

На правах рукописи



Талахадзе Темур Зурабович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
МАГИСТРАЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ ЛОКОМОТИВОВ ЗА СЧЕТ
ПЕРЕХОДА К МОДУЛЬНЫМ СИЛОВЫМ УСТАНОВКАМ**

Специальность: 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону

2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС)

Научный руководитель – Зарифьян Александр Александрович
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Тяговый подвижной состав»
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»

Официальные оппоненты – Балабин Валентин Николаевич
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы»
ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)»

Балакин Андрей Юрьевич
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Локомотивы»
ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения»

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Защита диссертации состоится «23» сентября 2019 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 218.010.01 при ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, Ростовской обл., пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, Ростовской обл., пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 и на сайте <http://www.rgups.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 218.010.01,
доктор технических наук, профессор



В.А. Соломин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Приоритетным направлением стратегических программ по развитию железнодорожного транспорта является проектирование и внедрение в эксплуатацию нового подвижного состава, отличающегося высокими показателями энергетической эффективности. Кроме того, важным направлением в деятельности компании ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД») является постоянное повышение эффективности перевозочного процесса, что обеспечивается экономией средств на приобретение топливно-энергетических ресурсов (ТЭР).

Стратегия развития компании ОАО «РЖД», а также Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности», устанавливающие, что «энергетическая эффективность – это характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта». Данный ФЗ распространяется на деятельность, связанную с использованием ТЭР, а железнодорожный транспорт является одним из крупнейших потребителей ТЭР в стране, расходуя около 5% электроэнергии и почти 11% дизельного топлива, причем основная доля расхода ТЭР компанией ОАО «РЖД» приходится на тягу поездов.

В статье 14, ч. 4 Федерального закона указывается, что значения целевых показателей в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности должны отражать, в том числе, увеличение количества транспортных средств, высокоэкономичных в части использования моторного топлива и электрической энергии.

Таким образом, чтобы успешно и эффективно осуществлять перевозки по железным дорогам, необходимо не только повышать массу поездов и пропорционально увеличивать число движущих осей и мощность локомотивов, но и решить ряд технических задач, направленных на улучшение их показателей энергоэффективности.

Степень разработанности темы исследования. Проблемами повышения энергетической эффективности и улучшения тягово-энергетических показателей тягового подвижного состава (ТПС) занимались многие ученые, отметим здесь работы В.Н. Балабина, А.Ю. Балакина, Д.И. Петракова, А.М. Евстафьева, А.В. Грищенко, А.С. Космодамианского, Е.Е. Коссова, В.С. Коссова, Ю.В. Бабкова, К.С. Перфильева, Г.Ф. Кашникова, В.А. Соломина, С.Я. Френкеля, В.А. Кручека, В.В. Кручека, Д.Н. Курилкина, С.М. Овчаренко, С.Г. Шантаренко, П.В. Шепелина, Д.Я. Носырева, Я.А. Новачука, А.А. Зарифьяна (мл), А.А. Андрющенко, П.Г. Колпахчяна, Н.В. Гребенникова, К.К. Кима, И.К. Лакина, В.В. Грачева, В.В. Фурмана, А.И. Володина, В.А. Гапановича, Я.Ю. Магнитского, Д.А. Бычкова, В.В. Асабина, В.Н. Игина и др.

Целью диссертационной работы является повышение энергетической эффективности автономных грузовых магистральных локомотивов (АГМЛ) с электрической передачей мощности и улучшение их тягово-энергетических показателей путем исследования, разработки и последующего применения модульных силовых энергетических установок (СЭУ), основанных на принципе приведения генерируемой мощности в соответствие с мощностью, требуемой на тягу поезда.

Объектом исследования являются автономные грузовые магистральные локомотивы с электрической передачей мощности, обеспечивающей поосное регулирование силы тяги.

Предметом исследования является проблема повышения энергетической эффективности АГМЛ с электрической передачей мощности.

Диссертация выполнена в рамках пунктов 1,2,4 и 8 паспорта специальности 05.22.07 – «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация».

Методология исследования основана на программных документах компании ОАО «РЖД» по вопросам энергосбережения и повышения энергетической эффективности, анализе современных тенденций в области повышения энергетической эффективности ТПС, результатах статистической обработки больших массивов экспериментальных данных, теории локомотивной тяги, структурного анализа и имитационного компьютерного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

– Характеристики энергетической эффективности АГМЛ с электрической передачей мощности переменного-постоянного тока и поосным регулированием силы тяги в различных условиях эксплуатации в зависимости от веса поезда, профиля участка пути и условий движения.

– Качественные и количественные результаты обработки массивов записей бортовых регистраторов, которые позволили выделить и оценить вклад каждого из элементов системы преобразования энергии в конечные показатели энергетической эффективности –КИМ и КПД тепловоза.

– Зависимости (в виде таблиц и гистограмм), показывающие распределение потребляемой энергии от КИМ в различных режимах движения.

– Расчетный метод, позволяющий находить полезную работу, совершаемую АГМЛ с электрической передачей мощности и поосным регулированием силы тяги в реальных условиях движения и тем самым получать объективную основу для оценки энергетической эффективности локомотивной тяги.

– Способ повышения энергетической эффективности за счет перехода к модульным силовым установкам, основанный на принципе приведения мгновенной мощности, генерируемой силовой установкой, в соответствии с полезной мощностью локомотива, необходимой на тягу поезда, путем отключения/подключения отдельных модулей.

– Модульная структура силовой энергетической установки АГМЛ, позволяющая реализовать предлагаемый способ повышения энергетической эффективности.

– Количественные оценки экономии дизельного топлива (до 20 %) в результате применения модульной структуры СЭУ.

– Результаты сравнительного анализа моторесурса моноблочной и модульной СЭУ, где показано, что при прочих равных условиях ресурс модульной СЭУ не уменьшается (увеличивается до 25 %).

