

На правах рукописи



Гребенников Николай Вячеславович

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ ЛОКОМОТИВОВ С
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ МОЩНОСТИ**

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора 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 консультант: **Зарифьян Александр Александрович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО РГУПС, кафедра «Тяговый подвижной состав»,
профессор

Официальные оппоненты: **Овчаренко Сергей Михайлович**
доктор технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждения высшего образования «Омский государственный
университет путей сообщения», ректор, профессор кафедры
«Локомотивы»

Грищенко Александр Васильевич
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждения высшего образования «Петербургский
государственный университет путей сообщения Императора
Александра I», профессор кафедры «Локомотивы и
локомотивное хозяйство»

Гордеев Игорь Петрович
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Самарский
государственный университет путей сообщения», профессор
кафедры «Тяговый подвижной состав»

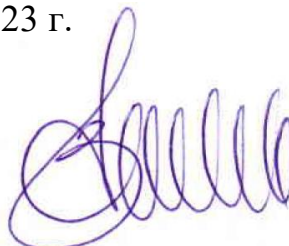
Ведущая организация: федеральное государственное автономное
образовательное учреждения высшего образования «Российский университет
транспорта» (РУТ (МИИТ))

Защита состоится «24» октября 2023 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета 44.2.005.03 на базе ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 (читальный зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 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. Рост и развитие экономики Российской Федерации является возможным при наличии эффективной и надежной транспортной системы. По данным Федеральной службы государственной статистики на железнодорожный транспорт приходится 47,2 % грузооборота страны, с учетом грузооборота по трубопроводу (2020 г.). Среди транспортных средств, грузооборот железнодорожного транспорта составляет 86,8 %, что определяет необходимость обеспечения перевозочного процесса железнодорожным транспортом с минимальными расходами энергетических ресурсов страны. О необходимости повышения энергетической эффективности перевозок указано в Федеральном законе от 23.11.2009 г. №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», в том числе предусмотрен контроль энергоэффективности оборудования, производимого на территории РФ, с присвоением ему класса энергетической эффективности в зависимости от значений показателей энергоэффективности, определяемых в ходе энергетических обследований энергопотребляющего оборудования.

Для ОАО «РЖД» вопросы энергосбережения и энергоэффективности особенно актуальны, что подтверждается утвержденными энергетическими стратегиями развития холдинга:

- «Энергетическая стратегия холдинга «РЖД» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года», утверждена 15.12.2011 г. распоряжением №2718р;

- «Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга)», утверждена 17.04.2018 распоряжением N 769/р.

В соответствии с п. 4.7.2 Стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД», на втором этапе обновления локомотивного парка (2021–2025 годы и на перспективу до 2030 года) предусматривается создание новых локомотивов, в которых будут использоваться перспективные «интеллектуальные технологии» со следующими основными характеристиками:

- повышение тяговых свойств на 10 – 15 %;
- повышение коэффициента технической готовности до 0,96 – 0,97;
- существенное снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт;
- снижение затрат на электроэнергию и дизельное топливо в среднем на 10 %;
- повышение эксплуатационного коэффициента полезного действия (КПД) локомотива;
- реализация возможности управления локомотивом в полностью автоматическом режиме с повышением уровня безопасности движения поездов;
- снижение воздействия на окружающую среду за счет уменьшения образования отходов и выбросов вредных веществ.

В п.4.7.2 стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» указываются перспективные инновационные технологии, которые позволят повысить эффективность автономных локомотивов:

- использование газомоторных, гибридных локомотивов, многодизельных силовых установок;
- применение гибридного привода и накопителей электрической энергии торможения;
- автоматическая адаптация к условиям работы локомотива;
- возможность работы дизелей тепловоза по системе «старт/стоп» с обеспечением собственных нужд от работающего дизеля;
- возможность использования функций автоведения, удаленного управления, беспилотного вождения («автомашинист»).

Целевыми задачами при разработке новых локомотивов являются:

- повышение эффективности перевозочного процесса за счет увеличения маршрутных скоростей;
- снижения энергозатрат в эксплуатации;
- уменьшение стоимости жизненного цикла;
- повышение показателей функциональной безопасности и надежности.

Учитывая то, что основным потребителем энергии являются тяговые системы (передача мощности или электропривод) локомотивов, то вопросы повышения энергетической эффективности работы тягового оборудования, в условиях реальной эксплуатации, выходят на первый план.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов уделяется особое внимание, начиная с самого начала существования железных дорог. Основные положения определения параметров, влияющих на энергоэффективность перевозочного процесса (время хода, техническая скорость, расход энергоресурсов), изложены в правилах тяговых расчетов. Большой вклад в развитие методов тяговых расчетов и теории тяги поездов внесли многие ученые и инженеры:

А.М. Бабичков, А.П. Бородин, А.В. Вульф, П.Т. Гребенюк, А.Н. Долганов, В.Ф. Егорченко, И.П. Исаев, Г.В. Лебедев, А.И. Липец, Ю.В. Ломоносов, А.С. Нестрахов, С.И. Осипов, Н.П. Петров, Ф.А. Пироцкий, В.Е. Розенфельд, С.Я. Френкель, Б.С. Якоби и др.

С развитием вычислительной техники методы расчета энергоэффективных траекторий движения поезда стали совершенствоваться, при этом основное внимание уделяется выбору управляющих воздействий с целью минимизации расхода энергии на тягу, для этого применяется численная реализация итерационных методов с проведением тяговых расчетов на рассматриваемом участке. Актуальным направлением является разработка методов тяговых расчетов для их применения в бортовых системах локомотивах, что позволит обеспечить непрерывную корректировку параметров управления тяговым приводом с использованием алгоритмов машинного обучения. Большой вклад для решения данного класса задач внесли многие ученые и инженеры:

Л.А. Баранов, В.И. Головин, Я.М. Головичер, Г.В. Евдомах, Е.В. Ерофеев, В.А. Лазарян, В.М. Лисенков, А.Л. Лисицын, Л.А. Мугинштейн, Б.Д. Никифоров, А.В. Плакс, О.Е. Пудовиков, М.С. Пясик, А.Н. Савоськин, К.И. Юренко, И.А. Ябко и др.

Повышение эффективности использования тягового и вспомогательного оборудования локомотива с целью улучшения энергетических показателей тя-

гового подвижного состава является комплексной задачей:

- разработка новых автономных локомотивов с газодизельными силовыми установками, с гибридными силовыми установками, с водородными топливными элементами, газотурбовозов, многодизельных локомотивов;

- применение энергоэффективных бесколлекторных электрических машин (асинхронные, синхронные с постоянными магнитами, реактивные индукторные) в качестве вспомогательного и тягового привода с микропроцессорными системами управления, позволяющими реализовать различные режимы работы;

- разработка оптимальных режимов работы оборудования локомотива, в том числе с возможным отключением неиспользуемого оборудования (применение модульных силовых энергетических установок, системы энергоэффективного управления тягой, снижение частоты вращения мотор-вентиляторов).

Большой вклад для решения данного класса задач внесли многие ученые и инженеры:

В.В. Асабин, А.А. Андрющенко, Ю.В. Бабков, В.Н. Балабин, А.Ю. Балакин, Е.С. Васюков, А.И. Володин, В.А. Гапанович, И.П. Гордеев, В.В. Грачев, А.В. Грищенко, А.М. Евстафьев, А.А. Зарифьян, В.Н. Игин, К.К. Ким, А.В. Киреев, В.Ф. Козаченко, П.Г. Колпахчян, А.С. Космодамианский, Д.И. Курилкин, В.С. Коссов, Е.Е. Коссов, А.Б. Красовский, В.А. Кручек, В.В. Кручек, В.А. Кузьмичев, В.А. Кучумов, И.К. Лакин, Я.А. Новачук, Д.Я. Носырев, С.М. Овчаренко, Ю.А. Орлов, В.Н. Остриров, С.А. Пахомин, В.А. Перминов, К.С. Перфильев, Д.И. Петраков, А.Д. Петрушин, Г.К. Птах, А.А. Пугачев, В.А. Соломин, С.Н. Флоренцев, В.В. Фурман, С.Г. Шантаренко, П.В. Шепелин и др.

Цель работы: разработка новых научно обоснованных технических решений, концепции структуры и режимов работы тягового оборудования локомотивов с электрической передачей мощности, обеспечивающих повышение энергетической эффективности эксплуатации, на основе методов обработки регистрируемой информации бортовыми системами локомотивов.

Объектом исследования являются современные и перспективные автономные локомотивы с электрической передачей мощности, оснащенные регистраторами параметров работы оборудования.

Предметом исследования являются методы обработки регистрируемой информации и выбора режимов работы тягового оборудования для повышения энергоэффективности автономных локомотивов.

Задачи исследований:

1. Провести анализ современного состояния проблемы эффективности эксплуатации и показателей оценки энергоэффективности автономных локомотивов.

2. Разработать методологию оценки энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов с электрической передачей мощности.

3. Провести анализ энергетической эффективности автономных локомотивов в условиях эксплуатации, на основе интеллектуальной обработки данных, встроенных средств регистрации параметров бортовых систем локомотивов.

4. Разработать научно обоснованную концепцию повышения энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов.

5. Усовершенствовать проведение тяговых расчетов с использованием метода конечных элементов.

6. Разработать комплексную компьютерную модель автономного локомотива с электрической передачей мощности с модульной структурой тягового оборудования.

7. Провести теоретические исследования электромеханических процессов в различных режимах работы электрической передачи мощности локомотива с целью определения условий эффективности преобразования энергии.

8. Провести экспериментальные исследования макета тягового модуля электрической передачи мощности и комплекта тягового электрооборудования электрической передачи мощности автономного локомотива с бесколлекторными электрическими машинами.

Научная новизна диссертационной работы:

Теоретически обоснованы и предложены:

- методология оценки энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов с электрической передачей мощности по данным встроенных средств регистрации параметров бортовых систем автономных локомотивов;

- математические модели процессов преобразования энергии в тяговом оборудовании локомотива, основанные на энергетическом подходе и пересчете паспортных технических характеристик;

- концепция повышения энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов, на основе принципа масштабируемости используемого тягового оборудования, в зависимости от условий эксплуатации;

- впервые предложен метод конечных элементов для проведения тяговых расчетов, что позволяет учитывать изменение энергетического состояния поезда на координатно-скоростной плоскости зависящего от профиля пути, скорости движения, сил сопротивления движению;

- комплексная компьютерная модель автономного локомотива с электрической передачей мощности и с модульной структурой тягового оборудования на базе синтеза программных комплексов, позволяющая проводить теоретические исследования режимов работы тягового оборудования с оценкой энергетической эффективности процессов преобразования энергии.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Предложен новый научно обоснованный метод проведения анализа энергетической эффективности автономного тягового подвижного состава в условиях эксплуатации по данным средств регистрации параметров, позволяющий проводить оценку и управление энергетической эффективностью автономных локомотивов, в том числе и перспективных, в реальном времени, при ведении поезда.

2. Проведенный анализ энергетической эффективности автономных локомотивов в условиях реальной эксплуатации, на основе интеллектуальной обработки данных, встроенных средств регистрации параметров бортовых систем локомотивов, показал низкую эффективность работы тягового оборудования в условиях эксплуатации для различного рода службы локомотивов.

3. Разработаны математические модели процессов преобразования энер-

гии в тяговом оборудовании локомотива, основанные на энергетическом подходе и пересчете паспортных технических характеристик, которые повышают точность и быстроту расчетов, что позволяет их использовать в системах управления реального времени.

4. Предложен коэффициент эффективности использования тягового оборудования, предназначенный для сопоставления энергоэффективности различных режимов эксплуатации тягового оборудования автономных локомотивов.

5. Дополнены научные основы повышения энергетической эффективности локомотивов с электрической передачей мощности, в части разработки новых методов и концепции масштабируемости используемого тягового оборудования автономного локомотива в зависимости от условий эксплуатации, за счет снижения потерь при преобразовании энергии в тяговом оборудовании, что позволяет снизить затраты на энергоресурсы в процессе эксплуатации и сократить количество отказов дизель-генераторной установки из-за длительной работы на холостом ходу не только во время стоянок, но и во время движения.

6. Усовершенствован метод проведения тяговых расчетов, что обеспечивает выполнение оптимальных тяговых расчетов с повышенной точностью, при существенном сокращении временных и вычислительных затрат.

7. Применение разработанной комплексной компьютерной модели автономного локомотива с электрической передачей мощности с модульной структурой тягового оборудования позволяет проводить исследования режимов работы и энергетической эффективности локомотивов на стадиях проектирования, модернизации и испытаний с целью определения алгоритмов управления для условий эксплуатации.

Методология и методы исследования. Поставленные в диссертационной работе задачи решены с использованием методов обработки больших массивов экспериментальных данных; теории локомотивной тяги; теории электрических цепей, теории электромеханического преобразования энергии, теории электромагнитных полей, теории тепловых полей, энергетического баланса механической системы, методов оптимизации многомерных функций, структурного анализа и имитационного компьютерного моделирования, теории метода конечных элементов.

Для построения компьютерной модели применен синтез программных комплексов MATLAB/Simulink, FEMM и «Универсальный механизм», что позволяет минимизировать время при создании комплексной модели локомотива и поезда и увеличить быстродействие при проведении многовариантных расчетов.

Для различных методов обработки данных, формирование матриц жесткости и состояний поезда, проведения расчетов методом конечных элементов применяется объектно-ориентированный язык программирования высокого уровня MATLAB.

Экспериментальные исследования проведены на лабораторной базе аккредитованного испытательного центра подвижного состава «ПРИВОД-Н», обладающего уникальным научным и испытательным оборудованием, внесенным в государственный реестр средств измерения.

Положения, выносимые на защиту.

1. Методология оценки энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов с электрической передачей мощности по данным встроенных средств регистрации параметров бортовых систем автономных локомотивов.

2. Результаты анализа энергетической эффективности автономных локомотивов в условиях эксплуатации на сети железных дорог, на основе интеллектуальной обработки данных, встроенных средств регистрации параметров бортовых систем локомотивов.

3. Математические модели процессов преобразования энергии в тяговом оборудовании локомотива, основанные на энергетическом подходе и пересчете паспортных технических характеристик.

4. Научно обоснованная концепция повышения энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов, на основе принципа масштабируемости используемого тягового оборудования в зависимости от условий эксплуатации.

5. Усовершенствованный метод проведения тяговых расчетов, учитывающий изменение энергетического состояния поезда на координатно-скоростной плоскости зависящего от профиля пути, скорости движения, сил сопротивления движению.

6. Комплексная компьютерная модель автономного локомотива с электрической передачей мощности с модульной структурой тягового оборудования на базе синтеза программных комплексов, позволяющая проводить теоретические исследования режимов работы тягового оборудования с оценкой энергетической эффективности процессов преобразования энергии.

7. Результаты теоретических и экспериментальных исследований макета тягового модуля электрической передачи мощности и комплекта тягового электрооборудования электрической передачи мощности автономного локомотива с бесколлекторными электрическими машинами.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов подтверждена сопоставлением теоретических и экспериментальных данных и обеспечивается корректностью исходных математических положений, а также обоснованностью принятых допущений.

