

На правах рукописи



Мустафин Адель Шамильевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ СЕМЕЙСТВА «ЕРМАК»
ЗА СЧЕТ КОМПЛЕКСА ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ
РЕШЕНИЙ ПРИ ЗАВОДСКОМ РЕМОНТЕ**

Специальность 2.9.3 – «Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону
2023

Работа выполнена на кафедре «Тяговый подвижной состав» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Научный руководитель: **Зарифьян Александр Александрович**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Тяговый подвижной состав»
ФГБОУ ВО РГУПС.

Официальные оппоненты: **Шантаренко Сергей Георгиевич**,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
«Технология транспортного машиностроения и ре-
монт подвижного состава» ФГБОУ ВО «Омский гос-
ударственный университет путей сообщения»;
Шепелин Павел Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Тяговый и подвижной состав»
ФГБОУ ВО «Самарский государственный универси-
тет путей сообщения»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Петербургский государственный универ-
ситет путей сообщения Императора Александра I»

Защита состоится 23.10.2023 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационно-
го совета 44.2.005.03 на базе ФГБОУ ВО «Ростовский государственный универ-
ситет путей сообщения» по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского
Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 (читальный зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО
РГУПС и на сайте <http://www.rgups.ru>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 44.2.005.03
доктор технических наук, профессор

В.А. Финоченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В «Стратегии развития холдинга "РЖД" на период до 2030 года» и других нормативных документах сказано, что снижение удельного расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) относится к числу стратегических инициатив в локомотивном комплексе. Отмечено, что доля электроэнергии, затрачиваемой на тягу поездов, составляет около 90% от всей электрической энергии, потребляемой холдингом. Поэтому уровень эффективности использования электроэнергии на тягу оказывает ключевое влияние на величину затрат компании на закупку ТЭР, в силу чего предусматривается последовательное снижение удельного расхода электроэнергии на тягу: если уровень 2012 года принять за 100%, то к 2030 году он должен составить 94,1%.

В ответ на это требование, промышленность приступила к производству электровозов нового поколения. Выпущены первые грузовые электровозы 2(3)ЭС5С семейства «Атаман» с асинхронным тяговым приводом, которые позволили сократить затраты электроэнергии на тягу на 20%¹⁾. Это обеспечено применением новых высокоэффективных алгоритмов управления тяговым приводом (дискретно-адаптивное управление – алгоритм ДАУ, патент RU 2617857), которые в режиме реального времени приводят число работающих тяговых электродвигателей в соответствие с нагрузкой и тем самым поддерживают оптимальное значение КПД в любых условиях работы электровоза. По существу, такие алгоритмы являются элементами искусственного интеллекта в системе управления тяговыми единицами.

Необходимо отметить, что алгоритмы ДАУ могут быть применены и на находящихся в эксплуатации двух-, трёх- и четырёх секционных грузовых электровозах 2(3,4)ЭС5К семейства «Ермак». В общей сложности, на путях ОАО «РЖД» работает около пяти тысяч секций, которые последовательно поступают на средний и капитальный заводской ремонт. В ходе ремонта, кроме восстановления основных эксплуатационных характеристик, представляется целесообразным и весьма актуальным провести модернизацию, направленную на повышение энергетической эффективности, что обеспечит сокращение удельного расхода электроэнергии в соответствии с показателями, предусмотренными долгосрочными программами развития ОАО «РЖД».

Грузовые электровозы семейства «Ермак» оснащены коллекторными тяговыми двигателями, что обуславливает ряд дополнительных требований при реализации алгоритма ДАУ. Для выполнения этих требований необходимо в ходе инновационной модернизации: 1) внести изменения в программное обеспечение системы управления электровоза; 2) принять меры по обеспечению надежной работы коллекторно-щеточного узла тех ТЭД, которые временно выводятся из тяги; и 3) применить регулируемый вспомогательный привод. Эти работы могут быть выполнены при заводском ремонте с минимальными финансовыми и материальными издержками.

¹⁾ Электровозы 2ЭС5С и 3ЭС5С: асинхронная тяга под флагом России // Техника железных дорог, 2020, № 1(49). – С. 10-13.

Обозначенные проблемы решались в комплексе, что позволило получить мультипликативный эффект и сформулировать актуальные практически значимые предложения. В дальнейшем, при получении положительных итогов испытаний модернизированных локомотивов, можно будет распространить предлагаемую программу модернизации на весь парк электровозов семейства «Ермак», поступающих на заводской ремонт на предприятиях АО «Желдорремаш».

Степень разработанности проблемы. Исследования по фундаментальной проблеме энергосбережения на железнодорожном транспорте, в том числе в области электрической тяги, проводятся научными коллективами отраслевых НИИ и ВУЗов. Значительный вклад в решение названной проблемы внесли такие ученые и специалисты как В.Д. Авилов, А.Е. Алексеев, Б.А. Аржанников, А.А. Бакланов, В.А. Гапанович, А.В. Грищенко, А.М. Евстафьев, А.В. Клименко, А.Б. Косарев, А.С. Космодемьянский, В.А. Кучумов, Л.А. Мугинштейн, В.В. Никитин, О.Е. Пудовиков, Е.Н. Школьников, С.Г. Шантаренко, П.В. Шепелин, В.П. Янов и другие.

Вопрос неполного использования доступной мощности локомотива при легком профиле пути и небольшой скорости движения, для неполновесных и порожних составов, неоднократно поднимался в связи с грузовыми перевозками. Тяговый привод локомотива является многодвигательным, и для реализации тягового усилия в текущий момент времени целесообразно использовать минимально достаточное число двигателей. Различные аспекты рассмотрели А.А. Андрющенко, В.М. Бабич, Г.К. Гетьман, А.А. Зарифьян, А.В. Заручейский, А.С. Курбасов, А.Н. Крыгин, Р.В. Мурзин, О.А. Некрасов, Н.Б. Никифорова, Ю.А. Орлов, А.В. Плаксин, А.Е. Пыров, В.А. Сенаторов и др.

По регулируемой вентиляции силового электрооборудования, имеют публикации В.А. Завалко, В.В. Михайлов, В.Н. Михайловский, А.И. Орленко, В.Н. Памалюк, Н.А. Платов, И.В. Скогорев, В.Е. Чернохлебов и др.

По вопросу повышения надежности коллекторно-щеточного узла с учетом условий эксплуатации, и в частности, использования электропроводящей смазки, отметим публикации таких авторов как Ю.А. Евдокимов, О.С. Качин, В.И. Колесников, В.В. Кончиц, В.М. Коротков, В.В. Мешков, Н.К. Мышкин, В.А. Соломин, В.В. Харламов, Н.А. Чернявская и др.

Методы программно-аппаратного моделирования (ПАМ) применительно к исследованию задач управления электротехническими комплексами рассматривали Б.А. Авдеев, А.В. Вынгра, А.М. Зюзев, А.М. Костыгов, М.В. Мудров, К.Е. Нестеров, А.Н. Никонов и др.

Однако, в вышеуказанных работах недостаточно полно, в свете растущих требований к локомотивостроению, рассмотрена проблема энергетической эффективности. Именно раскрытие комплексной функциональной связанности разрабатываемых мер по обеспечению надежной работы коллекторно-щеточного узла, регулируемого вспомогательного привода и программного обеспечения системы управления локомотивом открывает перспективу повышения энергоэффективности большинства находящихся в эксплуатации электровозов, что является главным предметом в данной диссертации.

Цель и задачи исследования. Целью настоящего исследования является

разработка комплекса научно обоснованных технических решений по модернизации многодвигательного тягового привода грузовых электровозов семейства «Ермак» в ходе заводского ремонта, направленных на повышение энергетической эффективности, в результате чего будет достигнуто сокращение удельного расхода электроэнергии в режиме тяги с обеспечением надежности и работоспособности коллекторных тяговых двигателей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать возможность повышения энергоэффективности многодвигательного тягового привода путем адаптивного отключения/подключения коллекторных ТЭД в зависимости от нагрузки.