– Направления дальнейшего развития научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по внедрению СЭУ нового типа (энергетического кластера на основе газовых микротурбин) на автономном ТПС.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке и совершенствовании теоретических и практических рекомендаций по повышению энергетической эффективности магистральных автономных локомотивов за счет перехода к модульным силовым установкам.

В диссертации:

1. Получены характеристики энергетической эффективности АГМЛ с электрической передачей мощности переменного-постоянного тока и поосным регулированием силы тяги в различных условиях эксплуатации в зависимости от веса поезда, профиля участка пути и условий движения.

2. Получены качественные и количественные результаты обработки массивов записей бортовых регистраторов, которые позволили выделить и оценить вклад каждого из элементов системы преобразования энергии в конечные показатели энергетической эффективности – КИМ и КПД тепловоза.

3. Получены зависимости (в виде таблиц и гистограмм), показывающие распределение потребляемой энергии от КИМ в различных режимах движения.

4. Разработан расчетный метод, позволяющий находить полезную работу, совершаемую АГМЛ с электрической передачей мощности и поосным регулированием силы тяги в реальных условиях движения и тем самым получать объективную основу для оценки энергетической эффективности локомотивной тяги. Этот метод положен в основу компьютерной модели.

5. Предложен способ повышения энергетической эффективности за счет перехода к модульным силовым установкам, основанный на принципе приведения мгновенной мощности, генерируемой силовой установкой, в соответствие с полезной мощностью локомотива, необходимой на тягу поезда, путем отключения/подключения отдельных модулей.

6. Обоснована модульная структура силовой энергетической установки АГМЛ, позволяющая реализовать предлагаемый способ повышения энергетической эффективности. Разработана компьютерная модель.

7. Получены и обоснованы количественные оценки экономии дизельного топлива (до 20 %) в результате применения модульной структуры СЭУ.

8. Выполнен сравнительный анализ моторесурса моноблочной и модульной СЭУ, показано, что при прочих равных условиях ресурс модульной СЭУ не уменьшается (увеличивается до 25 %).

9. Сформулированы направления дальнейшего развития научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по внедрению СЭУ нового типа (энергетического кластера на основе газовых микротурбин) на автономном ТПС.

Практическая ценность и внедрение результатов работы. Научно-технические предложения по повышению энергетической эффективности магистральных автономных локомотивов за счет перехода к модульным силовым установкам, изложенные в диссертационной работе, приняты как материал для совершенствования конструкций перспективного автономного ТПС.

Результаты исследования нашли применение в разработках ОП ООО «ТМХ Инжиниринг» в г. Брянск и в нормативных документах Северо-Кавказской Дирекции тяги ОАО «РЖД».

Результаты исследования были использованы при проведении исследований в рамках гранта Российского научного фонда (РНФ) №18-79-00130, а также соглашения № 14.604.21.0174 о субсидировании от 26.09.2017 по теме «Разработка научно-технических решений для создания эффективного высокоскоростного

генераторного оборудования для газовой микротурбины» по заказу Министерства образования и науки Российской Федерации, Федеральной целевой программы (ФЦП) «Исследования и разработки в соответствии с приоритетными направлениями развития российской науки и техники на 2014 – 2020 годы», уникальный идентификационный код прикладных исследований (проект) – RFMEFI60417X0174.

Результаты диссертационного исследования применялись при разработке учебно-методических комплексов для студентов специальностей 23.05.03 Подвижной состав железных дорог, 23.05.05 Эксплуатация железных дорог и 15.04.01 Машиностроение и научно-исследовательской деятельности ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения». Получены акты внедрения.

Апробация работы. Основные положения диссертационного исследования докладывались и обсуждались на международных, всероссийских, национальных и отраслевых симпозиумах и конференциях: «Современное развитие науки и техники («Наука-2014, 2015, 2017»))» (г. Ростов н/Д); «Транспорт-2015, 2016, 2017, 2018» (г. Ростов н/Д); «Локомотивы. XXI век» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.); «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения» (г. Ростов н/Д, 2016, 2018 г.); «11th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER2016)» (Monte-Carlo (Monaco), 2016 г.); «Локомотивы. Транспортно-технологические комплексы. XXI век» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.); «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России («ТрансПромЭк-2018»))» (г. Ростов н/Д, 2018 г.); «Компьютерное моделирование на железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ» (г. Брянск, 2018 г.); «X International Scientific Conference TRANSPORT PROBLEMS 2018» (Katowice (Poland), г. 2018); «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов» (г. Москва, 2018 г.); «Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век» г. Санкт-Петербург, 2018 г.); «IWED 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives» (Moscow (Russia), 2019 г.); На заседаниях кафедры «Тяговый подвижной состав» ФГБОУ ВО РГУПС (г. Ростов н/Д); кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ФГБОУ ВО ПГУПС Императора Александра I (г. Санкт-Петербург).

Материалы диссертационной работы участвовали в конкурсах:

– Всероссийский конкурс научных работ среди студентов и аспирантов по транспортной проблематике, проведен ОУС ОАО «РЖД» в 2016 г. (получен диплом за первое место);

– конкурс Министерства транспорта Российской Федерации «Молодые ученые транспортной отрасли», 2017 г. (получены удостоверение победителя конкурса и медаль).

Публикации. Основное содержание диссертации и результаты исследования опубликованы в 25 научных работах общим объемом 13,94 п.л., в том числе в 3 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, 3 публикации в изданиях, включенных в базу данных Web of Science и Scopus.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 107 наименований. Общий объём работы 164 страниц, включая 87 иллюстраций и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, определены предмет и объект, теоретико-методологическая основа, научная новизна, практическая значимость работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса и постановка задачи исследования» проведен анализ направлений повышения энергетической эффективности, функциональности и улучшения тягово-энергетических характеристик автономного ТПС применительно к каждому уровню.

В качестве приоритетных направлений, применительно к АГМЛ, выделены: поосное регулирование силы тяги, энергоэффективный алгоритм управления ТЭД и применение многодвигательных силовых энергетических установок.