Основные результаты и положения диссертационной работы обсуждались: - на научных конференциях и симпозиумах: на научно-техническом семинаре «Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: вопросы динамики, прочности и износа» (г. Брянск, 2009г.), Всероссийских научно-практических конференциях «Транспорт», (г. Ростов н/Д, 2010-2023), на Международной конференции ElectrIMACS 2011 (Франция, 2011), на 3-й Российской конференции «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (г. Москва, апрель 2012), на III Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные системы на транспорте» (г. Санкт-Петербург, 2013), на Международной конференции 19th IMACS World Congress (Испания, 2013), на Международной научно-практической конференции «Достижения и перспективы технических наук» (г. Уфа, 2014), на научно-технической конференции и выставке инновационных проектов, выполняемых

вузами и научными организациями Южного федерального округа в рамках участия в реализации федеральных целевых программ и внепрограммных мероприятий (г. Новочеркасск, 2014), на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы технических наук» (г. Уфа, 2015), на Международной научно-технической конференции «Локомотивы XXI век» (г. Санкт-Петербург, 2015), на Международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России» (г. Ростов-на-Дону, 2015), на Международной научно-технической конференции, посвященной 180-летию железных дорог России (г. Санкт-Петербург, 2017), на Международной научно-практической конференции «Новые материалы и технологии - основа инновационного развития», (г. Уфа, 2017), на Всероссийской национальной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» (г. Ростов-на-Дону, 2018), на X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS) (г. Новочеркасск, 2018), на 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED) (г. Москва, 2019), International Russian Automation Conference (RusAutoCon) (г. Сочи, 2019), на International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (г. Сочи, 2019, 2020, 2021); на международной научно-практической конференции «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава» (г. Ростов н/Д, 2021,2022); на VIII международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте» (г. Орёл, 2023); на международном симпозиуме «Eltrans 2023»(г. Санкт-Петербург, 2023);

- на заседании объединенного ученого совета ОАО «РЖД», заседании кафедры «Тяговый подвижной состав» РУТ (МИИТ), заседаниях кафедры «Тяговый подвижной состав» ФГБОУ ВО РГУПС (2012-2023).

Реализация и внедрение результатов работы. Основные научные результаты диссертации использованы при выполнении исследований в рамках соглашения о предоставлении субсидии ФЦП №14.576.21.0036 «Разработка научно-технических решений для создания энергосберегающей электрической передачи мощности транспортных средств с реактивными индукторными электрическими машинами» (2014-2016); гранта РФФИ № 16-38-00566-мол «Разработка и исследование энергоэффективного электродвигателя класса «Супер премиум» IE4» (2016-2017); гранта РФФИ №18-79-00130 «Разработка научно-технических основ и исследование реактивных индукторных машин нового класса» (2018-2020); в АО «Научно-технический центр «ПРИВОД-Н» при разработке комплектов тягового электрического оборудования для модернизации маневровых локомотивов; в АО «ЕВРАЗ НТМК» при разработке электрооборудования для комплекта тягового привода на базе ТРИД-320, предназначенного для варианта модернизации маневрового тепловоза серии ТГМ6А; в ОАО «РЖД» при формировании концепции перспективного тягового подвижного состава в виде технических требований на разработку тепловозов с двухдизельной силовой установкой; в учебном процессе ФГБОУ ВО РГУПС при подготовке специалистов для железнодорожного транспорта.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 53 печатных работах, в том числе: 21 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 15 – в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, опубликована 1 монография, получено 2 патента РФ на изобретения и 2 патента РФ на полезные модели.

Структура работы. Диссертация из 363 страниц машинописного текста включает в себя введение, шесть глав, общие выводы, список литературы из 212 наименований, 1 приложение, 42 таблицы и 206 рисунков. Основное содержание изложено на 328 страницах текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, приведены сведения о структуре диссертации.

Первая глава посвящена анализу современного состояния проблемы энергоэффективного использования автономных локомотивов с электрической передачей мощности.

Выполненный обзор литературных источников показал, что применение современного тягового оборудования позволяет повысить секционную мощность локомотива, что особенно актуально для грузовых и пассажирских перевозок, вместе тем становится новая проблема полного использования доступной мощности локомотива, поэтому среди основных требований к новому и перспективному подвижному составу устанавливаются следующие:

- поосное регулирование силы тяги;
- адаптивное отключение тяговых электродвигателей в зависимости от нагрузки.

В соответствии со стратегией развития холдинга ОАО «РЖД», необходима разработка современных локомотивов, способных водить поезда повышенных весовых норм, но эксплуатация локомотива в режиме близком к номинальному не возможна, так как на это влияют ряд факторов: масса поезда, график движения, профиль пути. Потенциального сокращения потребления топливно-экономических ресурсов, при том же объеме перевозок, планируется добиться за счет внедрения современных технологических мер (переход на тяговый бесколлекторный привод, повышение нагрузок на ось, переход на длинносоставные и тяжеловесные поезда и т.д.), что требует значительных инвестиционных ресурсов и в условиях реального перевозочного процесса не всегда приводит к экономии топливно-энергетических ресурсов. При этом коэффициент полезного действия локомотива нормируется только для номинального режима работы, а в эксплуатации, где локомотив более 90 % времени работает в условиях частичных нагрузок, значение КПД не нормируется. Данная проблема выходит на первый план для мощных многоосных и многосекционных локомотивов, работающих с тяжеловесными составами в одном направлении и с порожними составами в обратном направлении.

В настоящее время ведутся активные работы по поиску оптимальных технических решений для создания энергоэффективных маневровых локомотивов с различными вариантами исполнения тягового оборудования. Основные направления в этой области направлены на переход к многодизельным силовым

установкам и применению накопителей энергии. Обзор литературных источников в области опыта эксплуатации маневровых и магистральных локомотивов показал, что:

- на сегодняшний день имеется констатация низкой энергетической эффективности маневровых и мощных современных магистральных локомотивов, особенно при работе с легковесными поездами, но при этом отсутствуют практические пути выхода из сложившейся ситуации. Несмотря на разработки многодизельных локомотивов с бесколлекторным тяговым приводом, преимущественно выпускаются однодизельные маневровые тепловозы с передачей мощности постоянного тока и однодизельные (в секции) магистральные тепловозы с передачей мощности переменного-постоянного тока;

- повышение энергоэффективности перевозочного процесса не может быть достигнуто только лишь за счет создания новых мощных локомотивов. Особое внимание стоит уделять режимам работы тягового оборудования локомотивов, что позволит привести в соответствие мощностные характеристики условиям эксплуатации, а так же совершенствовать алгоритмы работы тягового и вспомогательного оборудования;

- существует целый ряд энергетических показателей для автономных локомотивов, которые нормируются только для полной мощности локомотива при скоростях движения от 40 до 90 % конструкционной скорости, при этом эксплуатационная эффективность оценивается только по показателю удельного расхода топлива на единицу перевозочной работы, из которого трудно оценить непосредственно эффективность автономного тягового подвижного состава, поэтому необходима разработка методологии определения энергетической эффективности локомотивов в условиях эксплуатации.

Выполненный обзор исследований в предметной области диссертации позволил сформулировать цель и задачи исследований настоящей работы.

Вторая глава посвящена разработке научно обоснованной методологии оценки эффективности процесса преобразования энергии в тяговом оборудовании локомотивов с электрической передачей мощности в условиях эксплуатации с дальнейшим анализом энергоэффективности эксплуатируемых тепловозов.

Современный автономный локомотив – сложное тяговое электромеханическое устройство с химическим источником энергии и с несколькими ступенями преобразования энергии в тяговом оборудовании, поэтому объективно оценить энергоэффективность можно только через КПД тепловоза за поездку, т.е. отношение количества энергии переданной на колеса к энергии израсходованного топлива. Энергия топлива определяется через его расход за единицу времени, при этом, чем больше интервал времени, тем меньше влияет погрешность измерения количества топлива, но при этом сложно обеспечить постоянство режимов работы дизель-генераторной установки (ДГУ).

Эффективность процесса преобразования энергии в первичном двигателе наиболее полно характеризуется удельным расходом топлива на единицу совершенной работы [кг/(кВт·ч)]. Эффективное значение КПД первичного двигателя на фланце определяется по формуле

$$\eta_e = \frac{3600}{b_e \cdot Q_H}, \quad (1)$$

где b_e – удельный расход топлива первичного двигателя, кг/(кВт·ч); Q_H – низшая теплотворная способность топлива первичного двигателя, кДж/кг.

Система управления дизельным двигателем обеспечивает его работу по тепловозной (экономической) характеристике, тогда, для эксплуатации, целесообразнее определять КПД передачи энергии на вал тягового генератора (ТГ)

$$\eta_d = \frac{\int \frac{U_{DC} \cdot I_{DC} \cdot dt}{\eta_{ТГ}(I_{DC}, \omega_{ТГ}) \cdot \eta_{ВУ}(I_{DC})}}{E \cdot Q_H}. \quad (2)$$

где U_{DC} – напряжение звена постоянно тока, В; I_{DC} – ток звена постоянно тока, А; $\eta_{ТГ}(I_{DC}, \omega_{ТГ})$ – КПД тягового генератора; $\eta_{ВУ}(I_{DC})$ – КПД выпрямительной установки; $\omega_{ТГ}$ – угловая частота вращения вала тягового генератора.

Практическая сложность определения КПД дизеля заключается в обеспечении необходимой точности измерения расхода дизельного топлива. В соответствии с ГОСТ 34514-2019, устанавливается максимальная допустимая погрешность измерения часового расхода топлива $\pm 0,154$ %, а значит, при работе дизеля в течение одного часа на 15 позиции и расходе топлива 530 кг необходимо обеспечить точность измерения топлива в топливном баке $\pm 0,816$ кг. Таким образом, для условий эксплуатации, определение КПД дизеля возможно только за длительный промежуток времени, а измерение массы топлива должно происходить во время стоянок. Зависимость эксплуатационного КПД передачи энергии на вал тягового генератора от времени определяется по формуле

$$\eta_d(t) = \frac{A_d(t)}{A_E(t)} = \frac{A_d(t)}{E(t) \cdot Q_H}, \quad (3)$$

где $A_d(t)$ – механическая энергия, подводимая к тяговому генератору, в зависимости от времени; $E(t)$ – расход дизельного топлива в зависимости от времени; Q_H – низшая теплота сгорания топлива.

Универсальным показателем оценки энергетической эффективности выступает КПД, в том числе и для элементов электрической передачи мощности:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1}. \quad (4)$$

где P_1 – входящая мощность (механическая/электрическая для ТГ/ТЭД); P_2 – исходящая мощность (электрическая/механическая для ТГ/ТЭД); ΔP – потери мощности при преобразовании.

КПД электрической передачи мощности определяется в основном следующими факторами:

- коэффициентом полезного действия тягового генератора;
- коэффициентом полезного действия тяговых двигателей;
- коэффициентом полезного действия статических преобразователей (выпрямитель, инвертор);
- режимами управления тяговым генератором;
- режимами управления тяговыми двигателями;
- режимами электрической передачи мощности в целом.

Для основных элементов электрической передачи мощности (тяговый генератор, тяговые двигатели, статические преобразователи) определяется значение номинального КПД для номинального (длительного) режима работы теплового, что, как правило, соответствует движению с расчетной скоростью на последней позиции контроллера машиниста (ПКМ).

Для сравнения эффективности преобразования энергии в тяговом оборудовании в режимах отличных от номинального предлагается использовать коэффициент эффективности использования (КЭИ) оборудования, который показывает отношения текущего КПД к его номинальному значению

$$\text{КЭИ}_i = \frac{\eta_i}{\eta_n}, \quad (5)$$

где η_i – значение КПД для выбранного режима работы оборудования; η_n – номинальное значение КПД.

Применение КЭИ обусловлено неоднозначностью получаемых результатов при сравнении изменения коэффициентов полезного действия, например дизеля и тягового двигателя, и позволяет оценить как эффективность использования оборудования, так и перерасход энергоресурсов, связанный с недоиспользованием мощности.

КПД выпрямительной установки, в основном, зависит от потерь в вентилях, прямого тока нагрузки и добавочных потерь, включающих потери от обратных токов вентилях, потерь в предохранителях и ошиновки, коммутационных потерь, потерь в сигнальной и защитной аппаратуре. Основную долю всех потерь в выпрямителе составляют потери в вентилях от прямого тока нагрузки. Для одной и той же выпрямительной установки при одинаковых токах нагрузки КПД выше, если мощность нагрузки больше (т.е. выше выпрямленное напряжение U_d). Для анализа энергоэффективности процессов в электрической передаче мощности предлагается использовать упрощенную формулу с использованием фиксированного значения КПД выпрямительной установки равному номинальному значению

$$\Delta P_{BV}(I) = \left(\frac{1}{\eta_{BV}^n} - 1 \right) \cdot I \cdot U_n = k_{BV} \cdot I, \quad (6)$$

где η_{BV}^n – номинальное значение КПД; U_n – номинальное значение напряжения; k_{BV} – коэффициент потерь выпрямительной установки от тока

$$k_{BV} = \left(\frac{1}{\eta_{BV}^n} - 1 \right) \cdot U_n. \quad (7)$$

Или, при необходимости более точного определения потерь в выпрямительной установке, необходимо учитывать зависимость изменения КПД от тока, тогда формула для определения потерь мощности примет вид

$$\Delta P_{BV}(I) = \left(\frac{1}{\eta_{BV}^{P_n}(I)} - 1 \right) \cdot P_n, \quad (8)$$

где $\eta_{BV}^{P_n}(I)$ – зависимость КПД от тока нагрузки для номинальной мощности тягового генератора, при гиперболической внешней характеристике.

В результате, окончательно получаем формулу для определения КПД вы-

прямительной установки для любых эксплуатационных режимов

- упрощенная

$$\eta_{BV}(I, P_{BV}) = \frac{P_{BV}}{P_{BV} + k_{BV} \cdot I}, \quad (9)$$

- уточненная

$$\eta_{BV}(I, P_{BV}) = \frac{P_{BV}}{P_{BV} + \left(\frac{1}{\eta_{BV}^{P_n}(I)} - 1 \right) \cdot P_n}. \quad (10)$$

Пример зависимости КПД от тока и мощности показан на рисунке 1.