2. Сформулировать и обосновать требования, которые должны быть соблюдены при реализации алгоритма ДАУ на электровозах с коллекторными ТЭД.

3. Изучить изменение энергетической эффективности основных элементов тяговой системы электровоза (трансформатор, преобразователь, сглаживающий реактор, ТЭД и др.) в зависимости от нагрузки.

4. Разработать методологию получения аналитического описания электромеханических процессов в ТЭД с учетом потерь, записать баланс мощностей. Построить компьютерную модель процессов в пакете *SimInTech*.

5. Получить зависимость коэффициента полезного действия (КПД) и коэффициента использования мощности (КИМ) как от электрической мощности, потребляемой двигателем, так и от его полезной механической мощности.

6. Изучить степень использования установленной мощности грузовых электровозов в реальных условиях эксплуатации на Северо-Кавказской ж.д. Дать оценку энергопотребления при ведении груженых и порожних поездов при работе электровоза в штатном и энергоэффективном режимах.

7. Выполнить моделирование теплового режима тягового электрооборудования электровозов при наличии регулируемой принудительной вентиляции. Этот вопрос изучить применительно к условиям работы ТЭД в энергоэффективном режиме.

8. Рассмотреть вопрос обеспечения надежности и работоспособности коллекторно-щеточного узла ТЭД при работе в энергоэффективном режиме за счет применения электропроводящей смазки.

9. Путем применения методов программно-аппаратного моделирования, исследовать варианты подключения ТЭД и другого силового и вспомогательного оборудования при работе электровоза в энергоэффективном режиме.

Объектом исследования являются грузовые электровозы переменного тока 2(3, 4)ЭС5К семейства «Ермак», имеющие коллекторные тяговые двигатели с плавным регулированием напряжения.

Предметом исследования является изучение возможностей повышения энергетической эффективности грузовых электровозов переменного тока 2(3, 4)ЭС5К семейства «Ермак» в режиме тяги.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специ-

альности 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»:

п. 1. Эксплуатационные характеристики и параметры подвижного состава (...) Методы и средства снижения энергетических потерь (...);

п. 2. Системы и технологии эксплуатации, технического обслуживания, ремонта подвижного состава (...);

п. 4. Совершенствование подвижного состава (...) Улучшение эксплуатационных показателей подвижного состава (...);

п.15. Разработка методов компьютерного моделирования и автоматизации конструирования и проектирования подвижного состава (...).

Теоретическая значимость и научная новизна диссертационной работы заключаются:

1. В результатах исследования процессов в важнейших элементах тяговой системы электровоза (трансформатор, выпрямительно-инверторный преобразователь, сглаживающий реактор, ТЭД) и в полученных закономерностях изменения энергетической эффективности этих элементов при работе в различных режимах, что позволило создать основу для применения алгоритма дискретно-адаптивного управления (ДАУ).

2. В построении компьютерной модели электромеханических процессов в ТЭД с учетом потерь, созданной в программном пакете *SiminTech*. Достоверность результатов моделирования подтверждена путем сопоставления с данными квалификационных испытаний ТЭД НБ-514Е.

3. В установлении закономерностей изменения КИМ и КПД двигателя, которые представлены в виде зависимостей КИМ и КПД от мощности, потребляемой двигателем, что значительно облегчает реализацию алгоритма ДАУ при модернизации электровозов, так как не потребует установки дополнительных датчиков.

4. В создании программно-аппаратного симулятора, предназначенного для имитационного моделирования процессов управления многодвигательным тяговым приводом электровоза, с помощью которого исследованы варианты подключения ТЭД и другого оборудования при работе в энергоэффективном режиме.

5. В разработке методологии применения электропроводящей смазки щёток (подана заявка на изобретение), что позволяет, в рамках модернизации, увеличить ресурс и избежать повреждений коллекторных ТЭД, и тем самым обеспечить успешное применение алгоритма ДАУ на электровозах семейства «Ермак».

Практическая ценность научных результатов состоит в доказательстве возможности получения значительного экономического эффекта за счет сокращения потребления электроэнергии на тягу. Показано, что степень использования установленной мощности грузовых электровозов на линии Лихая – Крымская (профиль I-II и III типа) является неудовлетворительной: в штатном режиме работы тягового электропривода она составляет, в среднем, $\gamma_{\text{ср}} = 0,22$ для поездов массой 6300 т, и $\gamma_{\text{ср}} = 0,12$ – для поездов массой 1750 т. За счет применения алгоритма ДАУ, расчетным путем доказана возможность существенного

повышения энергетической эффективности электровозов. Оценка экономической эффективности составляет 4,78 млн. руб. в год на один электровоз (180 оборотов локомотива в год, при уровне цен 5 руб/кВт·ч).

Создан стенд (программно-аппаратный симулятор), предназначенный для имитационного моделирования процессов управления многодвигательным тяговым приводом электровоза. Исследованы варианты подключения ТЭД и другого оборудования при работе в энергоэффективном режиме.

Результаты диссертации реализованы в виде рекомендаций по проведению модернизации электровозов семейства «Ермак» в ходе заводского ремонта.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применены методы следующих научных дисциплин: теории электрических цепей (дифференциально-алгебраические уравнения процессов в силовой цепи); динамики твердого тела (дифференциальное уравнение вращательного движения якоря ТЭД); статистической обработки больших массивов экспериментальных данных (оценка энергопотребления грузовых электровозов в условиях эксплуатации); моделирования теплового режима ТЭД (при рассмотрении работы регулируемой вентиляции); трибологии (обоснование целесообразности применения электропроводящей смазки в КЩУ); программно-аппаратного моделирования для исследования работы ТЭД в штатном и энергоэффективном режимах. Применены ПК *Универсальный Механизм* и *SimInTech* отечественной разработки.

Достоверность полученных результатов обеспечена корректностью формулировок поставленных задач, надежностью примененных теоретических методов и специализированных программных пакетов, и подтверждается сопоставлением результатов, полученных путем компьютерного моделирования, с данными заводских квалификационных и стендовых испытаний. Различие по основным показателям энергоэффективности ТЭД находится в пределах долей процента, это свидетельствует об адекватности построенных компьютерных моделей и о достоверности результатов моделирования, и позволяет использовать их для оценки энергопотребления.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана методология получения аналитического описания электро-механических процессов в ТЭД с учетом потерь и баланс мощностей тягового электродвигателя в динамических и стационарных режимах работы. Создана компьютерная модель электро-механических процессов с учетом потерь. Достоверность результатов моделирования подтверждена путем сопоставления с данными квалификационных испытаний ТЭД НБ-514Е.

2. Закономерности изменения КИМ и КПД двигателя в зависимости от потребляемой мощности, что значительно облегчает реализацию алгоритма ДАУ при модернизации электровозов, так как не потребует установки дополнительных датчиков. Установлено, что КПД двигателя достигает максимальных значений при коэффициенте использования мощности в пределах $0,45 \leq \gamma \leq 1,0$.

3. Функциональная схема регулируемой системы вентиляции, предусматривающая двухскоростной режим: а) с номинальной скоростью, и б) с пониженной скоростью вращения вентилятора. При этом вентиляция работающих ТЭД осуществляется в полном объеме, а для отключаемых обеспечивается около тре-

ти номинальной подачи, чтобы обеспечить необходимое давление воздуха в корпусах двигателей.

6. Применение электропроводящей смазки щёток (прототип а.с. СССР SU 1403150), что позволит, в рамках модернизации, избежать повреждений коллекторных ТЭД и тем самым обеспечить успешное применение алгоритма ДАУ на электровозах семейства «Ермак».