Рассмотрены участки обращения ТПС на Южном полигоне ОАО «РЖД» и дана его общая характеристика. В связи с ростом грузооборота в направлении экспортных портов наиболее остро стоит задача повышения энергетической эффективности перевозочного процесса. В данных направлениях преобладает автономная тяга, что обуславливает выбор в качестве объекта исследования АГМЛ с электрической передачей мощности (ЭПМ), обеспечивающей поосное регулирование силы тяги.

Тяговая система автономного ТПС состоит из силовой энергетической установки (СЭУ) и ЭПМ (рисунок 1). Основными показателями энергетической эффективности являются КПД и КИМ.

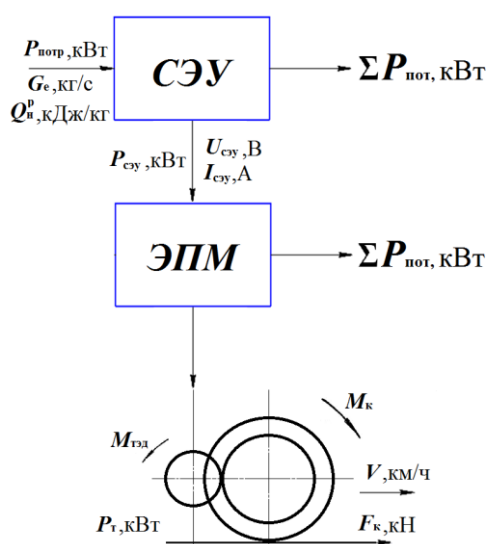


Рисунок 1– Схема процесса преобразования энергии на автономном ТПС

Мгновенное значение КПД автономного ТПС $\eta_{л}$ может быть представлено как отношение полезной мощности локомотива в данный момент времени (то есть мощности на тягу поезда) к потребляемой им мощности:

$$\eta_{л} = \frac{P_{пол}}{P_{потр}} = \frac{P_{т}}{P_{т} + P_{п} + P_{сн}}, \quad (1)$$

где $P_{пол}$ – полезная мощность, кВт; $P_{потр}$ – потребляемая мощность, кВт; $P_{т}$ – мощность на тягу поезда (касательная мощность), кВт, причем $P_{т} = P_{пол}$; $P_{п}$ – мощность потерь, кВт; $P_{сн}$ – мощность, затрачиваемая на собственные нужды локомотива, кВт.

Тогда мгновенное значение КПД автономного ТПС $\eta_{л}$ будет равно произведению КПД СЭУ $\eta_{сэу}$, КПД ЭПМ $\eta_{эпм}$ и КПД механического тягового привода $\eta_{мех}$, учитывающего потери в подшипниках, зубчатом редукторе и т.п.:

$$\eta_{л} = \eta_{СЭУ} \cdot \eta_{ЭПМ} \cdot \eta_{мех} \quad (2)$$

Таким образом, процесс преобразования энергии на автономном ТПС имеет два уровня: верхний уровень – СЭУ и нижний уровень – ЭПМ. ЭПМ автономного ТПС по своей структуре идентична ТЭП электровоза, если рассматривать тяговый генератор в качестве составной части СЭУ и не относить его к ЭПМ. Как следствие, задача повышения энергетической эффективности автономного ТПС также будет иметь два уровня.

В конце главы цель работы сформулирована как повышение энергетической эффективности АГМЛ и улучшение их тягово-энергетических показателей путем применения модульных СЭУ, основанных на принципе приведения генерируемой мощности в соответствие с мощностью, требуемой на тягу поезда.

Во второй главе «Анализ эксплуатационных показателей энергетической эффективности грузовых магистральных тепловозов» в качестве объекта исследования выбран тепловоз 2ТЭ25КМ с электрической передачей мощности переменного-постоянного тока, обеспечивающей поосное регулирование силы тяги. Двигатель 16ЧН26/26 (серии Д49) имеет номинальную частоту вращения 1000 об/мин.

Представлена характеристика процесса преобразования энергии (этапы и уровни) (рисунок 2).

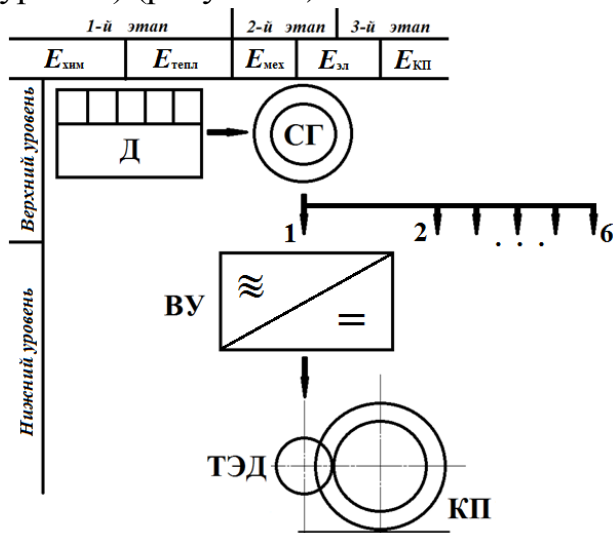


Рисунок 2– Этапы и уровни преобразования энергии: Д – дизель, СГ – синхронный генератор, ВУ – шестиканальная выпрямительная установка, ТЭД– тяговые электродвигатели, КП– колесные пары

На верхнем уровне (первый этап) внутренняя химическая энергия дизельного топлива $E_{хим}$ при его сгорании преобразуется в тепловую энергию $E_{тепл}$, а затем в механическую энергию коленчатого вала дизеля $E_{мех}$. На втором этапе $E_{мех}$ преобразуется в электрическую энергию на клеммах тягового генератора $E_{эл}$.

На нижнем уровне в тяговом преобразователе (тиристорная ВУ) происходит процесс преобразования электрической энергии, выработанной тяговым генератором, а затем в ТЭД электроэнергия преобразуется в механическую энергию вращения колесных пар $E_{кп}$ (третий этап).