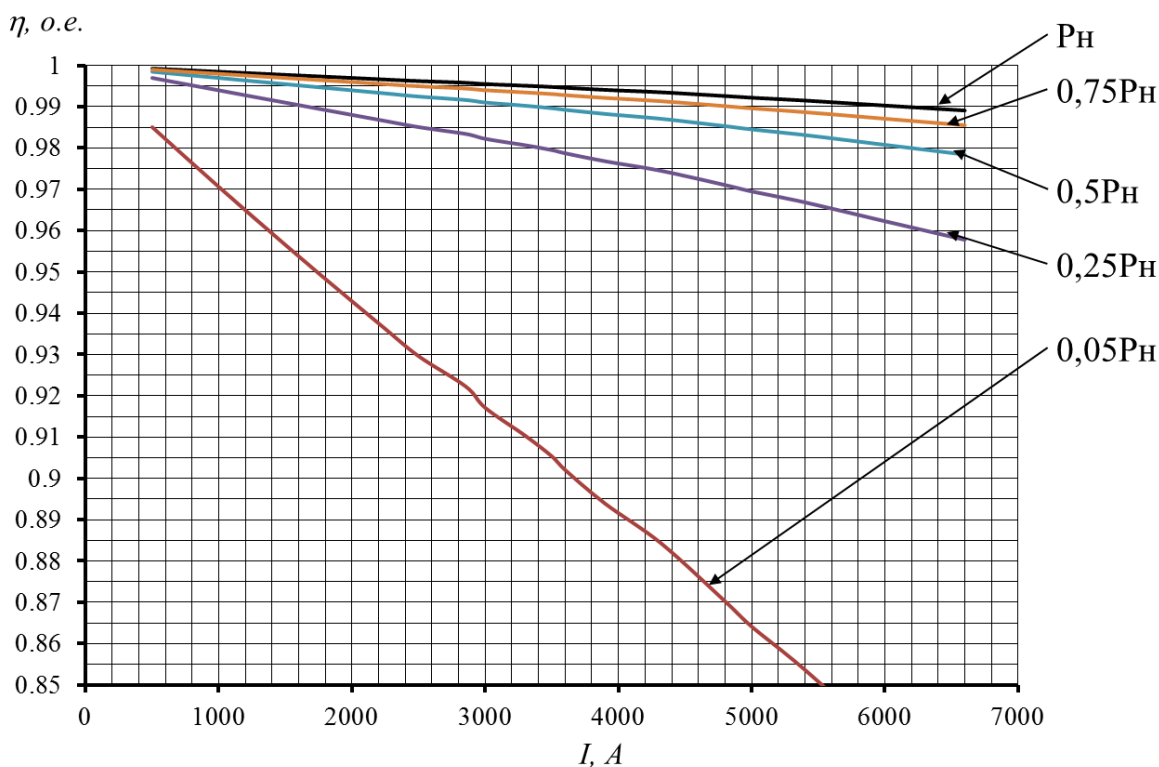


Рисунок 1 – Зависимость КПД выпрямительной установки от тока и мощности

В электрических передачах мощности переменного тока применяются статические преобразователи частоты, которые служат для двойного преобразования переменного трехфазного тока, вырабатываемого трёхфазным синхронным тяговым генератором, в переменный ток с регулируемой частотой и напряжением для питания асинхронных тяговых трёхфазных электродвигателей переменного тока. Практически на всех локомотивах преобразователи частоты выполнены по мостовой схеме с промежуточным звеном постоянного тока, т.е. преобразователь частоты состоит из выпрямительной установки и трёхфазного автономного инвертора напряжения.

В результате возникает необходимость определения потерь для выпрямительной установки в составе преобразователя и инвертора напряжения. Сложность определения потерь в инверторе напряжения заключается в том, что они зависят от законов управления бесколлекторным двигателем. В общем случае потери в инверторе определяются частотой коммутации силовых полупроводниковых приборов и величиной фазного тока. Точное определение потерь в преобразователе является важным этапом проектирования, т.к. это определяет

выбор элементной база и параметров охлаждения силовых приборов.

Потери на проводимость транзисторов вычисляются по формуле

$$P_{\text{ПТ}} = \frac{\Delta t}{T} \sum_{n=1}^N I_n \cdot U_{ce_n} \cdot T_n, \quad (11)$$

где Δt – интервал времени между замерами; T – длительность периода фазного тока; N – количество замеров в периоде; I_n – фазный ток в момент n ; U_{ce_n} – падение напряжения на переходе транзистора при токе I_n ; T_n – значение признака проводимости транзистора.

Коммутационные потери в транзисторах определяются по формуле

$$P_{\text{КТ}} = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^N E_{on_n}(I_n) \cdot OnT_n + E_{off_n}(I_n) \cdot OffT_n, \quad (12)$$

где E_{on_n} – энергия потерь на включение транзистора при токе I_n ; OnT_n – значение признака включения транзистора; E_{off_n} – энергия потерь на выключение транзистора при токе I_n ; $OffT_n$ – значение признака выключения транзистора.

Потери на проводимость диодов вычисляются по формуле

$$P_{\text{ПД}} = \frac{\Delta t}{T} \sum_{n=1}^N I_n \cdot U_{f_n} \cdot D_n \quad (13)$$

где U_{f_n} – падение напряжения на диоде при токе I_n ; D_n – значение признака проводимости диода.

Коммутационные потери в диодах определяются по формуле

$$P_{\text{КТ}} = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^N E_{rec_n}(I_n) \cdot OffD_n, \quad (14)$$

где E_{rec_n} – энергия потерь на восстановление запирающих свойств диода при токе I_n ; $OffD_n$ – значение признака выключения диода.

Суммарные потери в полупроводниковом модуле определяются как сумма потерь на проводимость и коммутационных потерь диода и транзистора модуля.

Основными потерями в электрических машинах являются: электрические потери в обмотках статора и ротора (якоря) – омические потери; потери в магнитопроводе (потери в стали на гистерезис, вихревые токи и т.д.); потери вентиляционные (потери на привод системы вентиляции); потери в трущихся частях (потери механические); добавочные потери.

Определение КПД тяговых электродвигателей (ТЭД) в процессе эксплуатации затруднительно, т.к. фактически можно измерить мощность, подводимую к ТЭД, а мощность, реализуемая на валу ТЭД, как правило, определяется расчетным методом, при этом используется зависимость КПД в функции тока якоря $\eta_{15\text{ПКМ}} = f(I_a)$, приведенная в электромеханических характеристиках. С учетом того, что электромеханические характеристики ТЭД получены при напряжении, соответствующем внешней характеристике тягового генератора для 15 ПКМ, а управление тяговыми двигателями постоянного тока (и для асинхронных в зоне низких скоростей движения) осуществляется за счет изменения подаваемого напряжения, то необходимо выполнять перерасчет КПД, для усло-

вий эксплуатации, либо вычислять мощность на валу через разность подводимой мощности и потерь, возникающих в процессе преобразования энергии. Тогда формула, при использовании электромеханических характеристик, для определения КПД тягового двигателя в функции тока и мощности примет вид

$$\eta_{ТЭД}(I, P_1) = \left(1 - \frac{(1 - \eta_h(I)) P_{1h}}{P_1} \right). \quad (15)$$

Для тягового генератора (ТГ) формула определения КПД аналогична формуле (10) и примет вид

$$\eta_{ТГ}(I, P_2) = \frac{P_2}{P_2 + \left(\frac{1}{\eta_{ТГ}^{P_h}(I)} - 1 \right) \cdot P_h}. \quad (16)$$

При малых частотах вращения якоря ТЭД, основные потери приходятся на омические потери в обмотках ТЭД, которые пропорциональны квадрату тока. Добавочные и дополнительные потери определяются опытным путем, либо принимаются равными 1...1,5 % от входной мощности, при этом в частичных режимах нагрузки пересчитывают пропорционально квадрату тока. Потери в стали магнитопровода остова и якоря, потери на гистерезис и вихревые токи зависят от частоты вращения якоря и магнитной индукции в ярме и зубцах якоря. С учетом того, что магнитная индукция пропорциональна току возбуждения, то потери в магнитопроводе пропорциональны квадрату тока якоря, умноженному на коэффициент ослабления поля. Если принять допущение, что потери на перемагничивание якоря пропорциональны частоте вращения якоря, то общие потери в тяговом двигателе выражаются функцией от тока и частоты вращения якоря (или скорости тепловоза)

$$\Delta P(I_a, n) = k_1 I_a^2 + k_2 n, \quad (17)$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности квадрату тока якоря; k_2 – коэффициент пропорциональности частоте вращения якоря.

Тогда выражение для определения КПД примет вид

$$\eta_{ТЭД} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{k_1 I_a^2 + k_2 n}{U_d I_a}. \quad (18)$$

Коэффициент k_1 и k_2 определяются из электромеханических характеристик двигателя, исходя из максимального значения КПД, тогда условие, обеспечивающее максимально значение, записывается в виде обращения в ноль частной производной КПД по току якоря

$$\frac{\partial \eta_{ТЭД}}{\partial I_a} = \frac{k_1 I_a^2 - k_2 n}{(I_a)^2} = 0. \quad (19)$$

В результате получим, равенство переменных потерь зависящих от квадрата тока и условно постоянных потерь при фиксированной частоте вращения.

$$k_1 I_a^2 = k_2 n. \quad (20)$$

Определение коэффициента k_1 осуществляется из рассуждений, что при максимальном значении КПД, потери в равной степени будут разделены на две составляющие, в результате получим формулу для коэффициента пропорцио-

нальности квадрату тока якоря k_1

$$k_1 = \frac{(1 - \eta_{max}) \cdot P_1^*}{2 \cdot I^2}, \quad (21)$$

где η_{max} – максимальное значение КПД; P_1^* – входящая (электрическая) мощность ТЭД при максимальном значении КПД; I – ток якоря ТЭД при максимальном значении КПД.

или

$$k_1 = \left(\frac{1}{\eta_{max}} - 1 \right) \frac{P_2^*}{2 \cdot I^2}, \quad (22)$$

где P_2^* – исходящая (электрическая) мощность ТГ при максимальном значении КПД.

Аналогичным образом определяется и коэффициент k_2

$$k_2 = \frac{(1 - \eta_{max}) \cdot P_1^*}{2 \cdot n}, \quad (23)$$

или

$$k_2 = \left(\frac{1}{\eta_{max}} - 1 \right) \frac{P_2^*}{2 \cdot n}, \quad (24)$$

где n – частота вращения якоря ТЭД при максимальном значении КПД, об/с.

Для повышения точности расчета, коэффициенты k_1 и k_2 следует определять для режимов полного поля и каждой степени ослабления поля.

Известно, что скорость движения локомотива можно определить через частоту вращения якоря (ротора) ТЭД

$$V = \frac{3,6 \cdot \pi \cdot n \cdot D_K}{\mu}, \quad (25)$$

тогда

$$k_2^* = k_2 \frac{3,6 \cdot \pi \cdot D_K}{\mu}. \quad (26)$$

В результате получаем формулу для определения КПД, как функцию четырех переменных в зависимости от тока якоря, входной мощности и скорости движения локомотива для каждой степени ослабления поля

$$\eta_{ТЭД}(I_a, P_1, V, \alpha) = 1 - \frac{k_1(\alpha) \cdot I_a^2 + k_2^*(\alpha) \cdot V}{P_1}. \quad (27)$$

Практически на всех тепловозах с электрической передачей мощности управление происходит за счет изменения напряжения, что влияет на эффективность процесса электромагнитного преобразования энергии в магнитной системе электрической машины. В этом случае необходимо использовать дополнительный коэффициент, учитывающий эффективность процесса преобразования энергии в зависимости от напряжения.

$$\eta_{ТЭД}(I_a, U_{DC}, V, \alpha) = 1 - \frac{k_1(\alpha) \cdot I_a^2 + k_2^*(\alpha) \cdot V \cdot k_3(\alpha, U_{DC})}{I_a \cdot U_{DC}}, \quad (28)$$

где $k_3(\alpha, U_{DC})$ – коэффициент, учитывающий эффективность преобразования энергии в магнитной системе.

Коэффициент эффективности преобразования энергии определяется по

формуле

$$k_3(\alpha, U_{DC}, V) = 1 + \frac{\left| \left(U_{DC}^*(\alpha) \frac{V}{V^*} \right)^2 - (U_{DC})^2 \right|}{\left(U_{DC}^*(\alpha) \frac{V}{V^*} \right)^2}, \quad (29)$$

где $U_{DC}^*(\alpha)$ – напряжение звена постоянного тока при максимальном значении КПД, для соответствующей ступени ослабления поля; V^* – скорость локомотива, соответствующая максимальному значению КПД.

Окончательно получаем аналитическую функцию четырех переменных, позволяющую определить КПД ТЭД (аналогично и для тягового генератора) во всем диапазоне эксплуатационных режимов.

$$\begin{aligned} \eta_{\text{ТЭД}}(I_a, U_{DC}, V, \alpha) = \\ = 1 - \frac{1}{I_a \cdot U_{DC}} \left[k_1(\alpha) \cdot I_a^2 + k_2^*(\alpha) \cdot V \cdot \left(1 + \frac{\left| \left(U_{DC}^*(\alpha) \frac{V}{V^*} \right)^2 - (U_{DC})^2 \right|}{\left(U_{DC}^*(\alpha) \frac{V}{V^*} \right)^2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (30)$$

Тогда, КПД ТЭД (аналогично и для тягового генератора) в зависимости от позиции контроллера машиниста определяется по формуле

$$\eta_{\text{ТЭД}j} = \frac{\sum(\eta_i(I_a, U_{DC}, V, \alpha) \cdot P_{1i} \cdot \Delta t_i)}{\sum(P_{1i} \cdot \Delta t_i)}, \quad \{i \in N \mid \text{ПКМ}_i = j\}. \quad (31)$$

В эксплуатации время работы на частичных режимах может превышать время работы на максимальных позициях контроллера машиниста, поэтому актуальным является проведение анализа энергетической эффективности тепловозов различного рода службы в условиях их реальной работы, что позволит оценить режимы работы тягового оборудования и наметить пути повышения энергетической эффективности.

Энергия, переданная в звено постоянного тока, определяется для режима тяги по формуле

$$A_{DC} = \int_0^t \sum_{n=1}^m (U_{DCn} \cdot I_{DCn}) \cdot dt, \quad (32)$$

где U_{DCn} – напряжение звена постоянного тока n-го канала управляемого выпрямителя, В;

I_{DCn} – напряжение звена постоянного тока n-го канала управляемого выпрямителя, А.

t – время движения в режиме тяги, с;

m – количество независимых каналов выпрямительной установки.

Средняя мощность за поездку определяется по формуле

$$P_{DC}^{\text{ср}} = \frac{A_{DC}}{t}, \quad (33)$$

где A_{DC} – энергия, переданная в звено постоянного тока.

Использование мощности дизель-генераторной установки тепловоза определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{P_{DC}^{cp}}{P_e}, \quad (34)$$

где P_e – полная мощность дизеля.

Время работы на j позиции контроллера машиниста определяется по формуле

$$t_j = \frac{\sum_{k=1}^m \Delta t_k}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} \cdot 100\%, \quad \{k \in N \mid ПКМ_i = j\}, \quad (35)$$

где Δt_k – интервал работы на j позиции контроллера машиниста; Δt_i – временной интервал между измерениями.

Для магистральных локомотивов целесообразно определять относительное время работы по позициям для режима движения локомотива, т.е.

$$t_j = \frac{\sum_{k=1}^m \Delta t_k}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} \cdot 100\%, \quad \{k \in N \mid ПКМ_i = j; i \in N \mid V_i > 0\}, \quad (36)$$

где V_i – скорость локомотива во время i -го измерения.