7. Стенд (программно-аппаратный симулятор), предназначенный для имитационного моделирования процессов энергоэффективного управления многодвигательным тяговым приводом электровоза.

Пути реализации актуальных наиболее практически значимых результатов работы представлены в предложениях (смотри Приложение 2 к диссертации).

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных научно-практических конференциях «Транспорт: наука, образование, производство» (Транспорт-2020, 21 и 22) – Ростов н/Д, РГУПС; Всероссийской национальной научно-практической конференции «Современное развитие науки и техники» («Наука-2020»). – Ростов н/Д, РГУПС, 01-03 декабря 2020 г.; XIII International Scientific Conference «Transport Problems-2021» – Silesian University of Technology, Katowice (Poland), 28-30 июня 2021 г.; Международных научно-практических конференциях «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава». Ростов-на-Дону, РГУПС, 23-24 ноября 2021 г. и 22-23 ноября 2022 г. Работа полностью доложена и обсуждена 9 июня 2023 г. на расширенном заседании кафедры «Тяговый подвижной состав» с приглашением специалистов других кафедр ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения».

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликованы 14 научных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, и 1 статья в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных *Scopus*.

Структура и объем работы. Диссертация общим объемом 170 страниц состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 121 наименований и двух приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и указана степень разработанности темы исследования, приведены цель и задачи; научная новизна; практическая и теоретическая значимость работы; методология и методы исследования; положения, выносимые на защиту; степень достоверности и апробация полученных результатов.

Первая глава содержит анализ состояния вопроса. Проблема недоиспользования доступной мощности локомотивов при легком профиле пути и небольшой скорости движения, для неполновесных и порожних составов, неоднократно поднималась в связи с грузовыми перевозками, поскольку многие участки железных дорог характерны неравномерностью грузопотоков в четном и не-

четном направлениях. Анализ публикаций по вопросу повышения энергетической эффективности локомотивов за счет изменения числа работающих тяговых электродвигателей в зависимости от нагрузки показал, что такой подход позволяет значительно сократить удельный расход электроэнергии на тягу. Вместе с тем, для электровозов с коллекторными ТЭД необходимо предусмотреть специальные меры по обеспечению их надежной работы.

Сформулированы цель и задачи исследования. Грузовые электровозы семейства «Ермак» оснащены коллекторными тяговыми двигателями, что обуславливает ряд дополнительных требований при реализации алгоритма ДАУ. Для выполнения этих требований, в ходе модернизации необходимо: 1) внести ряд изменений в программное обеспечение системы управления электровоза; 2) принять меры по обеспечению надежной работы коллекторно-щеточного узла тех ТЭД, которые временно выводятся из тяги; и 3) применить регулируемый вспомогательный привод.

Во второй главе выполнен анализ процессов, протекающих в основных элементах тяговой системы электровоза.

Выпрямительная цепь состоит из трансформатора ОНДЦЭ-4350/25, преобразователя ВИП-4000М и сглаживающего реактора РС-19-01. Изучено изменение энергетической эффективности этих элементов при работе в различных режимах. Получено, что общий характер изменения КПД в зависимости от тока нагрузки в целом совпадает с приведенным в специальной технической литературе: КПД возрастает при увеличении тока, его наибольшее значение достигается при силе тока I_d в пределах $(0,45 \dots 1,0) I_{ном}$, затем КПД уменьшается.

Тяговый двигатель пульсирующего тока серии НБ-514 выполнен для опорно-осевого подвешивания и представляет собой шестиполосную компенсированную электрическую машину. Изучению процессов, протекающих в коллекторных тяговых электродвигателях, посвящено значительное количество публикаций. ТЭД является ключевым элементом тягового привода, он представляет собой электромеханический преобразователь, на вход которого поступает электрическая мощность $P_1 = P_{эл}$, тогда как на выходе получаем механическую мощность $P_2 = P_{мех}$, которая затем через редуктор передается на колесную пару. В процессе преобразования, часть потребляемой мощности ΔP (потери) расходуется непроизводительно, а именно, на нагрев проводников и других элементов конструкции двигателя, преодоление трения в подшипниках, и прочее. Баланс мощностей может быть записан в следующем виде

$$P_1 = P_2 + \Delta P, \quad (1)$$

где $P_1 = P_{эл} = ui_{я}$; $P_2 = P_{мех} = M_{д} \omega$.

Поставим задачу расчетного определения КПД тягового электродвигателя в зависимости от потребляемой им мощности P_1 . Такая постановка вопроса связана с тем, что при реализации алгоритма ДАУ в процессе модернизации электровоза при заводском ремонте, получение мгновенного значения полезной мощности P_2 вызывает существенные затруднения, так как требует установки дополнительного оборудования (датчика момента) на каждом ТЭД. В то же время, определение мгновенного значения потребляемой двигателем электри-

ческой мощности P_1 не вызывает затруднений, так как значения напряжения u и тока $i_{я}$ каждого ТЭД поступают в МСУД в штатном варианте комплектации.

Исходя из схемы замещения ТЭД НБ-514Е, получены следующие уравнения процессов в электрических цепях (напряжение u является управляющим воздействием):

$$i_{я} = i_{в} + i_{пш}, \quad (2)$$

$$u = C_m \Phi(i_{в}) \omega + L_{я} \frac{di_{я}}{dt} + R_{я} i_{я} + L_{в} \frac{di_{в}}{dt} + R_{в} i_{в}, \quad (3)$$

$$L_{в} \frac{di_{в}}{dt} = R_{пш} i_{пш} - R_{в} i_{в}. \quad (4)$$

К ним нужно добавить дифференциальное уравнение вращения якоря:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{д} - M_{нагр} = (C_m \Phi(i_{в}) i_{я} - \Delta M^*) - M_{нагр}. \quad (5)$$

Вращающий момент на валу двигателя $M_{д}$ равен разности электромагнитного момента $M_{эм}$ и момента потерь, приведенного к валу двигателя ΔM^* :

$$M_{д} = M_{эм} - \Delta M^*, \quad (6)$$

здесь электромагнитный момент на валу ТЭД, Н·м, равен

$$M_{эм} = C_m \Phi(I_{в}) I_{я}, \quad (7)$$

а момент потерь, приведенный к валу двигателя

$$\Delta M^* = \Delta P^* / \omega = (\Delta P_{маг} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб} + \Delta P_{щ}) / \omega \quad (8)$$

представляет собой уменьшение момента, обусловленное наличием потерь мощности (магнитных, механических, добавочных, потерь в щеточных контактах), которые вычислялись согласно формулам, известным из литературы, с учетом корректировок, учитывающих результаты квалификационных испытаний ТЭД НБ-514Е.

В уравнениях (2) – (8) приняты следующие обозначения: u – питающее напряжение; $i_{я}$ – ток в якорной цепи; $i_{в}$ – ток в обмотке возбуждения; $i_{пш}$ – ток в цепи резистора постоянной шунтировки; $i_{оп}$ – ток в цепи ослабления поля; $E = C_m \Phi(i_{в}) \omega$ – противо-ЭДС якоря; $L_{я}$, $R_{я}$ – индуктивность и сопротивление якорной цепи; $L_{в}$, $R_{в}$ – индуктивность и сопротивление обмотки возбуждения; $L_{оп}$, $R_{оп}$ – индуктивность и сопротивление цепи ослабления поля; $R_{пш}$ – сопротивление постоянной шунтировки; $\omega = 2\pi n / 60$ – угловая скорость вращения якоря, рад/с; J – момент инерции якоря, кг·м²; $C_m = \frac{pN}{2a\pi}$ – машинная постоянная, Н·м/(Вб·А); $M_{нагр}$ – момент полезной нагрузки, Нм, вычисляется согласно ПТР как функция скорости, массы и других параметров движения поезда.