Повышение энергетической эффективности любой силовой установки обусловлено приведением условий ее работы в соответствие с номинальными параметрами, которые ориентированы на максимальные значения КПД. Это особенно актуально для тепловозов, так как номинальные значения КПД ДГУ находятся на уровне 36...38 %, а при частичной нагрузке имеют значения порядка 20...25 %.

Перейдем к анализу эксплуатационных показателей энергетической эффективности грузовых тепловозов 2ТЭ25КМ в реальных условиях эксплуатации на Южном полигоне. Для этого использовалась штатная микропроцессорная система управления МПСУ-ТП, которая имеет функцию регистрации параметров дви-

жения. МПСУ-ТП ведет запись основных параметров работы тепловоза, сохраняя их на жесткий диск.

Исследование показателей энергетической эффективности тепловоза в эксплуатации основано на записях мгновенных значений следующих параметров:

- касательная сила тяги тепловоза F_k , кН;
- скорость тепловоза V , км/ч (либо м/с);
- изменение позиций контроллера машиниста $N_{ПК}$;
- линейное напряжение на выходе генератора $U_{л}$, В;
- действующее значение фазного тока на выходе генератора $I_{ф}$, А.

Отметим, что силу тяги возможно получить и расчетным путем, о чем будет сказано в главе 3.

Как уже отмечалось, процесс преобразования энергии протекает на двух уровнях. На верхнем уровне (на первом этапе), дизельный двигатель в составе ДГУ преобразует внутреннюю химическую энергию топлива в механическую энергию вращения коленчатого вала ДГУ. Запишем потребляемую мощность по топливу $P_{потр}$, кВт, как

$$P_{потр} = g_i \cdot Q_p^H \quad (3)$$

где $Q_p^H = 42500$ кДж/кг – удельная теплота сгорания топлива,

g_i – мгновенное значение расхода топлива, кг/с, которое определяется по набранной машинистом i -ой позиции контроллера.

Затем, на втором этапе, механическая энергия вращения коленчатого вала ДГУ преобразуется синхронным тяговым генератором в электрическую энергию. Свободной мощности дизеля соответствует активная составляющая мощности синхронного генератора с двумя параллельными трехфазными обмотками:

$$P_T = 2 \cdot 3 \cdot U_{ф} \cdot I_{ф} \cdot \cos \varphi, \quad (4)$$

где $U_{ф}$, $I_{ф}$ – действующие значения фазных напряжения и тока;

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности: для номинального режима $\cos \varphi = 0,9$; при максимальном напряжении $\cos \varphi = 0,96$; при минимальном напряжении $\cos \varphi = 0,79$.

Действующее значение фазного напряжения определяется по формуле:

$$U_{ф} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

Тогда электрическая мощность $P_{ДГУ}$, кВт, на выходе ДГУ будет равна:

$$P_{ДГУ} = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{ф} \cdot \cos \varphi. \quad (6)$$

На нижнем уровне, многоканальная ЭПМ тепловоза преобразует электрическую энергию, выработанную ДГУ, в полезную механическую работу. Полезная мощность тепловоза на тягу P_T равна

$$P_T = \frac{F_k \cdot V}{3,6}, \quad (7)$$

где V – скорость, км/ч; F_k – касательная сила тяги, кН.

Тогда выражение (2) для КПД тепловоза будет иметь вид:

$$\eta = \eta_{ДГУ} \cdot \eta_{ЭПМ} \cdot \eta_{мех}. \quad (8)$$

Здесь КПД дизель-генераторной установки:

$$\eta_{\text{ДГУ}} = \frac{P_{\text{ДГУ}}}{P_{\text{потр}}}, \quad (9)$$

и КПД электрической передачи мощности:

$$\eta_{\text{ЭПМ}} = \frac{P_{\text{т}}}{P_{\text{ДГУ}}}. \quad (10)$$

Мгновенное значение коэффициента использования мощности (КИМ) тепловоза γ представляет собой отношение реализуемой локомотивом мощности на тягу $P_{\text{т}}$ к его номинальной мощности $P_{\text{ном}}$ (она равна мощности тепловоза на тягу на 15-й позиции):

$$\gamma = \frac{P_{\text{т}}}{P_{\text{ном}}}. \quad (11)$$

Соответственно, КИМ дизель-генераторной установки $\gamma_{\text{ДГУ}}$ будет равен

$$\gamma_{\text{ДГУ}} = \frac{P_{\text{ДГУ}}}{P_{\text{ном}}}, \quad (12)$$

и КИМ электрической передачи мощности $\gamma_{\text{ЭПМ}}$

$$\gamma_{\text{ЭПМ}} = \frac{P_{\text{т}}}{P_{\text{ЭПМ ном}}}, \quad (13)$$

здесь $P_{\text{ЭПМ ном}}$ – номинальная мощность ЭПМ.

Совершенная полезная работа $A_{\text{пол}}$, кВт·ч, направленная на тягу поезда, равна интегралу по времени от полезной мощности $P_{\text{т}}$ (7):

$$A_{\text{пол}} = \int P_{\text{т}} dt. \quad (14)$$

Полная потребленная энергия $E_{\text{потр}}$, кВт·ч, равна интегралу по времени от потребленной мощности $P_{\text{потр}}$

$$E_{\text{потр}} = \int P_{\text{потр}} dt. \quad (15)$$

Первоначальная обработка массивов данных, полученных из записей поездок осуществлялась с помощью специализированного программного обеспечения АРМ «ProViewer». Дальнейшая математическая обработка и получение результатов осуществлялось с помощью пакета прикладных программ Matlab Simulink.

Для определения показателей энергетической эффективности были выбраны три участка обращения тепловоза 2ТЭ25КМ на Южном полигоне. Эти участки соответствуют условным участкам с обобщенным профилем следующих типов: 1) «Астрахань-2 – Артезиан» – I-II тип, равнинный, с величиной расчетного подъема 6‰; 2) «Минеральные Воды – Прохладная» – III тип, холмистый, с величиной расчетного подъема 9‰; 3) «Разъезд 9 км – Железный Рог» – IV тип, горный, с величиной расчетного подъема 11‰.