Для более детальной оценки режимов работы предлагается исследовать непрерывное время работы ДГУ по позициям контроллера машиниста при условии, что возможно продолжен дальнейший набор позиций контроллера машиниста, тем самым определяется максимальное непрерывное время работы тепловоза в режиме тяги.

$$t_j = \sum_{i=1}^n \Delta t_i, \quad \{k \in N \mid V_i > 0 \wedge ПКМ_i \geq j\}. \quad (37)$$

Внешняя характеристика тягового генератора представляет собой зависимость напряжения от тока в звене постоянного тока, при этом каждой позиции машиниста, для большинства тепловозов, соответствует гиперболическая зависимость изменения напряжения от тока, что позволяет добиться постоянства мощности на зажимах выпрямительной установки, поэтому актуальным является построение точек работы тягового генератора на плоскости $U = f(I)$ с целью анализа областей работы тягового оборудования в условиях реальной эксплуатации. Следует отдавать предпочтение областям с высокими значениями напряжения и минимальным значениям силы тока.

Расчет энергии, переданной в звено постоянного тока, для j -ой позиции контроллера машиниста определяется по формуле

$$E_{DCj} = \int_0^T \sum_{n=1}^m (I_{DCnij} \cdot U_{DCnij}) \cdot dt, \quad (38)$$

где I_{DCnij} – текущее значение силы тока n -го канала выпрямительной установки, А; U_{DCnij} – текущее значение напряжения на зажимах n -го канала выпрямительной установки, В; n – номер канала выпрямительной установки; i – номер текущего измерения; j – номер позиции контроллера машиниста.

Количество непрерывно выработанной энергии (переданной в звено постоянного тока) определяет возможность применения различных накопителей

энергии. Определим максимальное количество непрерывно выработанной энергии для каждой из позиции контроллера машиниста. С учетом того, что мощность для каждой позиции поддерживается в заданном диапазоне, для расчета энергии используем максимальные непрерывные временные интервалы работы на позиции.

$$E_{DC_j}^{\max} = \int_a^b \sum_{n=1}^m (I_{DC_{nij}} \cdot U_{DC_{nij}}) \cdot dt, \quad (39)$$

при $\max(t_b - t_a), \{i \in N \mid a < i \leq b \wedge \text{ПКМ}_i = j\}$

Максимальное количество непрерывно выработанной энергии для интервала движения при условии, что происходит дальнейший набор позиций, определяется по формуле

$$E_{DC_j}^{\max} = \int_a^b \sum_{n=1}^m (I_{DC_{nij}} \cdot U_{DC_{nij}}) \cdot dt, \quad (40)$$

при $\max\left(\int_a^b \sum_{n=1}^m (I_{DC_{nij}} \cdot U_{DC_{nij}}) \cdot dt\right), \{i \in N \mid a < i \leq b \wedge \text{ПКМ}_i \geq j\}$.

Аналогичным образом определяется максимальное количество непрерывно выработанной энергии для интервала движения при условии, учета энергии на позициях предшествующих рассматриваемой, тогда энергия определяется по формуле

$$E_{DC_j}^{\max} = \int_a^b \sum_{n=1}^m (I_{DC_{nij}} \cdot U_{DC_{nij}}) \cdot dt, \quad (41)$$

при $\max\left(\int_a^b \sum_{n=1}^m (I_{DC_{nij}} \cdot U_{DC_{nij}}) \cdot dt\right), \{i \in N \mid a < i \leq b \wedge \text{ПКМ}_i \leq j\}$

Анализ энергетической эффективности грузового тепловоза 2ТЭ25К^М. Анализ проводился для случайно отобранного тепловоза 2ТЭ25К^М на основании маршрутов машиниста, данных записанных системой МПСУ-ТП и данных регистрируемых системой АСК за один месяц эксплуатации тепловоза на участке Северо-Кавказской железной дороги «раз. 9км – Железный Рог». Для детального анализа выбраны по 10 поездов в каждом направлении. Перевозочный процесс на данном участке характеризуется, как и на большинстве участков железных дорог, однонаправленностью грузового потока. В четном направлении тягового плеча преимущественно, груженые, тяжеловесные поезда с нагрузкой на ось 20 ... 23 тс, а в нечетном направлении – порожние поезда с нагрузкой на ось 6 ... 7,5 тс. В основе методики анализа лежит обработка регистрируемых данных с определением основных показателей, позволяющих оценить энергоэффективность использования тепловоза. На рисунке 2 показаны наиболее характерные поездки с груженым и порожним поездом.

Удельный расход дизельного топлива на измеритель объема перевозочной работы составил 15,16 кг/10⁴ткмбр для поездки №10 и 47,89 кг/10⁴ткмбр для поездки №14, удельный расход дизельного топлива по количеству выработанной энергии ДГУ составил 0,2016 кг/кВт·ч для поездки №10 и 0,2868 кг/кВт·ч для поездки №14, из чего следует, что высокий удельный рас-

ход топлива на измеритель перевозочной работы связан не только с увеличением удельного сопротивления движению, но и с недоиспользованием мощности тягового оборудования при ведении порожних или груженых коротких поездов, особенно это ситуация очевидна на легком профиле пути.

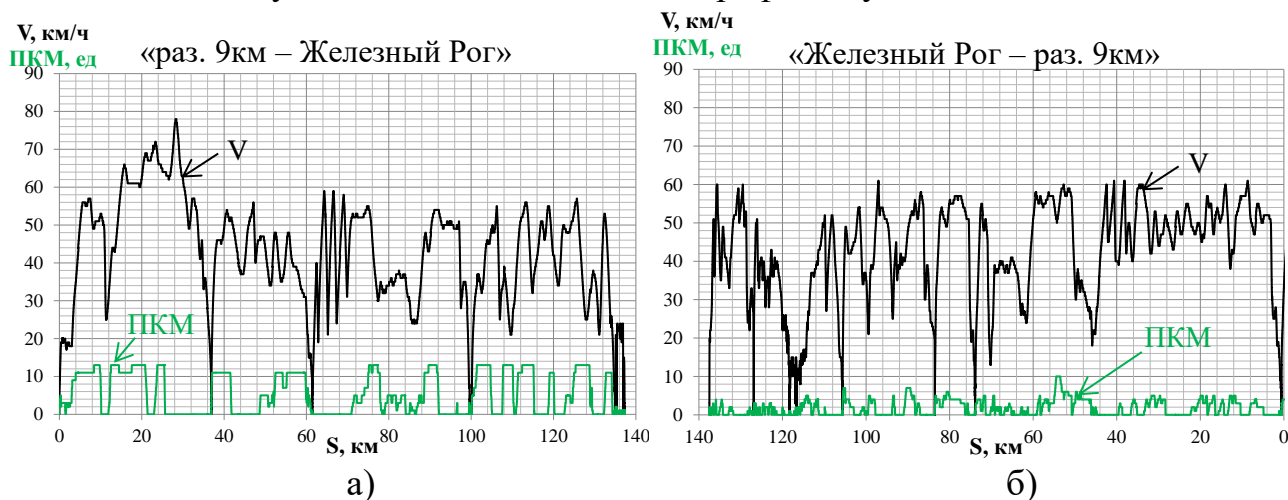


Рисунок 2 – График скорости и позиций КМ поездок:
а) – №10, масса состава 5336 т, б) – №14, масса состава 935 т.

Далее проанализированы все полученные данные эксплуатации для одной секции тепловоза 2ТЭ25К^М, общее число измерений параметров составило 2956680 шт, что составляет порядка 35 суток работы тепловоза. На рисунке 3 показано распределение времени работы и энергии, выработанной дизель-генераторной установкой тепловоза 2ТЭ25К^М по позициям контроллера машиниста за рассматриваемый период, полученные результаты коррелируют с исследования проведенными другими авторами. Так как тепловоз грузовой, то рассматривалось только время движения тепловоза, которое составило 390,82 ч. Поле точек внешней характеристики тягового генератора в процессе эксплуатации, по данным МПСУ-ТП приведено на рисунке 4.

В соответствии с предложенной методологией, произведен расчет и построение полей КПД выпрямительной установки (рисунок 5), синхронного тягового генератора (рисунок 6), тяговых электродвигателей (рисунок 7) в зависимости от мощности ДГУ. Расчет энергии, переданной в звено постоянного тока, в зависимости от позиции контроллера машиниста представлено на гистограмме (рисунок 3), а в зависимости от позиции контроллера машиниста и скорости представлен на рисунке 8.

Техническая скорость составила 35,78 км/ч. (среднеквадратичная скорость составила 40,02 км/ч). На 15 позиции тепловоз работал 2261 с, что составило 0,16 % от общего времени движения, на 14 позиции 4802 с – 0,34 %. Среднее значение мощности ДГУ при работе на тяговых позициях, составило 822 кВт, с учетом работы в режиме холостого хода в движении 396 кВт и на стоянках 233,6 кВт.



Рисунок 3 – Распределение времени работы и энергии, выработанной ДГУ

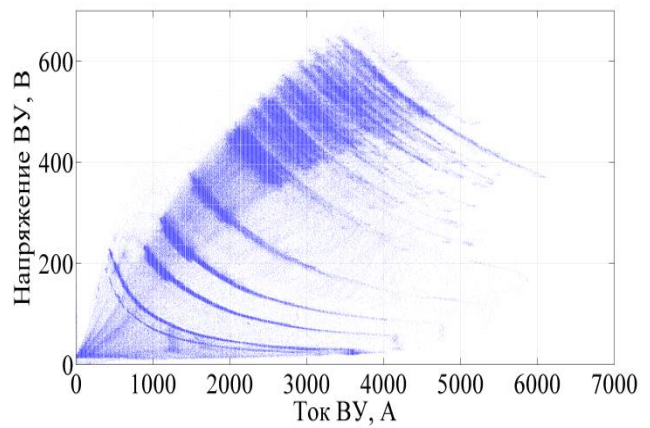


Рисунок 4 – Поле точек работы тягового генератора

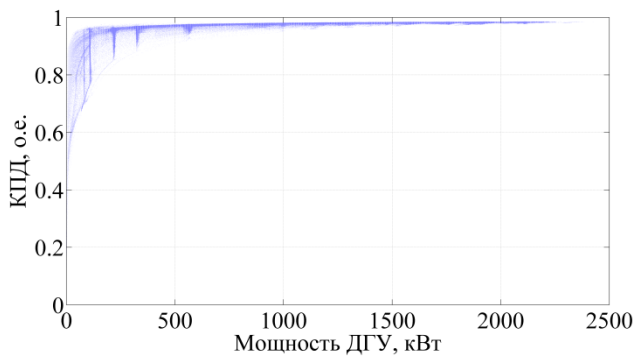


Рисунок 5 – Поле КПД ВУ в зависимости от мощности ДГУ

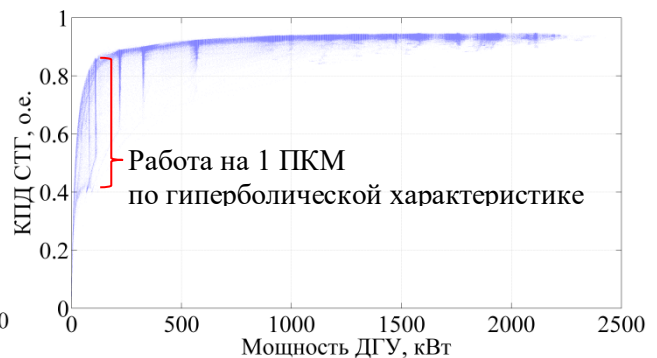


Рисунок 6 – Поле КПД СТГ в зависимости от мощности ДГУ

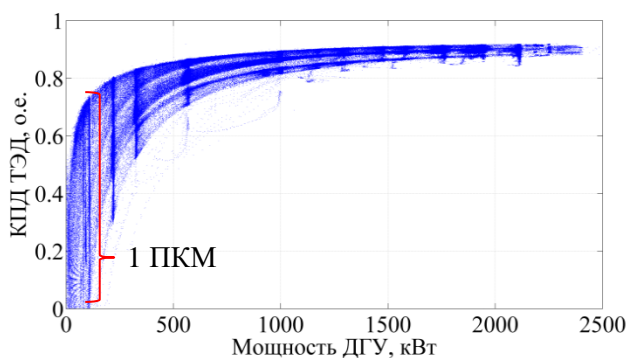


Рисунок 7 – Поле КПД ТЭД в зависимости от мощности ДГУ

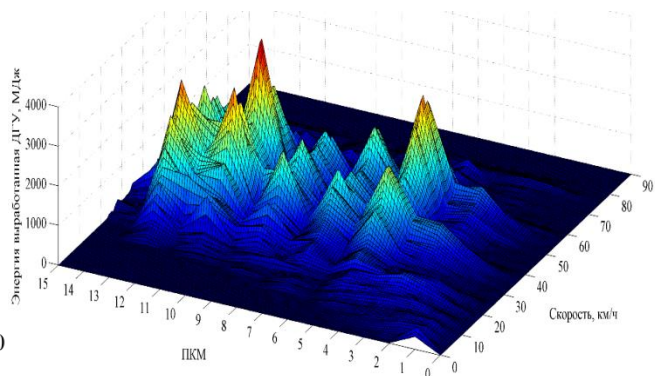


Рисунок 8 – Энергия, выработанная ДГУ

Аналогичным образом проведен анализ энергетической эффективности тепловозов: пассажирского ТЭП70БС, маневрового ЧМЭЗ, грузового с асинхронным приводом 2ТЭ25А. В результате анализа данных микропроцессорных систем управления и средств регистрации параметров локомотива, получена энергоэффективность процессов преобразования в электрических передачах мощности локомотивов, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты анализа энергетической эффективности локомотивов в условиях эксплуатации

Серия тепловоза	ЧМЭЗ	2ТЭ25К ^М	ТЭП70БС	2ТЭ25А
Род службы	маневровый	грузовой	пассажирский	грузовой
Тип электрической передачи мощности	постоянного тока	переменно - постоянного тока с многоканальным управляемым выпрямителем	переменно - постоянного тока с неуправляемым выпрямителем	переменно - переменного тока
Тип тягового двигателя	Постоянного тока	Постоянного тока	Постоянного тока	Асинхронный
Количество измерений, шт	1 011 436	2 956 680	5 993 375	2 788 761
Длительность периода работы, доступного для анализа	8,73 суток	35 суток	69 суток	32 суток
Время в движении, ч	71,8	390,8	702	342
Техническая скорость, км/ч	8,93	35,78	53,68	36,52
Среднеквадратичная скорость, км/ч	9,79	40,02	61	40,04
Время работы на холостом ходу, %	66,93	49,9	47,9	45,1
Время работы на максимальной позиции, %	0,001 (0,6 мин)	0,16 (0,63 ч)	0,4 (2,98 ч)	1,1 (3,77 ч)
Полная мощность дизеля, кВт	993	2650	2942	2500
Средняя мощность ДГУ, кВт	67,93	822	808,3	928,8
КИМ ДГУ	0,068	0,31	0,27	0,37
Эксплуатационный КПД / КЭИ тягового генератора: - на тяговых позициях	0,75 / 0,79	0,92 / 0,96	0,914 / 0,958	0,944 / 0,99
- с учетом холостого хода	0,61 / 0,65	0,905 / 0,944	0,866 / 0,908	0,934 / 0,98
Эксплуатационный КПД / КЭИ выпрямительной установки	–	0,975 / 0,995	0,990 / 0,994	
Эксплуатационный КПД / КЭИ Инвертора напряжения	–	–	–	Недостаточно данных
Эксплуатационный КПД/КЭИ тяговых электродвигателей	0,36 / 0,43	0,856 / 0,936	0,88 / 0,947	Недостаточно данных
Средняя мощность на валу ТЭД, кВт	3,18	115	118,2	Недостаточно данных
Эксплуатационный КПИМ	0,02	0,26	0,24	Недостаточно данных
Перерасход дизельного топлива из-за отклонения параметров работы элементов электрической передачи мощности от номинальных значений, %	194	12	11	–

Из анализа энергоэффективности работы тепловозов в условиях эксплуатации получены следующие основные выводы:

- высокая доля времени работы дизельного двигателя на холостом ходу, 40...50 % времени независимо от рода службы;
- коэффициент полезного использования мощности для маневрового тепловоза составляет 0,02;
- коэффициент полезного использования мощности для магистральных тепловозов составил 0,24...0,3;
- управление передачей мощности по гиперболической характеристике увеличивает долю омических потерь во всех силовых элементах электрической передачи мощности;
- поддержание значения постоянного значения напряжения для каждой позиции (2ТЭ25А), позволило существенно уменьшить потери в синхронном тяговом генераторе, коэффициент эффективности использования составил 99 %, при этом эффективность использования аналогичного генератора на тепловозе ТЭП70БС составила 96 %.