Уравнения (2) – (5) лежат в основе компьютерной модели динамических электромеханических процессов, протекающих в силовых цепях (рисунок 1). Модель построена в среде *SimInTech*, с её помощью было проведено исследование электромеханических процессов в коллекторном тяговом двигателе с учетом потерь. В процессе моделирования, в зависимости от напряжения, задаваемого с контроллера машиниста, рассчитываются и отображаются текущие зна-

чения тока, частоты вращения, активного момента, мощности и других параметров.

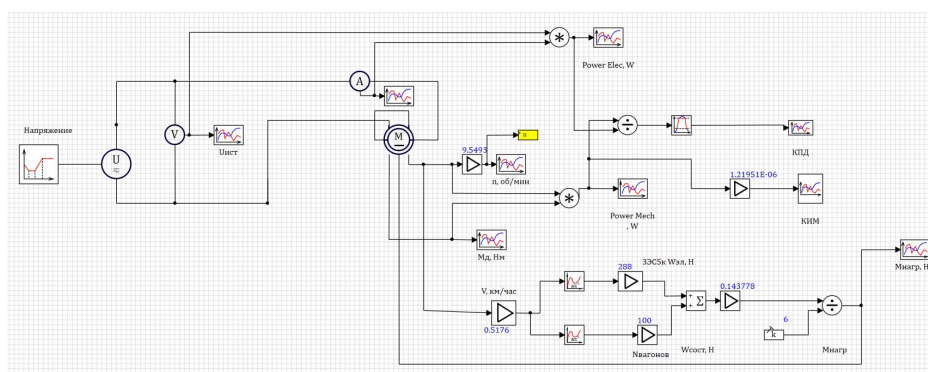


Рисунок 1 – Модель для исследования электромеханических процессов в ТЭД с учетом потерь

Модель состоит из следующих блоков: а) блок формирования напряжения; б) блок формирования момента полезной нагрузки; в) блок формирования выходных показателей (мощность, КПД и т.п.); г) блок М (субмодель ТЭД).

Целью первой серии расчетов являлось подтверждение достоверности результатов, полученных путем компьютерного моделирования, путем сравнения с характеристиками, полученными при квалификационных испытаниях ТЭД. Сопоставляя данные технической документации, с одной стороны, и результаты компьютерного моделирования с другой, видим их качественное и количественное совпадение. При работе в часовом режиме, результаты приведены в таблице 1. В частности, значения КПД различаются на 0,15%.

Таблица 1 – Сопоставление данных технической документации и результатов компьютерного моделирования

$U = 1000 \text{ В}$	$I_a, \text{ А}$	$n, \text{ об/мин}$	$\omega, \text{ 1/с}$	$M_d, \text{ Нм}$	$P_1, \text{ кВт}$	$P_2, \text{ кВт}$	КПД
Часовой режим (тех. документация)	870	920	96,342	8511	870	820	0,9425
Компьютерное моделирование	866	917,37	96,067	8484	866	815,03	0,9411
Относительная погрешность $\Delta_{отн}, \%$	0,46	0,29	0,29	0,32	0,46	0,6	0,15

Далее, была получена зависимость КПД двигателя НБ-514Е от потребляемой мощности P_1 (рисунок 2) при полном поле возбуждения. Как следует из рисунка 1, максимальное значение КПД достигается при $P_1 \geq 350 \text{ кВт}$, то есть при значениях КИМ, превышающих 0,45 (принято, что мощность ТЭД в номинальном режиме равна его часовой мощности 820 кВт).

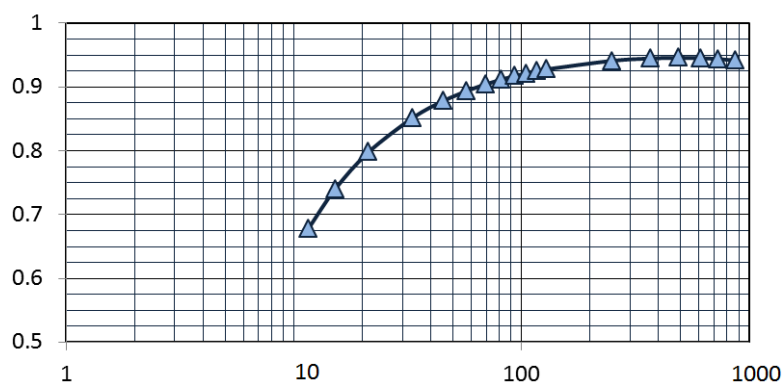


Рисунок 2 – Зависимость КПД двигателя от потребляемой мощности P_1 , кВт (логарифмическая шкала)

Суммарную мощность, потребляемую тяговыми двигателями электроваза, обозначим как

$$P_{1\Sigma} = N_{\text{тэд}} \cdot P_1, \quad (9)$$

где $N_{\text{тэд}}$ – число работающих ТЭД, P_1 – электрическая мощность, потребляемая одним ТЭД.

В случае, когда электроваз работает с неполной нагрузкой, алгоритм отключает один или несколько ТЭД (то есть уменьшает $N_{\text{тэд}}$), при этом P_1 возрастает, поскольку скорость и суммарная потребляемая мощность $P_{1\Sigma}$ должны оставаться постоянными во время переключения ТЭД. Процесс отключения продолжается до тех пор, пока значение КИМ каждого из оставшихся в тяге двигателей не превысит 0,45. Если же нагрузка растет, то отключенные ранее ТЭД возвращаются в тягу. В результате, независимо от величины нагрузки, тяговый привод электроваза будет работать с максимально возможной энергетической эффективностью.

В третьей главе представлен анализ использования установленной мощности и энергопотребления грузовых электровазов при работе в реальных условиях и дано обоснование возможности сокращения расхода электрической энергии на тягу поездов при работе с неполной нагрузкой за счет применения дискретно-адаптивного управления тягой.

Рассмотрена работа грузовых электровазов на маршруте Лихая – Крымская (489 км) и обратно. Профиль от Лихой до Крымской может быть отнесен к I-II и III типам, исключение составляют 30 км в отрогах Восточного Донбасса. В прямом направлении, масса состава 6300 т (гружёный), в обратном – 1750 т (порожний). Изменение скорости принималось согласно записям тягово-энергетической лаборатории (ТЭЛ) производства РГУПС.

Компьютерная модель движения поезда была создана в программном комплексе «*Универсальный Механизм*», модуль «Train», воспроизводились как штатный режим работы (все ТЭД постоянно в тяге), так и энергоэффективный. Получено, что степень использования установленной мощности грузовых электровазов на линии Лихая – Крымская – Лихая является неудовлетворительной: в штатном режиме работы тягового электропривода она составляет, в среднем 22% для поездов массой 6300 т, и 12% – для поездов массой 1750 т.

В таблице 2 представлены полученные оценки основных параметров энергопотребления в штатном и энергоэффективном режимах (на один электровоз ЗЭС5К).

Следовательно, при работе на линии Лихая – Крымская – Лихая потребление электрической энергии одним электровозом, при 180 оборотах локомотива за год, сократится суммарно на $477540 + 478800 = 956340$ кВт·ч, то есть на 11,3% по сравнению с годовым расходом при работе электровоза в штатном варианте.

В итоге получаем, что при работе на линии Лихая – Крымская – Лихая и отпускной цене на электроэнергию на уровне 5 руб/кВт·ч, годовая экономия составит 4,78 млн. руб. на один электровоз.