В общей сложности проанализировано десять поездок в четном и нечетном направлении с поездами различной массы. В диссертации приведены план и профиль для каждого участка, а также параметры всех поездок. Для каждой поездки построены и приведены в работе графики скорости движения, касательной силы тяги, изменения позиций контроллера машиниста, расхода топлива и основных энергетических показателей (примеры показаны на рисунках 3–5 для участка «Минеральные Воды – Прохладная» с поездом №3168 (2468 т)).

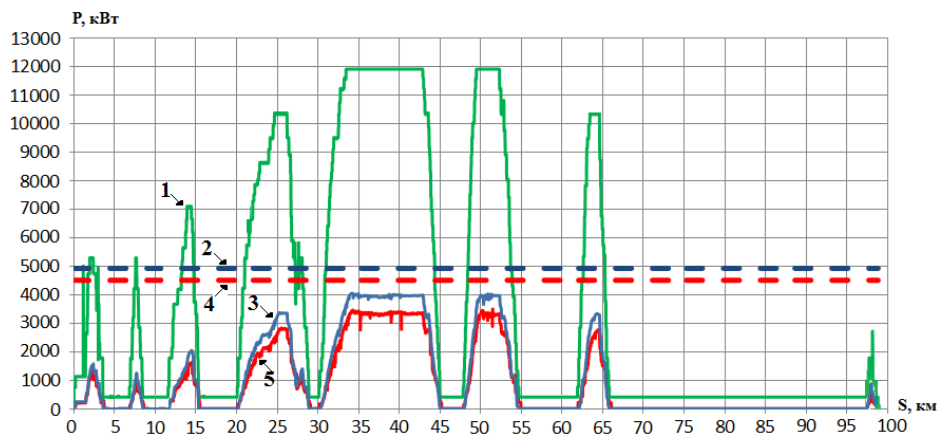


Рисунок 3 – Основные энергетические показатели тепловоза: зеленая линия (1) – потребляемая мощность (по топливу); пунктирная синяя линия (2) – номинальная мощность ДГУ тепловоза; синяя линия (3) – электрическая мощность; пунктирная красная линия (4) – номинальная мощность ЭПМ тепловоза; красная линия (5) – полезная мощность на тягу поезда

Получены графики изменения КИМ и КПД дизель-генераторной установки тепловоза 2ТЭ25КМ в ходе поездки (рисунок 4).

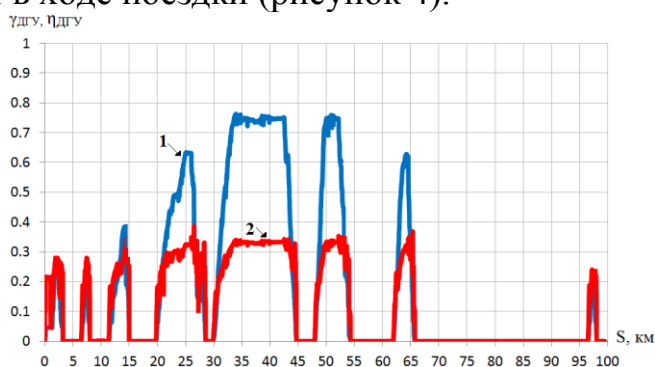


Рисунок 4 – Показатели энергетической эффективности тепловоза: синяя линия (1) – КИМ ДГУ ($\gamma_{дгу}$); красная (2) – КПД ДГУ ($\eta_{дгу}$)

Совершенная тепловозом полезная работа и потребленная энергия показаны на рисунке 5, причем полезная работа на тягу поезда составила $A_{пол} = 1323,13$ кВт·ч. Потребленная энергия (по топливному эквиваленту) составила $E_{потр} = 5584,03$ кВт·ч.

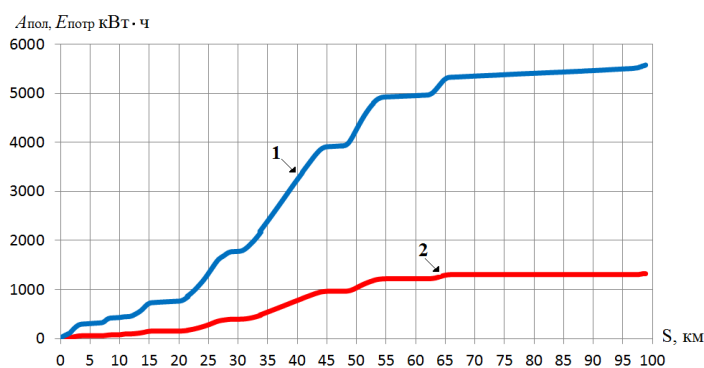


Рисунок 5 – Графики потребленной энергии (синяя линия – 1) и совершенной полезной работы (красная линия – 2)

На рисунке 6 приведена гистограмма, показывающая распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности локомотива. Видно, что во время движения большая часть энергии – 58,51 % была израсходована при $\gamma > 0,5$ (т.е. когда доступная мощность локомотива использовалась больше чем на половину).

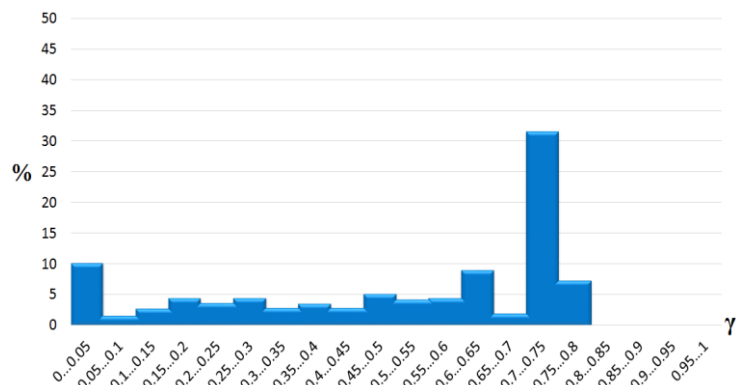


Рисунок 6 – Распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности локомотива

По итогам анализа записей бортовых регистраторов было установлено, что в условиях Южного полигона КПД силовой установки, находится в пределах от 20 % (равнинный профиль, порожний поезд) до 36 % (горный профиль, груженный поезд).