Третья глава посвящена вопросам разработки научных основ повышения энергетической эффективности работы тягового оборудования в условиях эксплуатации автономных локомотивов и применения метода конечных элементов для проведения тяговых расчетов через изменение энергетического состояния поезда.

Концепция повышения энергетической эффективности автономных локомотивов заключается в разработке модульной конструкции, позволяющей оперативно осуществлять принцип масштабируемость нагрузки, т.е. способности распределенной системы легко расширять и сокращать свои ресурсы для адаптации к более тяжелым или более легким нагрузкам, а использование тягового и вспомогательного оборудования локомотива должно соответствовать текущим условиям работы локомотива.

На рисунке 9 представлена зависимость перерасхода дизельного топлива, в зависимости от используемой позиции контроллера машиниста, при выработке одного и того же количества энергии дизель-генераторной установкой тепловоза 2ТЭ25К^М.

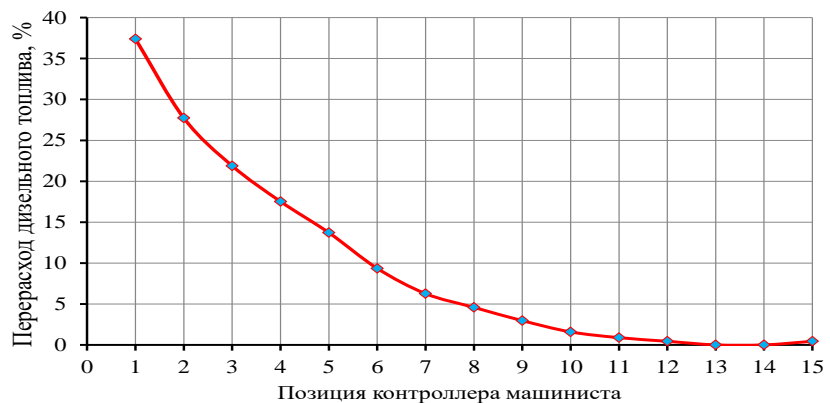


Рисунок 9 – Перерасход дизельного топлива в зависимости от позиции контроллера машиниста

Поэтому при разработке структурных схем перспективного автономного тягового подвижного состава должны учитывать следующие основные положения концепции повышения энергетической эффективности автономных локомотивов:

- применение модульных энергетических установок, позволяющих обеспечить требуемую мощность в соответствии с текущими условиями движения. Наиболее перспективным видится применение двух (для грузового локомотива)

и четырех (для пассажирского и маневрового локомотива) энергетических установок на одной секции локомотива. Применение двух энергетических установок на грузовых тепловозах обусловлено несколькими секциями тепловоза, т.е. для двухсекционного локомотива будет 4 энергетических установки, а для 3 секционного – 6 энергетических установок;

- применение общего звена постоянного напряжения с фиксированным значением напряжения (не менее 600 В) для всех режимов работы тягового и вспомогательного оборудования, что позволит выработать единые требования для разработки, проектирования и модульной структуры оборудования локомотива и обеспечить снижение доли потерь, зависящих от токовой нагрузки, кроме этого становится возможным использование тягового генератора в режиме стартера для запуска дизеля, и модернизированной штатной аккумуляторной батареи с тяговыми аккумуляторами как накопителя энергии, для кратковременных режимов нагружения;

- питание тяговых бесколлекторных двигателей осуществляется от статических тяговых преобразователей, подключенных к звену постоянного напряжения. Управление инверторами индивидуальное с поосным регулированием момента тяговых двигателей, с возможностью полного отключения;

- применение двухуровневого дискретно-адаптивного управления энергетической эффективностью автономного тягового подвижного состава при работе с неполной нагрузкой;

- питание вспомогательного оборудования должно обеспечиваться многоканальными статическими преобразователями с независимыми каналами, позволяющими индивидуально управлять каждым элементом вспомогательного оборудования, это позволит добиться упрощения и унификации преобразователей собственных нужд и снизить затраты энергии на привод вспомогательных машин и агрегатов;

- применение накопителей энергии целесообразно, только после обеспечения рациональных алгоритмов прямого и обратного электромеханического преобразования энергии в тяговых электрических машинах и рационального расхода энергии на собственные нужды, что требует сначала применения вышеизложенных основных положений.

Рассмотрена возможность применения многодизельной силовой установки для магистральных локомотивов на сети железных дорог ОАО «РЖД», для этого проведены исследования количества и общей продолжительности поездов (разгон-движение-остановка) для магистральных локомотивов, рассмотренных во второй главе диссертации, в зависимости от максимально используемой позиции контроллера машиниста. На рисунке 10 представлено семейство кривых скорости при движении тепловоза 2ТЭ25К^М с максимальной 5 ПКМ. В результате выявлено 87 поездов за рассматриваемый период с максимальной продолжительностью до 1,65 часа. Общее время таких поездов составило 25,62 часа.

Из результатов исследований видно, что применение двухдизельной энергетической установки на магистральных локомотивах целесообразно,

т.к. примерно в 30 % поездках грузового движения дизель-генераторная установка используется с КИМ не более 0,5, а в пассажирском – до 23 % поездок. Произведена оценка времени работы дизель-генераторных установок в составе модульного исполнения, результаты представлены в таблице 2.

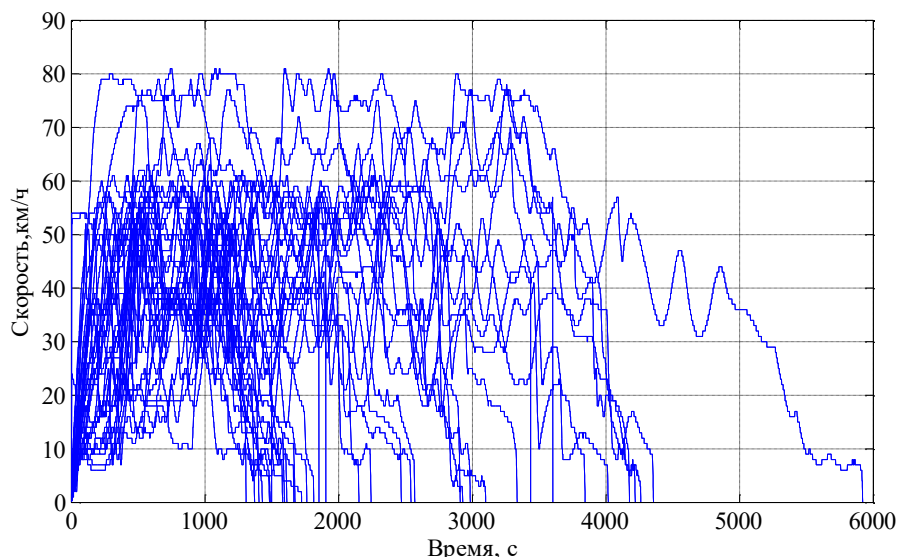


Рисунок 10 – Семейство кривых скорости при движении тепловоза 2ТЭ25К^М с максимальной 5 ПКМ

Причиной снижения энергоэффективности электрической передачи мощности является управление по напряжению, что приводит к увеличению токовой нагрузки тяговых электрических машин, и как следствие к существенному увеличению доли потерь, зависящих от квадрата тока.

$$\eta_{ТЭД} = 1 - \frac{I_{ТЭД}^2 \cdot r + \Delta P_{пост}}{I_{ТЭД} U_{DC}}, \quad (42)$$

где $I_{ТЭД}$ – ток тягового двигателя; U_{DC} – напряжение на зажимах канала выпрямительной установки; $\Delta P_{пост}$ – величина условно-постоянных потерь.

Из формулы (42) видно, что при применении регулирования по напряжению, изменяется подводимая мощность, но при этом потери мощности в электрической машине остаются такими же, что приводит к существенному снижению энергоэффективности тяговых электрических машин (тягового генератора и тягового двигателя). Применение дискретно-адаптивного управления количеством тяговых двигателей в работе позволит рационально использовать доступную мощность каждого тягового двигателя.

Функциональная схема энергоэффективной передачи мощности, на примере тепловоза, приведена на рисунке 11. В соответствии с функциональной схемой энергоэффективной передачи мощности тепловоза предусмотрено общее звено постоянного напряжения, к которому подключаются всё тяговое оборудование, такое решение позволяет реализовать принцип модульной структуры, можно использовать две, как показано на рисунке 11, или четыре энергетических установки, работающих на общее звено постоянного напряжения. Окончательный выбор количества ДГУ обусловлен условиями профиля пути, потока грузоперевозок и родом службы локомотива. От звена постоянного напряжения, через многоканальные управляемые преобразователи собственных нужд получают питание электрические машины собственных нужд.

Таблица 2 – Время работы модулей ДГУ для различного исполнения

Вариант модульной ДГУ		Время работы модулей ДГУ, %		
		2ТЭ25КМ	2ТЭ25А	ТЭП70БС
двухдизельная	1 ДГУ (0,5 P _Н)	73	58	60
	2 ДГУ (1,0 P _Н)	27	42	40
трехдизельная	1 ДГУ (0,25 P _Н)	55	48	51
	2 ДГУ (0,5 P _Н)	18	10	9
	3 ДГУ (1,0 P _Н)	27	42	40
четырёхдизельная	1 ДГУ (0,25 P _Н)	55	48	51
	2 ДГУ (0,5 P _Н)	18	10	9
	3 ДГУ (0,75 P _Н)	17	19	18
	4 ДГУ (1,0 P _Н)	10	23	22

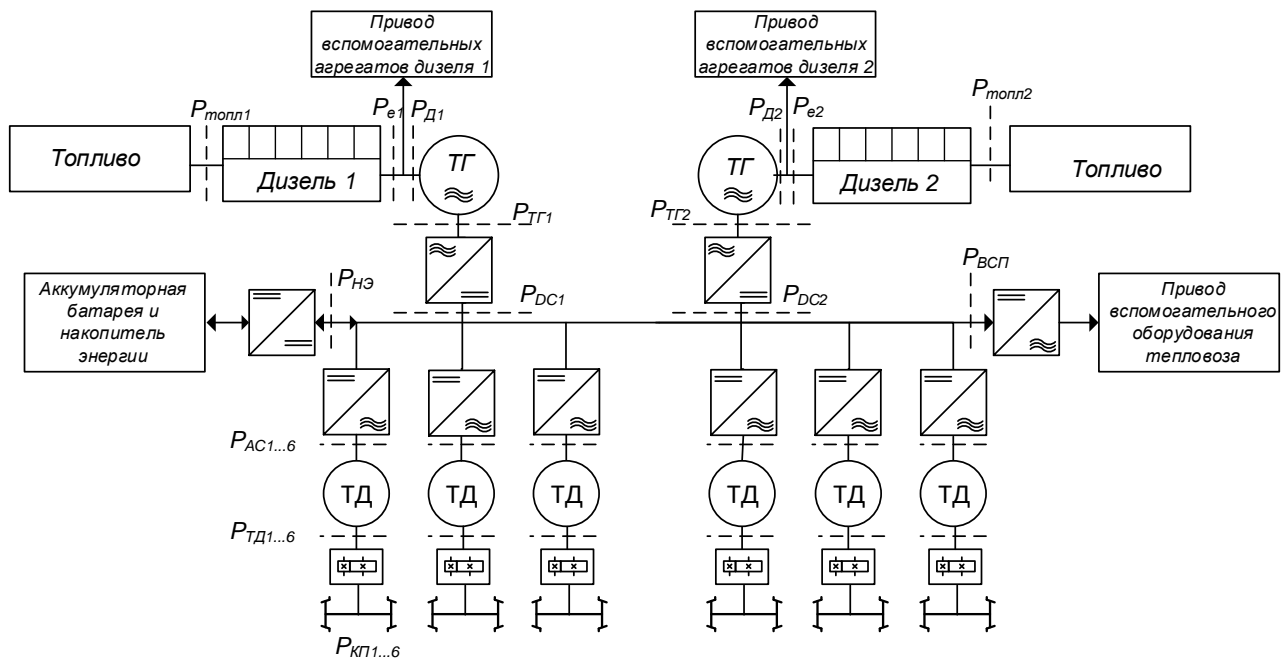


Рисунок 11 – Функциональная схема энергоэффективной ЭПМ

От звена постоянного напряжения, через DC-DC преобразователь получает питание аккумуляторная батарея и цепи управления локомотивом, так же DC-DC преобразователь предназначен для преобразования напряжения при использовании накопителя энергии, небольшой емкости, для обеспечения кратковременных режимов работы, с целью исключить непродолжительные запуски второй или последующей энергетической установки локомотива. Таким образом, в энергоэффективной передаче мощности локомотива должны использоваться не только современные бесколлекторные электрические машины, но и должно быть реализовано управление энергетической эффективностью тягового и вспомогательного оборудования путем многоуровневой оптимизации режимов работы оборудования (модульная энергетическая установка, тяговые двигатели, вспомогательное оборудование) в условиях реальной эксплуатации, что позволит значительно повысить энергоэффективность автономного тягового подвижного состава.

Потребности в энергоэффективном управлении движении поездов с локомотивами с дискретно-адаптивным управлением энергетической эффектив-

ностью тягового оборудования требует разработки новых, комплексных для участка пути, методов расчета движения одного поезда или нескольких поездов на участке, в том числе и с применением технологий «виртуальной автосцепки», где основной задачей должно являться не поддержание фиксированного расстояния между поездами, а обеспечение безопасности движения при энергоэффективном ведении поездов. Из теории тяги поездов известно, что движение поезда описывается дифференциальным уравнением движения, а методы расчета энергооптимальных расчетов направлены на минимизацию энергии, таким образом, многовариантная задача поиска рациональной траектории движения поезда может быть однозначно решена методом конечных элементов, что является, безусловно, новым направлением в развитии методов теории тяги поездов, первые основы которой были заложены ещё в 1813 году англичанином Уильямом Гедли, а в настоящее время используются классические методы расчета, основанные на решении уравнения движения поезда в форме задачи Коши.