Таблица 2 – Оценки основных параметров энергопотребления

Прямое направление, 6300 т	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч / изм	Расход электроэнергии за поездку, кВт·ч	Сокращение расхода электроэнергии за год, кВт·ч
Штатный режим	91	28034	477540
Энергоэффективный режим	82	25381	

Обратное направление, 1750 т	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч / изм	Расход электроэнергии за поездку, кВт·ч	Сокращение расхода электроэнергии за год, кВт·ч
Штатный режим	223	19083	478800
Энергоэффективный режим	192	16423	

В четвертой главе отмечено, что пониженный расход охлаждающего воздуха является фактором энергосбережения в общем потреблении электровоза. Поэтому вопрос моделирования теплового состояния тягового оборудования электровоза на основе информации о токе в якорной цепи и о производительности вентиляторов является весьма актуальным.

При работе в энергоэффективном режиме часть двигателей временно выводится из режима тяги. Поэтому целесообразно на это время переводить соответствующие мотор-вентиляторы на пониженную частоту питания, что даст дополнительную экономию энергии. Перевод на пониженную частоту должен производиться только после понижения температуры ниже допустимого предела (применяется изоляция класса F). При этом, должно обеспечиваться необходимое давление воздуха в корпусах двигателей во избежание попадания пыли, влаги, и т.п.

Построена модель тепловых режимов элементов тяговой цепи электровоза на основе уравнения теплового баланса. Термическая постоянная времени

нагрева рассчитана с учетом фактической производительности вентиляторов охлаждения, а установившаяся температура перегрева – с учетом мощности тепловыделения, в функции тока и потерь тепла, зависящих от производительности вентиляторов. Разработана методика определения текущей температуры перегрева силовых элементов тяговой цепи вследствие изменения тока якоря и производительности вентиляторов.

Предложена функциональная схема регулируемой системы вентиляции, предусматривающая двухскоростной режим: с номинальной скоростью и с пониженной скоростью вращения мотор-вентиляторов. При этом вентиляция работающих ТЭД осуществляется в полном объеме, а для отключенных – обеспечивается около трети номинальной подачи, чтобы обеспечить необходимое давление воздуха в корпусах двигателей.

В настоящее время изготовлена и прошла испытания опытная установка, обеспечивающая двухскоростную работу мотор-вентиляторов.

В пятой главе отмечено, что для коллекторных ТЭД «слабым звеном» является скользящий контакт щетка – коллектор в силовой электрической цепи, через который проходит ток силой в сотни ампер. Более 30% отказов локомотивов приходится на тяговые электродвигатели, причем более 15% из них составляют отказы по скользящему контакту. Щётки требуют периодической замены, соответствующая операция является трудоемкой и социально малопривлекательной для технического персонала.

При работе ТЭД в режиме тяги, на поверхности коллектора образуется политура – контактная пленка из окиси меди с примесью частиц щеточного материала, которая имеет высокую электропроводность и низкий коэффициент трения. Если же ТЭД на длительное время выведен из тяги, то есть когда контакт обесточен, то политура разрушается, что приводит к перегреву с последующим выходом двигателя из строя. При работе в энергоэффективном режиме, ТЭД периодически отключаются, поэтому должны быть приняты особые меры по защите коллекторно-щеточного узла.

Одним из подходов, существенно улучшающих условия работы скользящего контакта, является применение электропроводящей смазки (прототип а.с. СССР SU 1403150), которая закладывается в разрез щётки.

Изготовлена опытная партия электропроводящей смазки. Проведены испытания на заводском нагрузочном стенде (рисунок 3), которые состояли из двух этапов:

1) на первом этапе ТЭД испытывался на холостом ходу без нагрузки и без обдува в течение 40 минут. Было установлено, что на коллекторе образовалась политура светло-орехового цвета. Это свидетельствует о формировании на рабочей поверхности коллектора электропроводящего слоя с низким коэффициентом трения. Засорения межламельных промежутков не обнаружено. Следовательно, применение электропроводящей смазки обеспечивает надежность и работоспособность КЩУ тягового двигателя *без нагрузки* на время до 40 минут;



Рисунок 3 – Испытания на нагрузочном стенде Ростовского-на-Дону ЭРЗ

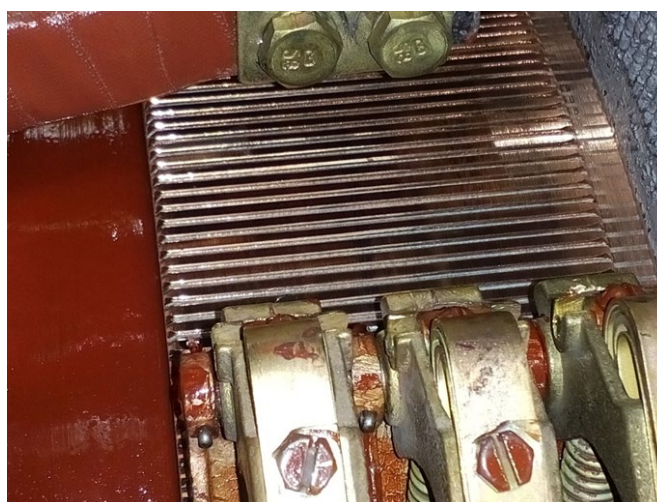


Рисунок 4 – Поверхность коллектора ТЭД после испытаний

2) на втором этапе, ТЭД испытывался под нагрузкой согласно заводской карте технологического процесса № РЭРЗ-07.50107.00006. Было установлено, что при номинальной силе тока 900 А и температуре якоря 85°C, замеренной пирометром TemPro 550 при температуре охлаждающего воздуха 23°C, искрение при коммутационных режимах испытаний отсутствовало. Осмотр коллектора после остановки двигателя показал наличие пленки (политуры) светло-орехового цвета и отсутствие засорения межламельных промежутков. Таким образом, при работе *под полной нагрузкой* надежность и работоспособность КЩУ тягового двигателя со щётками с заложенной смазкой также обеспечены.

На рисунке 4 показан внешний вид поверхности коллектора ТЭД после испытаний. По итогам испытаний сделан вывод о том, что предлагаемая смазка обеспечивает нормальные условия для КЩУ как под нагрузкой, так и на холостом ходу в обесточенном состоянии на время до 40 минут.

В шестой главе показано применение программно-аппаратного модели-

рования для исследования работы электровоза в энергоэффективном режиме.

Программно-аппаратный симулятор тягового электропривода выполнен на базе персонального компьютера, соединенного с джойстиком (рисунок 5). Его основой являются компьютерная модель электромеханических процессов, описание которой дано в главе 2, и алгоритм энергоэффективного управления ДАУ, представляющего собой элемент искусственного интеллекта в системе управления тяговой единицей. В отдельном корпусе находится плата на базе микроконтроллера STM32F405RGT6.

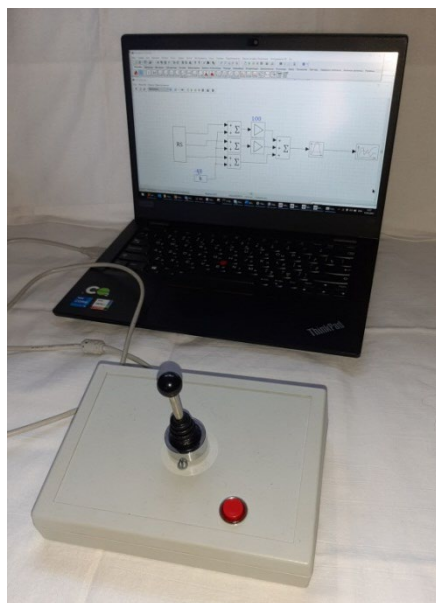


Рисунок 5 – Программно-аппаратный симулятор

Изменение числа работающих тяговых двигателей $N_{тэд}$ задается клавишами «+» и «-», управляющее воздействие (изменение напряжения) задается углом наклона рукоятки (контроллер машиниста). Красная кнопка на пульте реализует сброс.

