дата обращения: 15.02.2025).

27. Черемисин В.Т, Никифоров М.М Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава// Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч –практ конференции / Омский гос.ун–т путей сообщения. – Омск, 2012. – С. 9–15. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/novye-podhody-k-issledovaniyu-problemy-nebalansa-elektroenergii-na-tyagu-poezdov (дата обращения: 10.03.2025).

28. Черепынькин И.В., Хуснутдинов А.Н. Повышение эффективности рекуперативного торможения на электрическом транспорте / И.В. Черепынькин, А.Н. Хуснутдинов // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно–энергетическом комплексе и жилищно–коммунальном хозяйстве: Материалы IV Национальной научно–практической конференции. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. – С. 372. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-raboty-rekuperativnogo-tormozheniya-elektrovozov-peremennogo-toka-v-zone-vysokih-skorostey-dvizheniya (дата обращения: 21.03.2025).

29. Шатохин А.П. Разработка методов и средств повышения эффективности применения рекуперативного торможения на железных дорогах постоянного тока: Автореферат. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / А.П. Шатохин. – Омск, 2017. – С. 32. URL: https://www.dissercat.com/content/razrabotka-metodov-i-sredstv-povysheniya-effektivnosti-primeneniya-rekuperativnogo-tormozhen (дата обращения: 27.03.2025).

30. Advances in Regenerative Braking for Modern Trains [Electronic resource] // Railway Gazette International. – URL: https://www.railwaygazette.com/ (дата обращения: 25.03.2025).

31. Energy Efficiency in Rail Systems: Regenerative Braking Impact [Electronic resource] / Transportation Research Board (TRB). URL: https://www.trb.org/ (дата обращения: 24.03.2025).

32. Energy Recovery in Rail Transport: Best Practices [Electronic resource] / International Union of Railways (UIC). URL: https://uic.org/ (дата обращения: 04.04.2025).

33. Melrose, J. Railway Brakes and Braking Systems [Text]. – Elsevier, 20XX. – 300 p. URL: https://www.elsevier.com/ (дата обращения: 10.04.2025).

34. Regenerative Braking Systems in Railways: A Review [Electronic resource] // IEEE Xplore Digital Library. URL: https://ieeexplore.ieee.org/ (дата обращения: 17.02.2025).