В общем виде при постановке задачи минимизации энергопотребления вводится ряд ограничений, при соблюдении которых, должна выполняться минимизация энергоресурсов:

- соблюдение графика движения, что фактически означает фиксацию времени хода по перегону

$$t_{\Sigma} = \text{const.} \quad (43)$$

- нормирование значений скорости и ускорения, как при разгоне, во время следования поезда по участку, что обусловлено обязательным соблюдением требований безопасности движения

$$|V| \leq [V], \quad |a| \leq [a]. \quad (44)$$

Тогда задача минимизации энергопотребления, при соблюдении ряда ограничений, записывается в следующем виде

$$E_{\Sigma} = \int_0^{t_{\Sigma}} P_{\text{потр}} dt \rightarrow \min, \quad (45)$$

где $P_{\text{потр}}$ – мгновенное значение мощности потребляемой локомотивом.

С другой стороны полная энергия E рассматриваемого поезда или системы представляется как функция m неизвестных узловых перемещений кривой скорости, тогда согласно вариационному принципу Лагранжа возможно образование системы m линейных алгебраических уравнений задачи

$$\frac{\partial E}{\partial V_i^0} = 0. \quad (46)$$

Тогда задача расчета рациональной траектории движения поезда сводится к разбиению области координатно-скоростной плоскости возможного нахождения поезда на конечные элементы, формирование системы линейных алгебраических уравнений равновесия и определение узловых перемещений траектории движения поезда на координатно-скоростной плоскости. При этом движение поезда рассматривается как изменение энергетического состояния системы зависящего от профиля пути, скорости движения, сил сопротивления движению, режимов работы тягового и вспомогательного оборудования. Переход из одного энергетического состояния в другое осуществляется с учетом потерь энергии

при ее преобразовании и возможно лишь с учетом соблюдения ряда ограничений: ограничения по сцеплению, ограничения по доступной мощности, ограничения по торможению, кроме того существует ряд постоянных действующих ограничений по максимальной скорости движения. Целевой функцией является траектория движения поезда с минимальными затратами энергоресурсов на преодоление заданного участка.

Для каждой точки координатно-скоростной плоскости возможного нахождения поезда определяется энергетическое состояние поезда, т.е. каким количеством полной энергии должен обладать рассматриваемый поезд, чтобы оказаться в данной точке (рисунок 12).

$$E_{i,j}(s, V) = \Pi_{i,j}(s) + T_{i,j}(V), \quad (47)$$

где $i \in s, j \in V$.

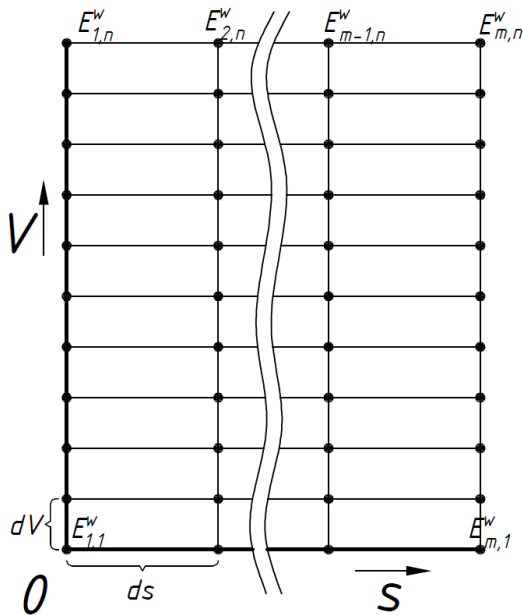


Рисунок 12 – Расчет энергетического состояния поезда в координатно-скоростной плоскости

Расчет осуществляется с учетом изменения кинетической энергии, при переходе на следующий элементарный отрезок пути на величину элементарной работы сил сопротивления движению поезда при заданной скорости, т.е.

$$dT_W = - \frac{(W_o + W_d) \cdot ds}{1000}, \quad (48)$$

где W_o – сила основного сопротивления движению поезда; W_d – сила дополнительного сопротивления движению поезда, за исключением сил дополнительного сопротивления от профиля пути.

Работа сил дополнительного сопротивления от профиля пути учитывается при определении изменения потенциальной энергии поезда, т.к.

$$d\Pi = m \cdot g \cdot (h(s + ds) - h(s)). \quad (49)$$

Что эквивалентно элементарной работе сил дополнительного сопротивления от профиля пути

$$A_{W_i} = \frac{W_i \cdot ds}{1000}, \quad (50)$$

где W_i – сила дополнительного сопротивления от профиля пути

Формирование карты энергетического состояния поезда (рисунок 12) происходит для всего диапазона скоростей и всего участка пути, т.е.

$$[E] = \{\Pi\} \times [V1] + \{S1\} \times [T], \quad (51)$$

где $\{\Pi\}$ – матрица-столбец потенциальной энергии для рассматриваемого участка; $[T]$ – матрица-строка кинетической энергии поезда; $[V1]$ – единичная матрица-строка, с размерностью равной матрице $[T]$; $\{S1\}$ – единичная матрица-столбец, с размерностью равной матрице $\{\Pi\}$.

Принимаем, что полная энергия поезда в начале координат равна некоторой величине потенциальной энергии, определенной через высоту над уровнем моря. Для примера приведен расчет энергетической карты для участка реально-го профиля пути Лихая – Ростов-Главный (рисунок 13).

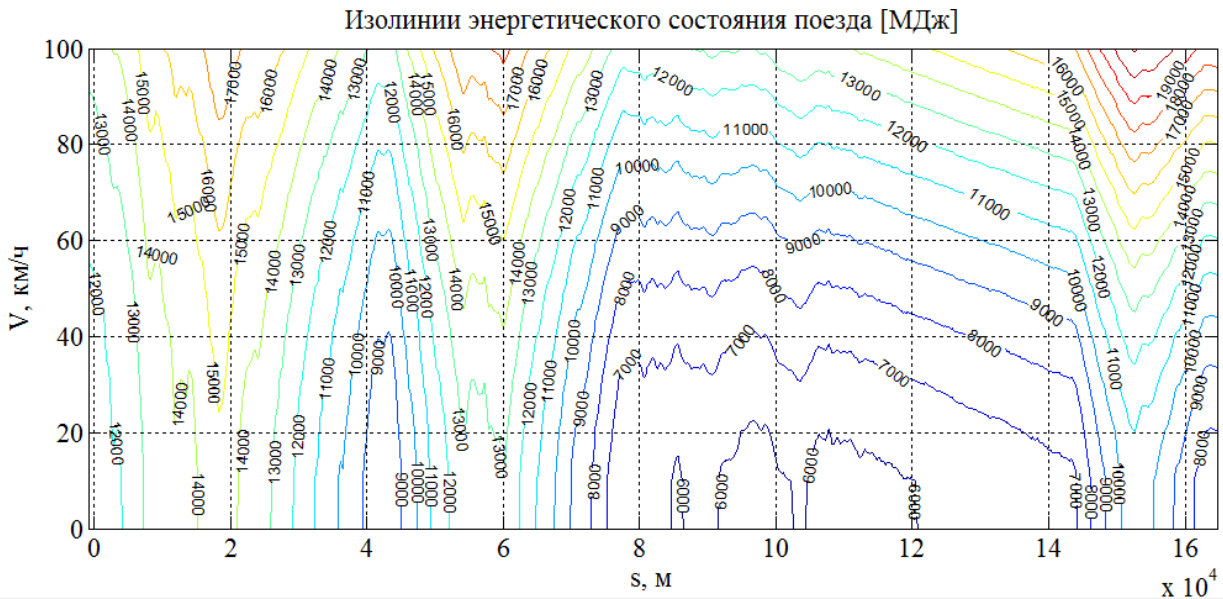


Рисунок 13 – Изолинии энергетического состояния поезда для участка Лихая – Ростов-Главный

Изолинии энергетического состояния (рисунок 13) удобно использовать при определении режимов движения поезда, т.е. составления режимной карты. Каждая изолиния представляет собой кривую изменения скорости для режима выбега. Переход с одной изолинии на другую возможен в режиме тяги (увеличение энергии) или торможения (уменьшение энергии). Максимально возможное изменение энергии определяется тягово-тормозными средствами поезда, а при частичных режимах определяется необходимый режим через необходимое изменение энергии.

Энергия поезда, с учетом затрачиваемой работы со стороны сил трения, для его нахождения в произвольной точке координатно-скоростной плоскости определяется по формуле

$$E_{i,j}^w = E_{i,j} - \frac{(W_o(V) + W_d(s)) \cdot (s_i - s_{i-1})}{1000} \quad (52)$$

Энергия поезда на координатно-скоростной плоскости, при движении в режиме тяги или торможения на элементарном участке $s_{i-1} - s_i$ определяется по формуле

$$E_{i,j}^{F(B)w} = E_{i-1,j}^w + (F_{Kj}(V) - k_B \cdot B_T(V)) \cdot \frac{(s_i - s_{i-1})}{1000} - (E_{i,j}^w - E_{i-1,j}^w) \quad (53)$$

где $F_K(V)$ – касательная сила тяги, реализуемая на ободе колеса; $B_T(V)$ – тормозная сила поезда; k_B – коэффициент, учитывающий режим работы пневматических тормозов (для экстренного торможения $k_B = 1$, для полного служебного торможения $k_B = 0,5$, для регулировочного торможения $k_B = 0,1 \dots 0,4$).

Четвертая глава посвящена вопросам разработки комплексной компьютерной модели автономного локомотива с модульной структурой электрической передачи мощности. Для детального исследования процессов в электрической передаче мощности разработана математическая модель, реализованная при помощи современных компьютерных программ (MATLAB/Simulink, Универсальный механизм, FEMM). Компьютерная модель дизеля основана на моделировании его внешних характеристик, приведенных в технической документации. Процессы преобразования энергии в магнитной системе электрических машин рассматриваются на основе энергетического метода, где энергия, поступающая из источника в электрическую машину, расходуется на потери (на активном сопротивлении фаз, в магнитопроводе, механические), и на приращение энергии магнитного поля и совершение механической работы

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_{co}(i_n, \theta)}{\partial i_n} \right) + R_n \cdot i_n = u_n, n \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (54)$$

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = \frac{\partial W_{co}(i, \theta)}{\partial \theta} - T_L, \quad (55)$$

$$W_{co}(i_n, \theta) = \sum_{n=1}^N \int_0^{i_n} \psi_n(i_1, \dots, i_N, \theta) di_n. \quad (56)$$

Компьютерная модель электрической машины реализована в программном комплексе MATLAB/Simulink блоком, разработанным автором с определением потерь в фазных обмотках и магнитопроводе, расчет кривых намагничивания осуществляется в программном комплексе FEMM.

Модель статического преобразователя, выполнена в программном комплексе MATLAB/Simulink, на основе стандартных силовых элементов библиотеки SimPowerSystems, а для изучения вопросов связанных с определением потерь разработан дополнительный блок, определяющий потери, как в IGBT модуле, так и в обратном диоде.

При моделировании экипажной части локомотива применен подход к ее представлению через систему абсолютно твердых тел, связанных между собой силовыми упругими и демпфирующими элементами с определенными свойствами в программном комплексе «Универсальный механизм». С помощью инструмента UM CoSimulation модель механической части экспортируется из Универсального механизма и включается в модель MATLAB/Simulink.

На рисунке 14 представлена основная структура компьютерной модели тягового канала. Удобство программы MATLAB/Simulink заключается в том, что данная модель может быть легко адаптирована к любому автономному тяговому подвижному составу. Возможно подключение неограниченного количества электрических машин к звену постоянного напряжения, или накопителей энергии. Модель предусматривает выведение основных параметров исследуемой системы (ток, напряжение, момент, мощность и т.д.) в качестве графиков.

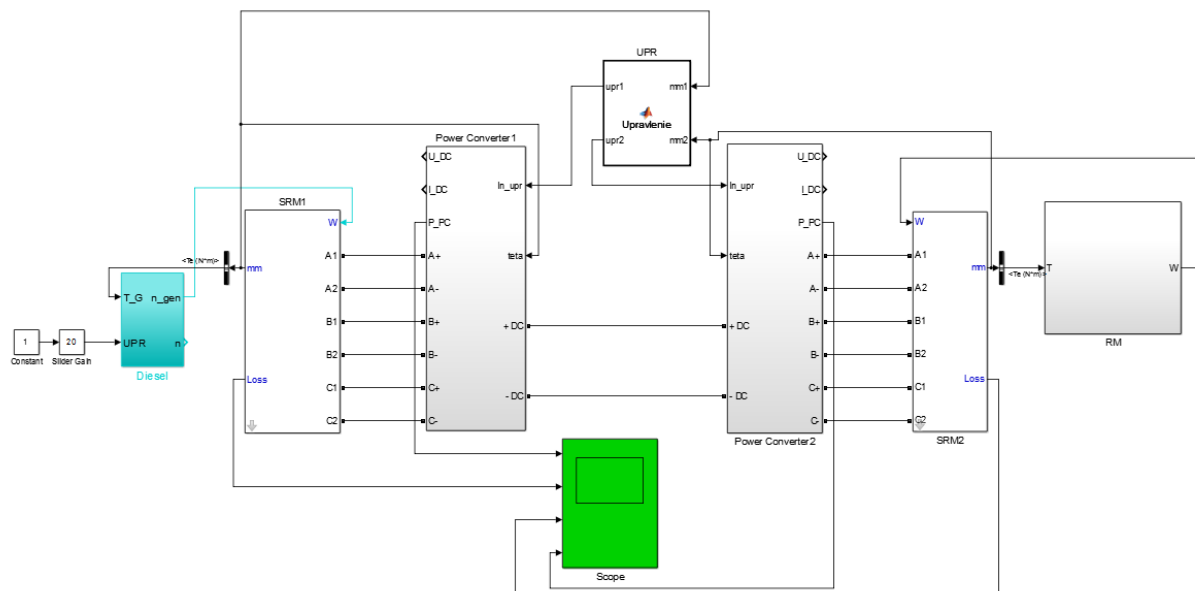


Рисунок 14 – Компьютерная модель тягового модуля передачи мощности автономного тягового подвижного состава

В результате проведенных теоретических исследований электромагнитных процессов на математической модели, определены параметры управления бесколлекторным тяговым приводом, обеспечивающие условия эффективности процессов электромеханического преобразования энергии.

Пятая глава посвящена вопросам разработки макета тягового модуля электрической передачи мощности и проведению экспериментальных исследований. Для проведения испытаний разработан и изготовлен стенд (рисунок 15) в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» по соглашению о предоставлении субсидии от 27 июня 2014 г. № 14.576.21.0036 «Разработка научно-технических решений для создания энергосберегающей электрической передачи мощности транспортных средств с реактивными индукторными электрическими машинами» АО «Научно-техническим центром «ПРИВОД-Н», в здании Лабораторно-экспериментального корпуса г. Новочеркасск.