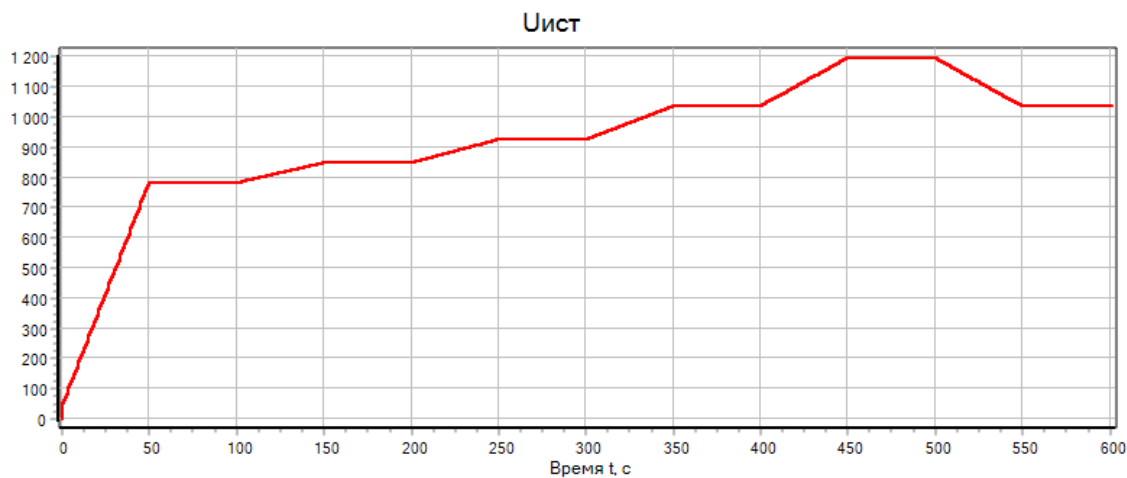
Приведем результаты расчета, целью которого являлась проверка адекватности получаемых результатов (напряжение, ток, частота вращения, моменты, мощности, и т.д.), которые получаются при реализации управляющих воздействий машиниста (таблица 3).

Таблица 3 – Изменение управляющих воздействий и параметров движения

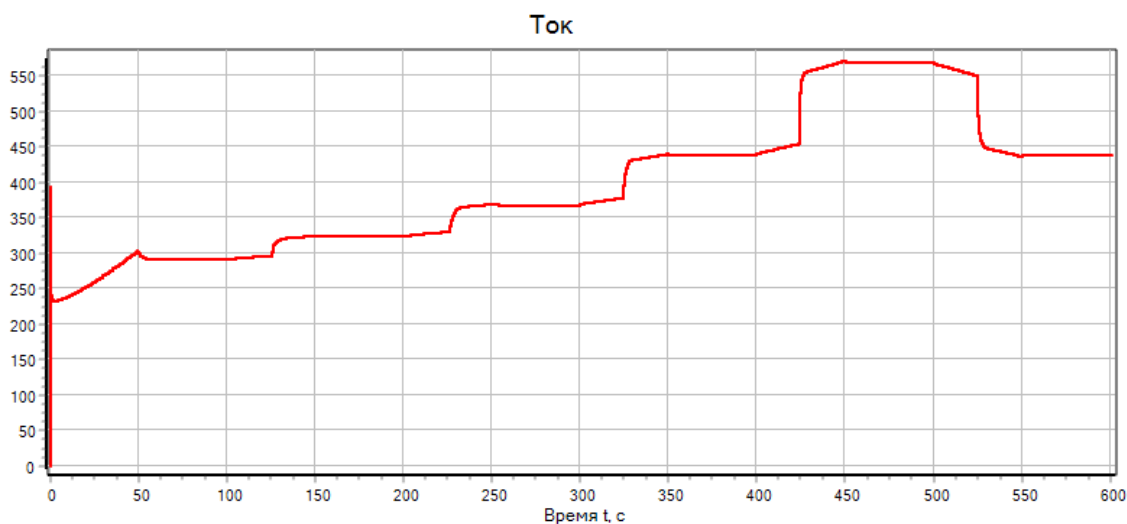
t, c	0	50	100	150	200	250	300
U, B	40	783	783	850	850	927	927
$N_{тэд}$	12		10		8		

t, c	350	400	450	500	550	600
U, B	1038	1038	1198	1198	1038	1038
$N_{тэд}$	6		4		6	

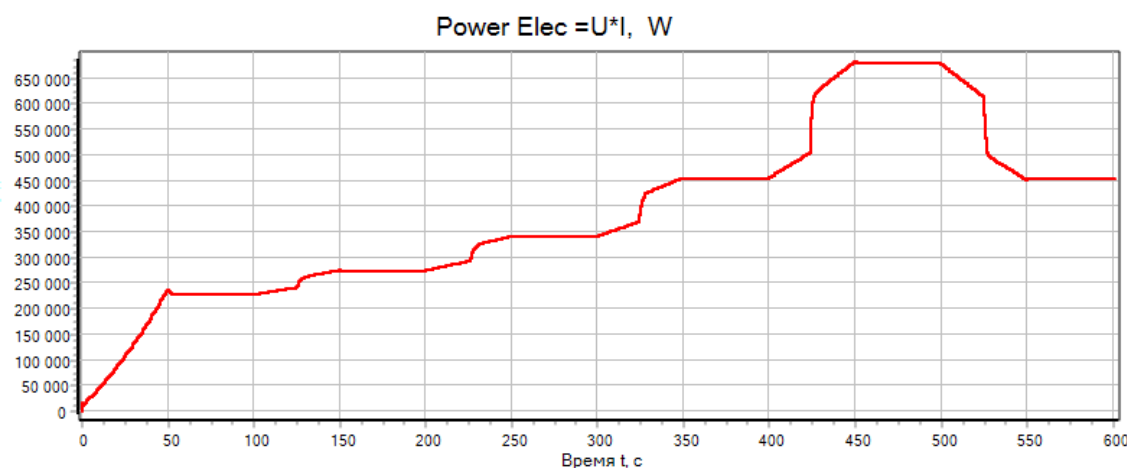
На рисунке 6 показано изменение: а) напряжения, В, б) тока, А, и в) электрической мощности, Вт, потребляемой одним ТЭД, с течением времени.



а)



б)

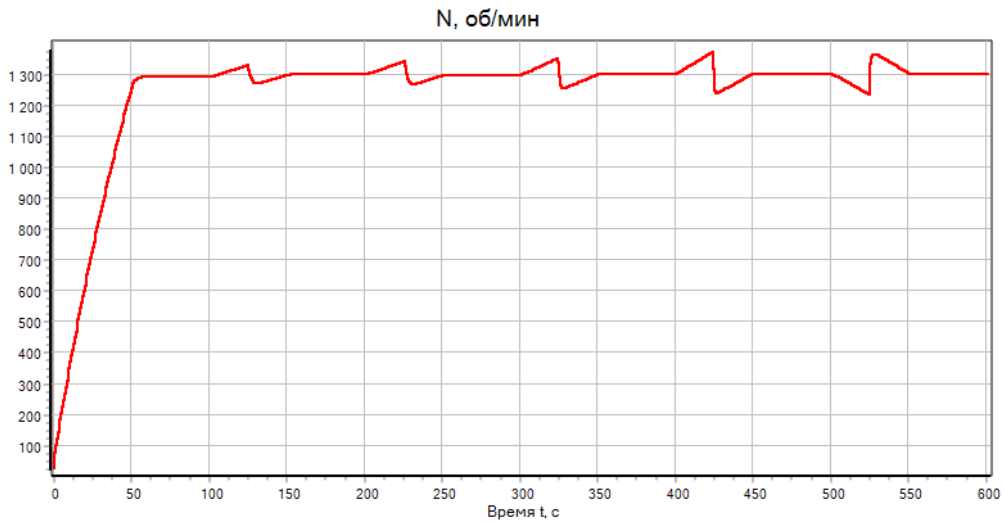


в)