По материалам главы сделан вывод, что специфика грузового движения, разнообразный рельеф местности и состояние пути обуславливают неравномерность нагрузки локомотива в процессе движения. В связи с этим в эксплуатационных условиях ДГУ тепловоза основную часть времени работает в режимах с низким использованием доступной мощности (рисунок 7), которые характеризуются низкими значениями КПД дизель-генераторной установки (рисунок 8).

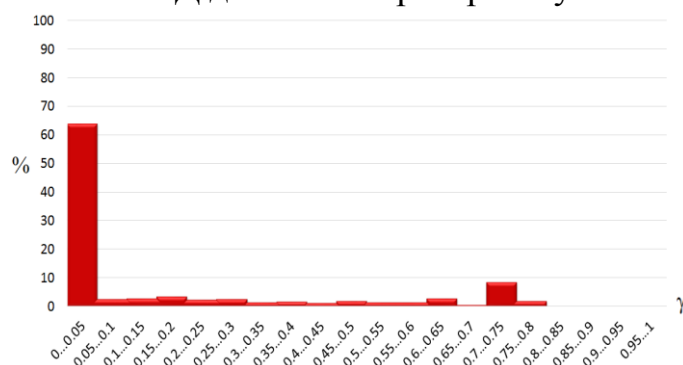


Рисунок 7 – Распределение времени работы ДГУ тепловоза по степени использования доступной мощности

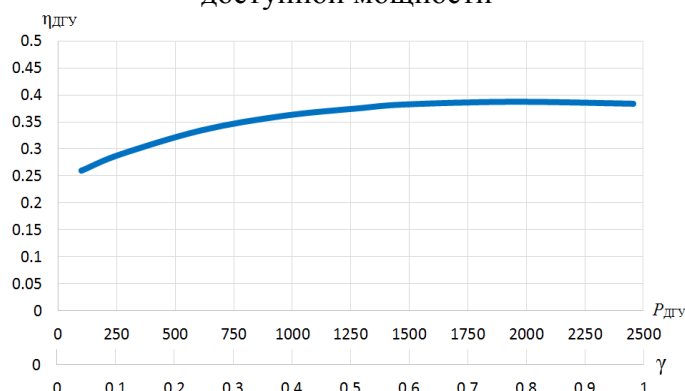


Рисунок 8 – Зависимость КПД ДГУ тепловоза от развиваемой мощности

Сказанное выше остается справедливым для работы тепловоза, оснащенного моноблочной СЭУ, как с груженными, так и с порожними поездами. В связи с этим необходимо найти способы более полной реализации доступной мощности тепловоза, что будет сделано в главе 4.

В третьей главе «Нахождение полезной работы, совершенной локомотивом с поосным регулированием силы тяги при ведении поезда» получено решение дифференциального уравнения движения поезда и предложена методика для нахождения полезной работы, совершаемой локомотивом с поосным регулированием силы тяги при известном профиле пути, массе поезда и заданном скоростном режиме.

Переход от мгновенных значений КПД (1) к среднему значению КПД $\eta_{\text{средн}}$ за время движения по перегону осуществляется путем интегрирования и приводит к выражению вида

$$\eta_{\text{средн}} = \frac{A_{\text{пол}}}{E_{\text{потр}}}, \quad (16)$$

где $A_{\text{пол}}$ – полезная работа на тягу поезда, кВт·ч; $E_{\text{потр}}$ – потребленная энергия, кВт·ч.

Полезная работа на тягу поезда $A_{\text{пол}}$ в (16) представляет собой «полезный эффект от использования энергетических ресурсов» и определяется по (14), а потребленная энергия $E_{\text{потр}}$ – «затраты энергетических ресурсов, произведенные в целях получения такого эффекта» (15).

Таким образом, видим, что среднее значение КПД локомотива $\eta_{\text{средн}}$ (16) представляет собой именно «отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта», предусмотренное Федеральным законом № 261-ФЗ.

Выполним переход от мгновенного значения КИМ (11) к среднему значению КИМ $\gamma_{\text{средн}}$, которое представляет собой отношение полезной работы на тягу поезда $A_{\text{пол}}$ к работе, совершенной локомотивом в номинальном режиме за то же время $A_{\text{ном}}$:

$$\gamma_{\text{средн}} = \frac{A_{\text{пол}}}{A_{\text{ном}}}. \quad (17)$$

Дифференциальное уравнение движения поезда записано в проекции на направление движения (рисунок 9):

$$x: m_{\text{пр}} \frac{dV}{dt} = F_{\text{кx}} + W_{\text{кx}} + B_{\text{тx}}, \quad (18)$$

где t – время, с; $v_x = V$ – скорость, м/с; $m_{\text{пр}}$ – приведенная масса поезда, т; W – силы сопротивления движению кН; $B_{\text{т}}$ – тормозные силы, кН; $F_{\text{т}}$ – сила тяги, кН; $F_{\text{ин}}$ – сила инерции, кН.

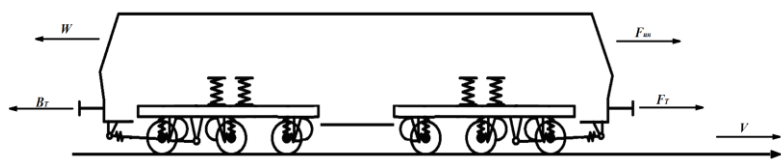


Рисунок 9 – Схема действия сил

Первое слагаемое в правой части уравнения (18) представляет собой силу, которая при работе локомотива в режиме тяги направлена в сторону движения, а

в режиме электрического торможения – противоположно движению, проекция этой силы на ось x равна:

$$F_{\text{кx}} = k_1 F_{\text{к}}, \quad (19)$$

здесь $F_{\text{к}} > 0$.