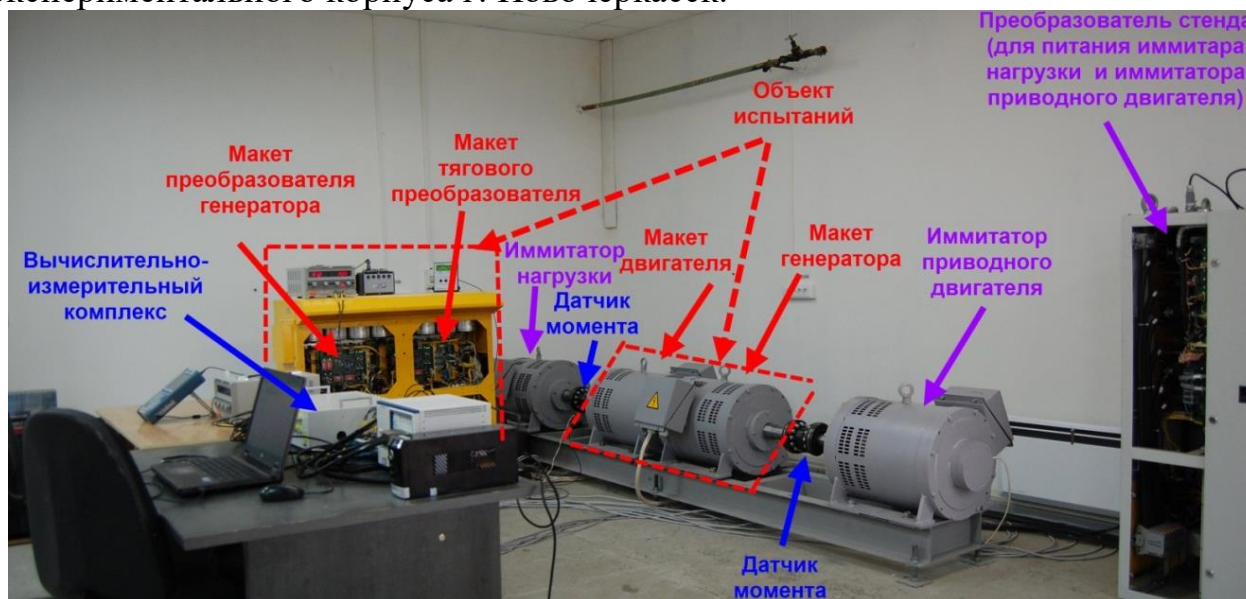


Рисунок 15 – Стенд для экспериментальных исследований

По результатам испытаний проведен анализ полученных данных и построены графики зависимостей КПД от частоты вращения. На рисунке 16 приведена зависимость максимального КПД макета системы электрической передачи мощности с реактивными индукторными электрическими машинами $\eta_{ЭПМ}$, макета тягового двигателя $\eta_{д}$ и тягового преобразователя $\eta_{ТП}$ от частоты вращения.

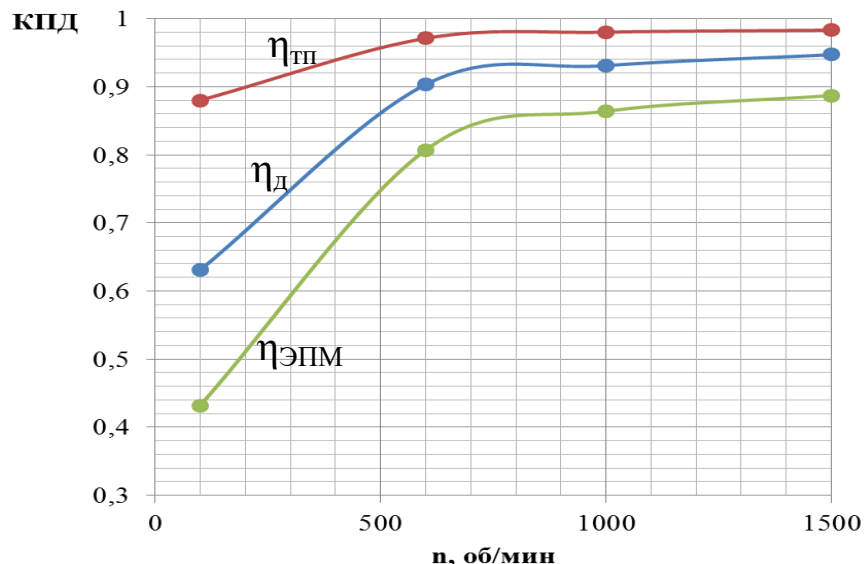


Рисунок 16 – Зависимость максимального КПД макета системы электрической передачи мощности, макета тягового двигателя и тягового преобразователя от частоты вращения макета тягового двигателя

В ходе проведенных экспериментальных исследований установлена возможность достижения КПД электрической передачи мощности равного 0,887. Механическая мощность на валу макета генератора составила 49,5 кВт, а выходная механическая мощность на валу макета двигателя составила 43,9 кВт.

Для подтверждения адекватности компьютерной модели проведен анализ и сопоставление результатов испытаний с результатами теоретических исследований. За основу взяты расчетные контурные графики КПД и на них нанесены данные, полученные в ходе испытаний (рисунок 17). Зеленой ячейкой обозначен максимальный КПД, полученный в ходе испытаний на данной частоте вращения ротора макета реактивного индукторного генератора.

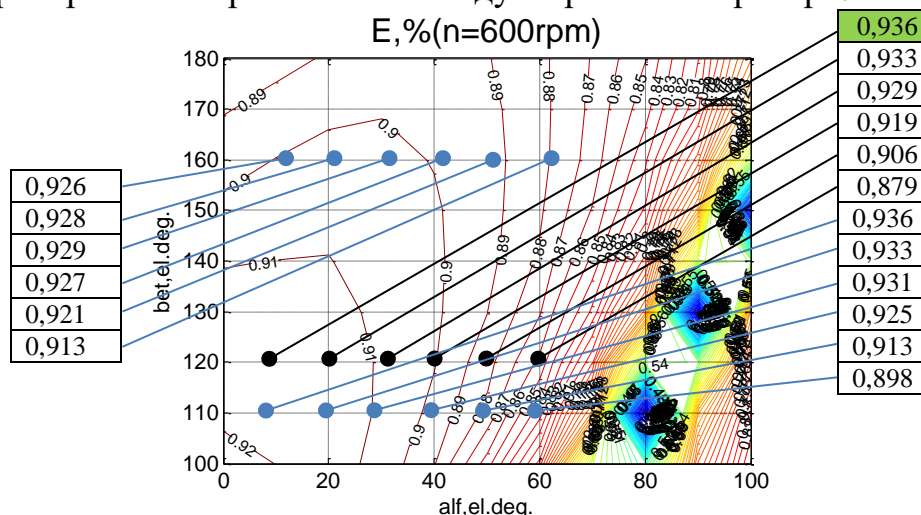


Рисунок 17 – Сопоставление КПД результатов расчета и испытаний макета реактивного индукторного генератора ($n_p = 600$ об/мин)

Шестая глава посвящена вопросам разработки и исследованию энергоэффективных электрических передач мощности с бесколлекторными электрическими машинами предназначенных для маневровых локомотивов коллек-

тивом АО «НТЦ ПРИВОД-Н», при непосредственном участии автора настоящей диссертационной работы. Результаты исследований использовались в проекте модернизации тепловоза ТГМ6А, который ведется компаниями АО «ЕВРАЗ НТМК», ООО «Русэлпром», ООО «ПромЭлКом» и АО «НТЦ «ПРИВОД-Н». При модернизации тепловоза с гидравлической передачей мощности производится замена всего энергетического и тягового оборудования на двухдизельную энергетическую установку с комплектом тягового электрооборудования (КТЭО), состоящего из двух тяговых асинхронных генераторов (ТАГ) с двумя блоками силовой электроники (БСЭ) и двух тяговых реактивных индукторных двигателей ТРИД-320 со статическим преобразователем БПС-640 для питания двух двигателей.

Для подтверждения энергоэффективности предложенной концепции масштабируемости используемого тягового оборудования проведены комплексные испытания разработанного КТЭО электрической передачи мощности тепловоза на Сафоновском электромашиностроительном заводе (рисунок 18).

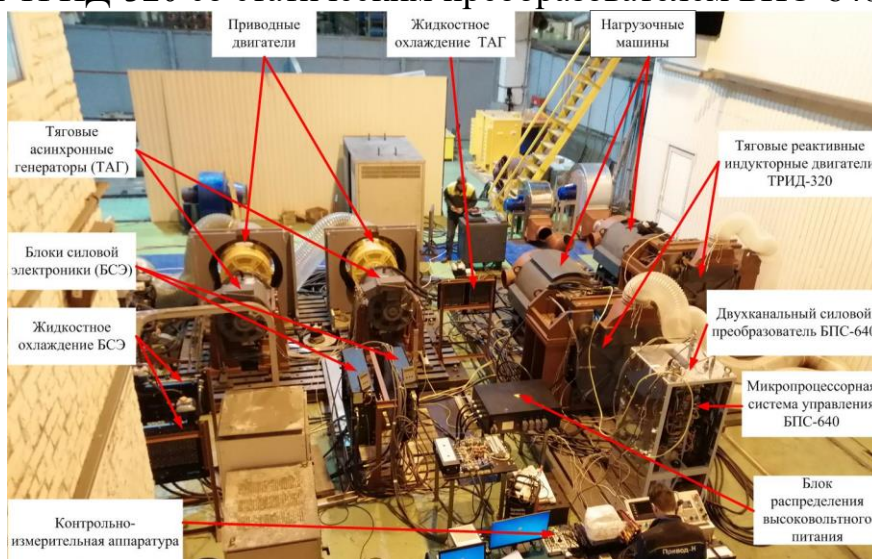


Рисунок 18 – Испытания комплекта тягового электрооборудования электрической передачи мощности тепловоза на Сафоновском электромашиностроительном заводе

Результаты расчетных и экспериментальных исследований подтвердили разработку энергоэффективного тягового привода маневрового тепловоза с рациональным алгоритмом управления КПД, как тягового двигателя 94,6 %, так и всей электрической передачи мощности в целом 85,4 %. Для сравнения: КПД коллекторного ТЭД ЭД-133У1 тепловоза ТЭМ103 при расчетной скорости движения составляет 84,5 %, а для ТЭД ЭД-118А/ЭДУ-133П тепловоза ТЭМ18ДМ – 85,3 %, КПД асинхронного двигателя ДАТ-305 составляет 91 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании выполненного анализа современного состояния проблемы эффективности эксплуатации автономных локомотивов установлено, что энергоэффективность локомотивов нормируется только для полной мощности дизель-генераторной установки, а эффективность эксплуатации оценивается по удельному расходу топлива на единицу перевозочной работы, и чем ниже нагрузка на ось вагона, тем больше удельный расход дизельного топлива, а значит, повышение энергоэффективности, не может быть достигнуто только лишь за счет создания новых мощных локомотивов, и особое внимание стоит уделять режимам работы тягового оборудования локомотивов, что позволит привести в соответствие мощностные характеристики к условиям эксплуата-

ции.

2. Аналитическим путем установлены закономерности, позволяющие определить КПД тягового электрического оборудования локомотивов, в зависимости от тока и выходной/входной мощности. Доказано, что регулирование по напряжению, приводит к существенному снижению энергоэффективности тяговых электрических и электромеханических преобразователей энергии на автономных локомотивах с электрической передачей мощности.

3. Путем применения энергетического подхода разработана и теоретически обоснована методология оценки энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов с электрической передачей мощности на основе паспортных данных тягового оборудования и параметров, получаемых с регистраторов локомотивов.

4. На основании проведенного анализа эксплуатационных данных установлено, что дизель-генераторная установка грузовых, пассажирских и маневровых локомотивов продолжительное время работает с нагрузками менее 50 %, это обуславливает необходимость применения многодизельных энергетических установок для локомотивов всех видов движения. Определены условия работы элементов электрической передачи мощности и выявлено недоиспользование энергоэффективности преобразования энергии, особенно в передачах постоянного и переменного-постоянного тока, за счет низкого коэффициента использования мощности дизель-генераторной установки и электрической передачи мощности в целом.

5. На основе проведенных теоретических исследований определена качественная закономерность увеличения энергетической эффективности тягового оборудования автономного локомотива, которая наблюдается при увеличении коэффициента эффективного использования оборудования, что позволяет для локомотивов, оснащенных многодвигательным тяговым приводом, применить алгоритм, обеспечивающий стабилизацию мгновенного значения КПД при частичной нагрузке локомотива на уровне, близком к значению КПД номинального режима.

6. Путем применения разработанной методологии оценки энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов и анализа полученных результатов, разработана, обоснована и сформулирована концепция повышения энергетической эффективности, в основе которой лежит принцип масштабируемости используемого тягового оборудования автономного локомотива в зависимости от условий эксплуатации.

7. Теоретически обосновано применение метода конечных элементов для проведения тяговых расчетов, позволяющего расширить существующие методики проведения тяговых расчетов с целью построения оптимальных траекторий движения поезда с учетом режимов работы тягового оборудования автономных локомотивов.

8. Экспериментально доказана достоверность и адекватность принятых научных положений при разработке комплексной компьютерной модели автономного локомотива с модульной структурой электрической передачи мощности сопоставлением теоретических результатов расчета на компьютерной модели и результатов экспериментальных исследований макета тягового модуля

электрической передачи мощности.

9. Теоретические и экспериментальные результаты диссертационного исследования нашли практическое применение при разработке комплекта тягового электрооборудования электрической передачи мощности автономного локомотива. Применение предлагаемой концепции модульной структуры тягового оборудования совместно с бесколлекторными тяговыми электрическими машинами позволило обеспечить необходимые тяговые характеристики с высокими значениями КПД (для маневрового локомотива), как тягового двигателя до 94,6 %, так и всей электрической передачи мощности в целом 85,4 %, что подтверждено на экспериментальном образце комплекта тягового электрооборудования электрической передачи мощности автономного локомотива.