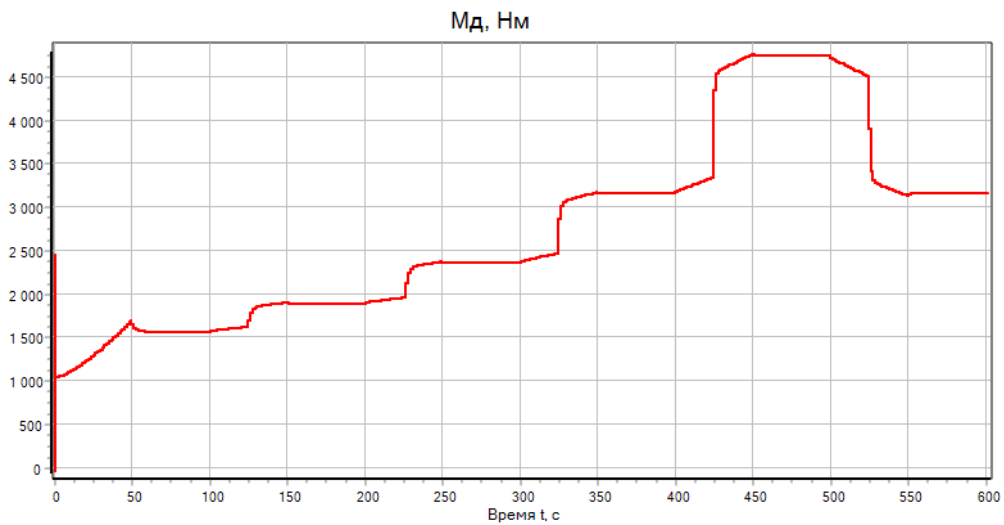
Рисунок 6 – Изменение: а) напряжения, В, б) тока, А, и в) электрической мощности P_1 , Вт, потребляемой одним ТЭД

На рисунке 7 показано изменение: *a)* частоты вращения n , об/мин, *б)* момента на валу M_d , Нм, и *в)* механической мощности, Вт, на валу одного ТЭД, с течением времени.

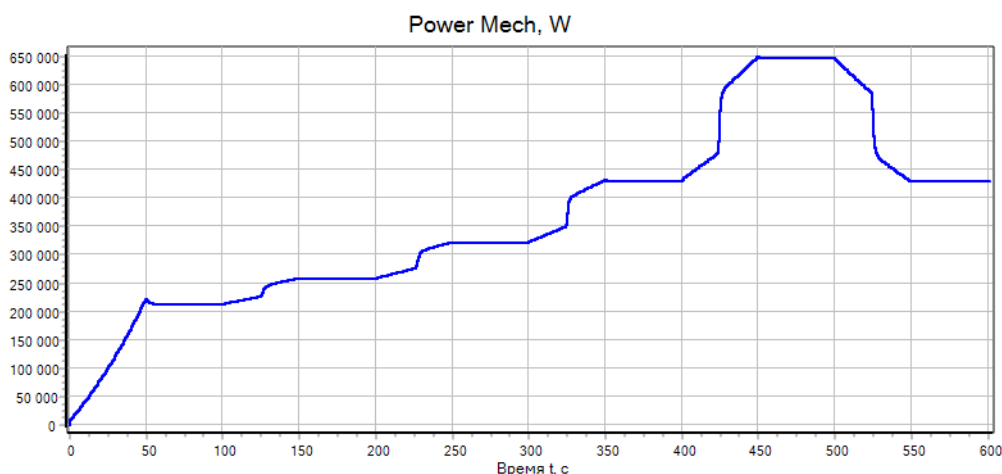
Обратим внимание на тот факт, что при выбранном варианте управления частота вращения ТЭД остается постоянной (смотри рис. 7 *a)*), ей соответствует скорость электровоза 70,4 км/ч.



a)



б)



в)

Рисунок 7 – Изменение: а) частоты вращения n , об/мин, б) момента на валу M_d , Нм, и в) механической мощности, Вт, на валу одного ТЭД, с течением времени.

В данном расчете мощность $P_{1\Sigma}$ остается постоянной, равной 2730 кВт. На рисунке 8 показано полученное изменение коэффициента использования мощности γ по мере реализации управляющих воздействий.

Таким образом получаем, что:

- 1) при $t = 50 \dots 100$ с, $N_{\text{ТЭД}} = 12$, $U = 783$ В, $\gamma = 0,259$;
- 2) при $t = 150 \dots 200$ с, $N_{\text{ТЭД}} = 10$, $U = 850$ В, $\gamma = 0,314$;
- 3) при $t = 250 \dots 300$ с, $N_{\text{ТЭД}} = 8$, $U = 927$ В, $\gamma = 0,392$;
- 4) при $t = 350 \dots 400$ с, $N_{\text{ТЭД}} = 6$, $U = 1038$ В, $\gamma = 0,525$;
- 5) при $t = 450 \dots 500$ с, $N_{\text{ТЭД}} = 4$, $U = 1198$ В, $\gamma = 0,790$;
- 6) при $t = 550 \dots 600$ с, $N_{\text{ТЭД}} = 6$, $U = 1038$ В, $\gamma = 0,525$.

Как видим, энергоэффективный режим ($0,45 \leq \gamma \leq 1,0$) имеет место в последних трёх случаях, когда число работающих ТЭД равно 6 или 4.

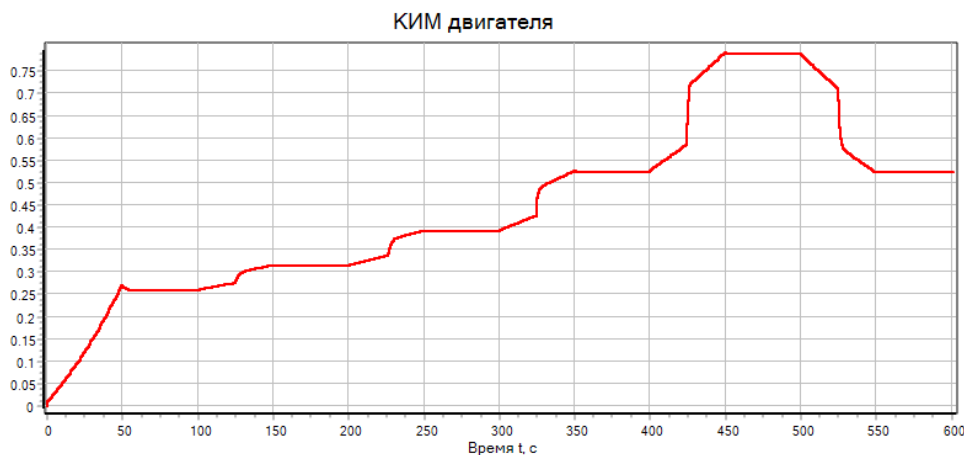


Рисунок 8 – Изменение коэффициента использования мощности ТЭД

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан комплекс научно обоснованных технических решений по модернизации многодвигательного тягового привода грузовых электровозов семейства «Ермак» в ходе заводского ремонта, направленных на повышение энергетической эффективности. Сформулированы предложения по их реализации (смотри Приложение 2 к диссертации). В результате будет достигнуто сокращение удельного расхода электроэнергии в режиме тяги с обеспечением надежности и работоспособности коллекторных тяговых двигателей.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. На основании изучения литературных источников и накопленного практического опыта, сделан вывод о практической возможности повышения энергетической эффективности многодвигательного тягового привода путем отключения/подключения тяговых двигателей в зависимости от нагрузки. За основу принят алгоритм ДАУ – способ управления энергетической эффективностью электровоза при работе с неполной нагрузкой (патент RU 2617857). Сформулированы требования, которые должны быть соблюдены при реализации алгоритма ДАУ на электровозах с коллекторными ТЭД.