Коэффициент k_1 в (19) определяется следующим образом:

$$k_1 = \begin{cases} +1, & \text{в режиме тяги,} \\ -1, & \text{в режиме электрического торможения,} \\ 0, & \text{на выбеге.} \end{cases}$$

Тепловоз 2ТЭ25КМ имеет поосное регулирование силы тяги. Поэтому суммарное тяговое усилие тепловоза $F_{\text{к}}$ складывается из сил тяги F_i , создаваемых активными (находящимися в тяге) ТЭД:

$$F_{\text{к}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{акт}}} F_i, \quad (20)$$

где $N_{\text{акт}} \leq N_{\text{ТЭД}}$, здесь $N_{\text{ТЭД}}$ – общее число тяговых двигателей локомотива.

Далее, в правой части уравнения (18) находится проекция силы сопротивления движению поезда на ось x равна $W_{\text{кx}}$, которая определяется согласно

$$W_{\text{кx}} = W_{\text{ox}} + W_{\text{ix}} + W_{\text{rx}}, \quad (21)$$

где W_{ox} – основное сопротивление движению и W_{rx} – дополнительное сопротивление при прохождении кривых, а W_{ix} – дополнительное сопротивление от уклона.

Проекцию сил пневматического торможения на направление движения B_{tx} запишем как:

$$B_{\text{tx}} = -B_{\text{т}} = k_2 B_{\text{т}} \leq 0. \quad (22)$$

Введем в рассмотрение коэффициент k_2 следующим образом:

$$k_2 = \begin{cases} -1, & \text{при работе в режиме торможения,} \\ 0, & \text{при работе в других режимах.} \end{cases}$$

Тогда (18), с учетом принятых обозначений, примет вид:

$$x: m_{\text{пр}} \frac{dV}{dt} = k_1 F_{\text{к}} + W_{\text{кx}} + k_2 B_{\text{т}}. \quad (23)$$

Далее будем рассматривать только движение в режиме тяги.

Из уравнения (23) получаем баланс сил, действующих на поезд

$$F_{\text{к}} = m_{\text{пр}} \frac{dV}{dt} - W_{\text{кx}}(V). \quad (24)$$

Для выполнения конкретных расчетов, должны быть известны все параметры участка пути и поезда. Кривая скорости $V(t)$ берется из бортового прибора регистрации МПСУ-ТП. Тогда мы приходим к первой (прямой) задаче динамики: по известному движению, в нашем случае – по известной скорости движения $V = V(t)$ найти действующие силы, которые вызывают это движение. Сила тяги $F_{\text{к}}$ может быть определена из (24) при известном законе изменения скорости.

Перейдем к получению баланса мощностей, для чего умножим выражение (24) на скорость V . После преобразований, получим мощность на тягу в виде:

$$P_{\text{т}} = P_{\text{ин}} + P_{\text{сопр}}, \quad (25)$$

где

$$P_{\text{ин}} = m_{\text{пр}} \frac{dV}{dt} \cdot V = \frac{dT}{dt} - \text{мощность сил инерции}, \quad (26)$$

$$P_{\text{сопр}} = -W_{\text{кx}}(V) \cdot V = W_{\text{к}}(V) \cdot V - \text{мощность сил сопротивления}. \quad (27)$$

Перейдем к нахождению работы, совершенной локомотивом за время прохождения $t_{12} = t_2 - t_1$ некоторого элементарного участка спрямленного профиля, имеющего постоянный уклон i . Для этого умножим (25) на dt и проинтегрируем по времени. После преобразований, получим уравнение энергетического баланса:

$$A_{12}^{\text{пол}} = A_{12}^{\text{ин}} + A_{12}^{\text{сопр}}. \quad (28)$$

Здесь, полезная работа, совершенная локомотивом

$$A_{12}^{\text{пол}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{т}} dt. \quad (29)$$

Работа сил инерции равна изменению кинетической энергии поезда:

$$A_{12}^{\text{ин}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{ин}} dt = \int_{t_1}^{t_2} dT = T_2 - T_1 = \frac{1}{2} m_{\text{пр}} \cdot (V_2^2 - V_1^2), \quad (30)$$

Работа сил сопротивления

$$A_{12}^{\text{сопр}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{сопр}} dt. \quad (31)$$

Приходим к выводу, что совершенная локомотивом полезная работа расходуется:

- на увеличение скорости движения при разгоне (то есть на увеличение кинетической энергии поезда),
- на преодоление основного сопротивления,
- на преодоление дополнительного сопротивления при движении по участку, имеющему уклон, а также при движении в кривых (то есть на изменение потенциальной энергии и на преодоление сил трения в боковом контакте «колесо-рельс» при движении в кривых).

Изложенная методика легла в основу программы, составленной с помощью пакета прикладных программ «Matlab Simulink». Для подтверждения достоверности предложенного расчетного метода, рассмотрим движение поезда на участке обращения тепловозов «Разъезд 9-й км – станция Железный Рог» СКЖД. Поездка состоялась 11 марта 2017 г., поезд №2004, тепловоз 2ТЭ25КМ. Изменение позиций контроллера машиниста и скорости поезда в зависимости от его положения на перегоне взято в соответствии с записями МПСУ-ТП.

Сопоставим результаты компьютерного моделирования с записями бортового регистратора.

На рисунке 10 показано сопоставление значений силы тяги (а) и мощности на тягу (б) при движении по этому участку.

Исходя из мощности $P_{\text{т(рег)}}$, записанной МПСУ-ТП, получаем величину полезной работы $A_{\text{рег}}^{\text{пол}} = 2239,7$ кВт·ч. Если же исходить из мощности, полученной расчетным путем, по предлагаемой методике, то

получаем $A_{\text{расч}}^{\text{пол}} = 2201,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Таким образом, относительное расхождение находится в пределах 2 %.