10. Результаты использованы при модернизации тягового привода маневрового тепловоза серии ТГМ6А, что позволило получить высокие тягово-энергетические характеристики модернизированного тепловоза ТЭМП-1тт. Приемочные и квалификационные тяговые испытания тепловоза ТЭМП-1тт подтвердили экономию дизельного топлива до 30 % и повышение производительности на 25 %.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме диссертации. Полученные результаты исследований могут быть использованы при разработке требований к перспективным электрическим передачам мощности локомотивов с бесколлекторным тяговым приводом с микропроцессорными системами управления. Для обеспечения максимальной энергоэффективности использования тягового подвижного состава важна разработка методов энергоэффективного управления многодизельным и многодвигательным тяговым подвижным составом для условий реальной эксплуатации. Применение метода конечных элементов для проведения тяговых расчетов открывает перспективу разработки систем автоматического оптимального управления локомотивами, с системой дискретно-адаптивного управления энергоэффективностью и многодизельными энергетическими установками.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в рецензируемых научных журналах,
рекомендованных ВАК и в международных базах Scopus и WoS*

1. **Гребенников, Н. В.** Метод снижения потерь электроэнергии в тяговых двигателях автономного локомотива за счет применения дискретно-адаптивного управления / Н. В. Гребенников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1(89). – С. 234-240. (К2)

2. **Гребенников, Н. В.** Определение коэффициента полезного действия выпрямительной установки локомотива / Н. В. Гребенников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 541-543. (К2)

3. **Гребенников, Н. В.** Определение коэффициента полезного действия тяговых электрических машин локомотивов в условиях эксплуатации / Н. В. Гребенников // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 4. – С. 31-38. (К2)

4. **Гребенников, Н. В.** Анализ энергетической эффективности эксплуатации пассажирского тепловоза ТЭП70БС / Н. В. Гребенников // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 5(95). – С. 17-22. (К3)

5. Киреев, А. В. Модернизация маневровых тепловозов ТГМ6А: повышение топливной экономичности / А.В. Киреев, Н.М. Кожемяка, **Н. В. Гребенников** // Вестник Института

- проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2022. – № 4(60). – С. 56-61. (К3)
6. **Гребенников, Н. В.** Карта энергетического состояния поезда / Н. В. Гребенников // Вестник РГУПС. – 2021. – № 3(83). – С. 64-72. (К2)
7. Киреев, А. В. Создание бесколлекторного тягового индукторного привода маневрового тепловоза / А. В. Киреев, Н. М. Кожемяка, **Н. В. Гребенников** // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2021. – № 4(56). – С. 38-44. (К3)
8. **Гребенников, Н. В.** Математическая модель для анализа электромагнитных процессов в реактивных индукторных машинах с сильным взаимным влиянием фаз / Н. В. Гребенников // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16. – № 2. – С. 315-321. (К2)
9. Чавычалов, М. В. Оптимизация магнитопровода линейного вентильно-индукторного генератора / М. В. Чавычалов, **Н. В. Гребенников**, М. Н. Жулькин // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2019. – № 6. – С. 32-36. (К3)
10. Определение полезной работы, совершаемой локомотивом при тяге поезда / А. А. Зарифьян, **Н. В. Гребенников**, Т. З. Талахадзе, В. В. Сироткин // Вестник РГУПС. – 2018. – № 1(69). – С. 40-49. (К2)
11. Зарифьян, А. А. Концепция повышения энергетической эффективности тепловозной тяги / А. А. Зарифьян, **Н. В. Гребенников**, Т. З. Талахадзе // Интернет-журнал «Науковедение» – 2017. – Т. 9. – № 6. – С. 107. (К1)
12. **Гребенников, Н. В.** Определение потерь в силовой электронике преобразователя вентильно-индукторной машины / Н. В. Гребенников, М. В. Чавычалов // Вестник РГУПС. – 2018. – № 2(70). – С. 16-21. (К2)
13. **Гребенников, Н. В.** Методы компьютерного моделирования электропривода с реактивной индукторной машиной / Н. В. Гребенников // Вестник РГУПС. – 2017. – № 4(68). – С. 178-184. (К2)
14. Харченко, П. А. Разработка компьютерной модели пассажирского поезда на основе данных современных средств регистрации параметров движения / П. А. Харченко, **Н. В. Гребенников** // Вестник РГУПС. – 2016. – № 2(62). – С. 38-46. (К2)
15. Оценка энергоэффективности электрической тяги методами компьютерного моделирования / А. А. Зарифьян, **Н. В. Гребенников**, В. В. Зак [и др.] // Вестник ВЭЛНИИ. – 2013. – № 1. – С. 24-37.
16. **Гребенников, Н. В.** Динамика и энергоэффективность пассажирского вагона, оснащенного вентильно-индукторным генератором / Н. В. Гребенников, А. А. Зарифьян // Вестник РГУПС. – 2012. – № 4(48). – С. 15-21. (К2)
17. **Гребенников, Н. В.** Переходные электромеханические процессы при работе подвагонного вентильно-индукторного генератора / Н. В. Гребенников, А. А. Зарифьян // Вестник ВЭЛНИИ. – 2011. – № 2. – С. 93-103.
18. **Гребенников, Н. В.** Влияние изменения числа фаз подвагонного вентильно-индукторного генератора на его эксплуатационные характеристики при неизменной конфигурации статора / Н. В. Гребенников // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 2. – С. 17-21. (К1)
19. Петрушин, А. Д. Выбор типа электродвигателя безредукторного исполнения для электропоезда / А. Д. Петрушин, **Н. В. Гребенников**, А. П. Пиотровский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 4. – С. 49-53. (К2)
20. **Гребенников, Н. В.** Компьютерная модель экипажной части грузового тепловоза / Н. В. Гребенников, А. В. Козубенко // Вестник РГУПС. – 2010. – № 4. – С. 35-41. (К2)
21. Подвагонный вентильно-индукторный генератор / О. А. Ворон, **Н. В. Гребенников**, А. А. Зарифьян, А. Д. Петрушин // Вестник ВЭЛНИИ. – 2009. – № 1. – С. 132-143.
22. **Grebennikov, N.**, Determination of Energy Consumption for Train Traction / N. Grebennikov, A. Shapshal // In: Guda, A. (eds) Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. NN 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 509. Springer, Cham., 2022. – P. 127-135. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-11058-0_13

23. **Grebennikov, N.** Reactive inductor machines on transport / N. Grebennikov, A. Kireev // *Journal of Physics Conference Series*. – 2021. – Vol. 2021. – № 2131. – P. 1-8. – DOI 10.1088/1742-6596/2131/2/022043.
24. Tchavychalov, M. V. SRM simulation with reduced amount of initial information / M. V. Tchavychalov, **N. V. Grebennikov**, D. V. Trinz // *Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi, 18–22 мая 2020 года*. – Sochi : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 1-6. – DOI 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112075.
25. Kireev, A. V. Energy-regenerative Shock Absorber Mathematical Model / A. V. Kireev, N. M. Kozhemyaka, **N. V. Grebennikov** // *Procedia Engineering : International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017, Saint-Petersburg, 16–19 May 2017 year*. – Saint-Petersburg: Elsevier Ltd, 2017. – P. 1741-1746. – DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.707.
26. **Grebennikov, N. V.** Calculation of core losses in switched reluctance motor with strong mutually coupling between phases / N. Grebennikov // *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019, Sochi, 25–29 March 2019*. – Sochi, 2019. – P. 1-6. – DOI 10.1109/ICIEAM.2019.8743038.
27. **Grebennikov, N. V.** Computer model for analyzing electromagnetic processes in switched reluctance machines with strong mutual inter-phase electromagnetic influence / N. Grebennikov, M. Tchavychalov, T. Talakhadze // *Proceedings - 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019, Sochi, 08–14 сентября 2019 года*. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 8867802. – DOI 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867802.
28. **Grebennikov, N. V.** Control system designed for electromagnetic suspension of high-speed vacuum transportation / N. Grebennikov, A. Kireev, A. Lebedev // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2017. – Vol. 12. – № 16. – C. 5485-5487.
29. **Grebennikov, N. V.** Development of switched reluctance machines model in MATLAB/Simulink / N. Grebennikov, A. Lebedev // *Journal of Engineering and Applied Science*. – 2016. – Vol. 11. – № 6. – C. 1434-1438. – DOI 10.36478/jeasci.2016.1434.1438
30. **Grebennikov, N. V.** Equivalent magnetic circuit for switched reluctance motor with strong mutual coupling between phases / N. Grebennikov, T. Talakhadze, A. Kashuba // *2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives, IWED 2019 - Proceedings : 26, Moscow, 30 января – 02 2019 года*. – Moscow, 2019. – P. 1-6. – DOI 10.1109/IWED.2019.8664226.
31. **Grebennikov, N. V.** Loss detection in converter power electronics of a switched reluctance machine / N. Grebennikov, A. Lebedev // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 13. – № 21. – P. 8935-8938. – DOI 10.3923/jeasci.2018.8935.8938.
32. **Grebennikov, N. V.** Mathematical model of linear switched reluctance motor with mutual inductance consideration / N. V. Grebennikov, A. V. Kireev, N. M. Kozhemyaka // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. – 2015. – Vol. 6. – № 2. – P. 225-232. – DOI 10.11591/ijpeds.v6.i2.pp225-232.
33. **Grebennikov, N. V.** Versions of switched reluctance generator design at a constant stator configuration / N. V. Grebennikov, A. V. Kireev // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. – 2015. – Vol. 6. – № 1. – P. 65-69. – DOI 10.11591/ijpeds.v6.i1.pp65-69.
34. **Grebennikov, N. V.** Analytic model of electromagnetic processes in switched reluctance machines 18/15 configuration / N. Grebennikov, A. Kireev // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2015. – Vol. 10. – № 2. – P. 28-32. – DOI 10.3923/jeasci.2015.28.32.
35. Increasing the Energy Efficiency of Rail Vehicles Equipped with a Multi-Motor Electrical Traction Drive / A. Zarifyan, **N. Grebennikov**, T. Talakhadze [et al.] // *2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives, IWED 2019 - Proceedings : 25, Moscow, 30.01.2019 year*. – Moscow, 2019. – P. 1-6. – DOI 10.1109/IWED.2019.8664283.
36. **Grebennikov, N.** Development of a computer model of a passenger train using data from devices for train operation parameters registration / N. Grebennikov, P. Kharchenko // *Proceedings - 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufactur-*

ing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 мая 2021 года. – Sochi, 2021. – P. 908-913. – DOI 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446415.

Патенты

37. Патент № 2450410 С1 Российская Федерация, МПК H02K 19/10, H02K 19/24. Реактивная коммутируемая электрическая машина с поворотной симметрией : № 2011107631/07 : заявл. 28.02.2011 : опубликовано 10.05.2012 / А. Д. Петрушин, **Н. В. Гребенников** – 8 с.

38. Патент № 2529306 С1 Российская Федерация, МПК B60L 11/08. Электромеханическая трансмиссия : № 2013105359/11 : заявл. 07.02.2013 : опубликовано 27.09.2014 / А. В. Киреев, **Н. В. Гребенников**, Г. Н. Кононов [и др.] – 8 с.

39. Патент на полезную модель № 133059 U1 Российская Федерация, МПК B60L 11/08. Схема электрической передачи мощности (варианты) : № 2013115778/11 : заявл. 08.04.2013 : опубликовано 10.10.2013 / А. В. Киреев, **Н. В. Гребенников**, Г. Н. Кононов [и др.] – 14 с.

40. Патент на полезную модель № 161668 U1 Российская Федерация, МПК B60L 11/08, B60L 11/12. Устройство для передачи электрической энергии к электромеханической трансмиссии транспортного средства : № 2015115031/02 : заявл. 21.04.2015 : опубликовано 27.04.2016 / А. В. Киреев, **Н. В. Гребенников**, Г. Н. Кононов, Н. М. Кожемяка – 7 с.

Монографии

41. **Гребенников, Н. В.** Современные методы проектирования тягового привода локомотива : монография / Н. В. Гребенников – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2022. – 96 с. – ISBN 978-5-907295-62-9.

Публикации в других изданиях

42. **Гребенников, Н. В.** Оценка энергоэффективности тепловоза 2ТЭ25КМ в условиях Северо-Кавказской железной дороги / Н. В. Гребенников // 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. 46-49.

43. **Гребенников, Н. В.** Определение энергетических параметров при ведении поезда / Н. В. Гребенников, П. А. Харченко // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 19–21 апреля 2021 года. Том 2. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2021. – С. 193-197.

44. **Гребенников, Н. В.** Пути повышения энергетической эффективности автономного тягового подвижного состава / Н. В. Гребенников // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 4(57). – С. 19-23.

45. Модульная силовая энергетическая установка современного тепловоза / А. А. Зарифьян, Т. З. Талахадзе, **Н. В. Гребенников**, Н. В. Романченко. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России : Сборник научных трудов, Ростов на Дону, 01–02 марта 2018 года. – Ростов на Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 191-195.

46. Компьютерная модель перспективного маневрового тепловоза с модульной энергетической установкой / А. А. Зарифьян, **Н. В. Гребенников**, Т. З. Талахадзе [и др.] // Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ : Сборник тезисов, Брянск, 03–04 апреля 2018 года. – Брянск : Брянский государственный технический университет, 2018. – С. 33-36.

47. Компьютерная модель реостатных испытаний / **Н.В. Гребенников**, А. А. Зарифьян, Т. З. Талахадзе, В. В. Черников // Локомотивы. XXI век : материалы III Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения доктора технических наук профессора В.В. Стрекопытова, Санкт-Петербург, 17–19 ноября 2015 года. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2015. – С. 33-38.

48. Киреев, А.В. Электрическая передача мощности с реактивными индукторными машинами / А. В. Киреев, **Н. В. Гребенников**, Н. М. Кожемяка // Актуальные проблемы тех-

нических наук : Сборник статей Международной научно-практической конференции, Уфа, 10 апреля 2015 года / Ответственный редактор: Сукиасян Асатур Альбертович. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2015. – С. 88-91.

49. Киреев, А.В. Испытания макета электромеханической трансмиссии с реактивными индукторными электрическими машинами / А. В. Киреев, **Н. В. Гребенников** // Новые задачи технических наук и пути их решения : сборник статей международной научно-практической конференции, Пермь, 10 ноября 2016 года. – Пермь: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2016. – С. 77-80.

50. Зарифьян, А. А. Пути повышения энергетической эффективности перспективных локомотивов / А. А. Зарифьян, **Н. В. Гребенников**, Т. З. Талахадзе, В. В. Черников // Локомотивы. Транспортно-технологические комплексы. XXI век : Сборник материалов V Международной научно-технической конференции, посвященной 180-летию железных дорог России, Санкт-Петербург, 14–16 ноября 2017 года ; Федеральное агентство железнодорожного транспорта ; (ФГБОУ ВО ПГУПС). – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2017. – С. 351-356.

51. Зарифьян, А. А. О возможности повышения энергетической эффективности локомотивов при работе с частичной нагрузкой / А. А. Зарифьян, **Н. В. Гребенников**, Т. З. Талахадзе // Транспорт: наука, образование, производство : труды международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 12–15 апреля 2016 года. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2016. – С. 74-76.

52. **Гребенников, Н. В.** Электрическая передача мощности с вентильно-индукторными машинами / Н. В. Гребенников // Труды международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России» : В 3 частях – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2015. – С. 171-172.

53. **Гребенников, Н. В.** Определение эксплуатационного расхода топлива грузового тепловоза по кривой скорости / Н. В. Гребенников // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство» : Сборник трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 17–20 апреля 2018 года. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 74-77.

Гребенников Николай Вячеславович

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
АВТОНОМНЫХ ЛОКОМОТИВОВ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ
МОЩНОСТИ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано к печати 03.07.2023. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,0.

Тираж 100 экз. Заказ № 11359.

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. им. Ростовского Стрелкового
Полка Народного Ополчения, 2.