2. Установлены закономерности изменения энергетической эффективности основных элементов тяговой системы электровоза (трансформатор, преобразователь, ТЭД и др.) в переменных режимах работы.

3. Получена система уравнений электромеханических процессов в ТЭД с учетом потерь, записан баланс мощностей. Построена компьютерная модель процессов в пакете *SimInTech*. Полученные расчетные значения основных параметров работы ТЭД практически совпадают с результатами квалификационных испытаний, что позволяет говорить об адекватности модели.

4. Установлены закономерности изменения КПД и КИМ от электрической мощности, потребляемой двигателем. Найденная закономерность изменения КПД от потребляемой мощности имеет принципиальное значение, так как позволяет вычислять текущее значение основного критерия, используемого алгоритмом ДАУ, при помощи штатных сигналов системы управления электровозом и не требует установки дополнительного оборудования в ходе модернизации.

5. Изучена степень использования установленной мощности грузовых электровозов в реальных условиях эксплуатации на Северо-Кавказской ж.д. Дана оценка энергопотребления при работе в штатном и энергоэффективном режимах груженых и порожних поездов на участке Лихая – Крымская в прямом и обратном направлении. После модернизации, для груженых поездов 6300 т, при работе в энергоэффективном режиме, расчетный удельный расход электроэнергии уменьшается в среднем на 9,5%. Для порожних поездов 1750 т, при работе в энергоэффективном режиме, расчетный удельный расход электроэнергии сократится на 14%,

6. Выполнено моделирование теплового режима тягового электрообору-

дования электровозов при наличии регулируемой принудительной вентиляции. Этот вопрос изучен применительно к условиям работы ТЭД в энергоэффективном режиме.

7. Изучен вопрос обеспечения надежности и работоспособности коллекторно-щеточного узла ТЭД при работе в энергоэффективном режиме за счет применения электропроводящей смазки. Сформулированы практические рекомендации. Подана заявка на патент.

8. Путем применения методов программно-аппаратного моделирования, предложены варианты подключения ТЭД и другого силового и вспомогательного оборудования при работе электровоза в энергоэффективном режиме. В том числе, программно ограничено время нахождения ТЭД в выключенном состоянии, что обеспечивает надежность работы КЩУ.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме диссертации. Развитое в настоящей работе научное направление и комплекс инновационных технических решений по повышению энергетической эффективности являются перспективными и могут быть распространены на другие серии находящихся в эксплуатации магистральных электровозов с коллекторными тяговыми электродвигателями. Наряду с этим, предложения по обеспечению надежности и работоспособности коллекторно-щеточного узла применимы для тяговых двигателей и тяговых генераторов постоянного тока тепловозов. Реализация предлагаемых мер может быть выполнена в ходе заводского ремонта.

Это обеспечит существенную экономию топливно-энергетических ресурсов и сокращение издержек ОАО «РЖД» на их приобретение.

Основные публикации по теме диссертации

Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Зарифьян, А.А. Моделирование теплового режима тягового электрооборудования электровозов при наличии регулируемой принудительной вентиляции / А.А. Зарифьян, В.В. Михайлов, **А.Ш. Мустафин**, Н.Р. Тептиков // Электроника и электрооборудование транспорта – 2019. – № 3. – С. 17-21. – eLIBRARY ID: 38583544.

2. Зарифьян, А.А. Анализ использования мощности грузовых электровозов и возможность сокращения энергопотребления за счет модернизации при заводском ремонте / А.А. Зарифьян, **А.Ш. Мустафин** // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения – 2021. – № 1(81). – С. 20-29. – eLIBRARY ID: 45411495.

3. Зарифьян, А.А. Изучение электромеханических процессов в коллекторном тяговом двигателе с учетом потерь / А.А. Зарифьян, **А.Ш. Мустафин** // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения - 2021. - № 3(83). – С. 81-89. - eLIBRARY ID: 46648168.

4. **Мустафин, А.Ш.** Повышение энергетической эффективности грузовых электровозов семейства «Ермак» путем модернизации при заводском ремонте // Бюллетень результатов научных исследований – 2022. – № 2 – С. 75 – 91. – DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-75-91.

5. **Мустафин, А.Ш.** Особенности практической реализации энергосбе-

регающих алгоритмов управления коллекторным тяговым приводом грузовых электровозов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 2. – С. 29–41. – DOI 10.46973/0201–727X_2022_2_29

Научные работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе Scopus

6. **Mustafin, A.** Capacity utilization level of freight electric locomotives and evaluation of expenses reduction on consumed energy due to modernization / **A. Mustafin, A. Shapshal, E. Valentseva, A. Zarifyan** // *Transport problems* – 2021, №4 – с. 5 – 14. DOI: 10.21307/tp-2021-055

Публикации в других изданиях

7. **Мустафин, А.Ш.** Освоение среднего и капитального ремонта грузовых электровозов семейства «Ермак» на Ростовском-на-Дону электровозоремонтном заводе // *Транспорт: наука, образование, производство: труды Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 25–27 апреля 2022 года.* – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2022. – С. 100-103. – EDN RNAXGD

8. Веригин, О.С. Компьютерное моделирование взаимодействия МСУД и ВИП в режиме тяги / О.С. Веригин, А.А. Зарифьян, **А.Ш. Мустафин**, Н.В. Романченко // *Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство»*, Том 3. Технические науки. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2020. – с. 289-293.

9. Зарифьян, А. А. Компьютерное моделирование процессов, протекающих в выпрямительно-инверторном преобразователе в режиме тяги / А.А. Зарифьян, **А.Ш. Мустафин**, Т.З. Талахадзе // *Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство»*, Том 2. Технические науки. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2020. – С. 99 – 103.

10. Зарифьян, А.А. Программно-аппаратное моделирование электромеханических процессов в тяговом приводе электровоза при поосном регулировании силы тяги / А.А. Зарифьян, **А.Ш. Мустафин**, Т.З. Талахадзе // *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения.* – 2020. – № 4(53). – С. 48-52.

11. Зарифьян, А.А. О возможности повышения энергетической эффективности грузовых электровозов семейства «Ермак» / А.А. Зарифьян, О.С. Веригин, **А.Ш. Мустафин**, Т.З. Талахадзе // *Всероссийская национальная научно-практическая конференция «Современное развитие науки и техники» («Наука-2020»)*. Ростов н/Д, 01 - 03 декабря 2020 г.– С. 114-118.

12. Using the capacity of freight mainline electric locomotives and possibility to reduce energy consumption due to modernization / **A. Mustafin, A. Shapshal, E. Valentseva, A. Zarifyan,** // *Proceedings of XIII International Scientific Conference «Transport Problems-2021»* – Silesian University of Technology - Katowice (Poland), 28-30.06.2021. – P. 855-865.

13. **Мустафин, А.Ш.** О возможности применения энергоэффективных технологий на грузовых электровозах с коллекторным тяговым приводом / *Труды РГУПС*, 2021, № 4 (57) – С. 64 – 69.

14. **Мустафин, А.Ш.** Изучение работы электровоза в энергоэффективном режиме с применением программно-аппаратного моделирования // Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава», 22-23 ноября 2022 г., РГУПС // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 4(61). – С. 84-88. – EDN IESFVB.

Личный вклад соискателя. Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. Публикации [4-5, 7, 13-14] подготовлены единолично. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве: [1-3, 6, 8-12] – построение расчетных моделей, проведение экспериментальных исследований, анализ и обобщение полученных результатов.

Мустафин Адель Шамильевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ
СЕМЕЙСТВА «ЕРМАК» ЗА СЧЕТ КОМПЛЕКСА ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ
РЕШЕНИЙ ПРИ ЗАВОДСКОМ РЕМОНТЕ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано к печати . Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,4.
Тираж 100 экз. Заказ № .

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

Адрес университета: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 2