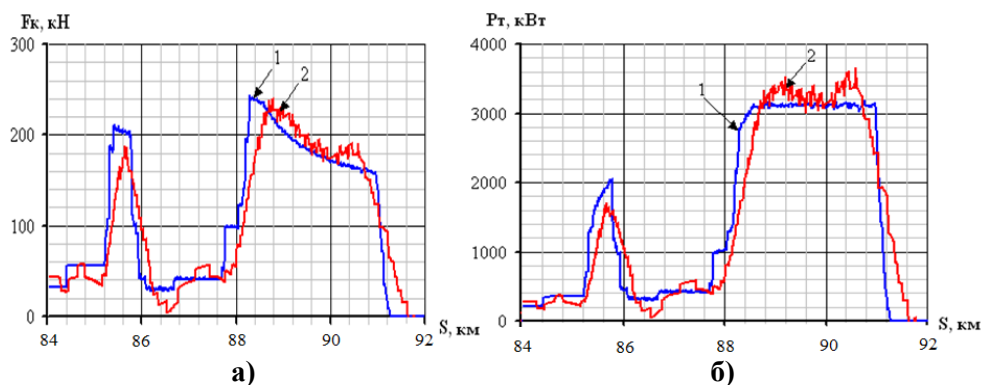


Рисунок 10 – Сопоставление значений: а) сила тяги: 1) по данным МПСУ-ТП $F_{k(\text{рег})}$, 2) по расчету $F_{k(\text{расч})}$; б) мощность на тягу: 1) по данным MCSU-TP $P_{t(\text{рег})}$, 2) по расчету $P_{t(\text{расч})}$.

В четвертой главе «Повышение энергетической эффективности автономной тяги путем перехода к модульным силовым энергетическим установкам» рассмотрены основные элементы тяговой системы АГМЛ в штатном моноблочном варианте, а также при модульной компоновке СЭУ.

Как было указано выше, тяговая система АГМЛ имеет два уровня, поэтому задача повышения энергетической эффективности является двухуровневой: на нижнем уровне проводится оптимизация работы ЭПМ за счет регулирования числа активных ТЭД (алгоритм дискретно-адаптивного управления), а на верхнем уровне – оптимизация работы СЭУ за счет перехода к модульной структуре.

Мощность, которую вырабатывает СЭУ локомотива, определяется величиной полезной мощности на тягу, т.е. СЭУ должна обеспечивать поступление мощности, достаточной для питания активных ТЭД при минимальном потреблении дизельного топлива. На рисунке 11 показана предлагаемая модульная структура тяговой системы.

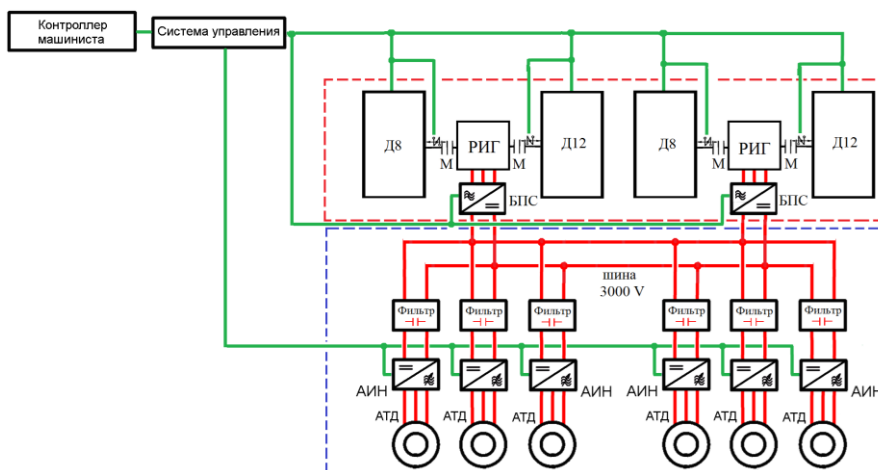


Рисунок 11 – Тяговая система с модульной структурой СЭУ одной секции АГМЛ: Д8, Д12 – дизельные двигатели; М – управляемая электромагнитная муфта; РИГ – реактивный индукторный генератор; БПС – блок питания силовой; АИН – автономный инвертор напряжения; АТД – асинхронный тяговый двигатель

Схема имеет два уровня: нижний – ЭПМ (обведено синей пунктирной линией) и верхний – СЭУ (обведено красной пунктирной линией). Цепи системы управления обозначены зеленым цветом.

Нижний уровень имеет в качестве прототипа ЭПМ переменного тока тепловоза 2ТЭ25А. На верхнем уровне, СЭУ одной секции предлагается выполнить не в моноблочном исполнении, как в случае тепловозов 2ТЭ25А и 2ТЭ25КМ, а в виде нескольких тяговых модулей. В качестве прототипов дизельных двигателей предлагается выбрать высокооборотные дизели (1800...2100 об/мин), выпускаемые отечественной промышленностью и отвечающие требованиям, предъявляемым на ж.д. транспорте. Мощность одного восьмицилиндрового дизеля Д8 обеспечивает питание одного ТЭД, а мощность одного двенадцати-цилиндрового дизеля Д12 – питание двух ТЭД.

Каждый тяговый модуль состоит из двух дизельных двигателей, которые соединяются с валом генератора через управляемые электромагнитные муфты. Прототипом генератора выбран генератор, характеристики которого приведены в диссертации, разработанный при участии РГУПС (грант РФ №18-79-00130).

Наличие электромагнитных управляемых муфт и алгоритмов управления позволяет реализовать «энергетическую колонну» – «дизель–генератор–преобразователь–ТЭД». Работа одного тягового модуля обеспечивает тягу одним, двумя и тремя ТЭД в зависимости от условий движения, при этом как дизели, так и ТЭД работают в режимах близких к номинальным.

После определения параметров тяговой системы АГМЛ новой конструкции, была разработана ее компьютерная модель с использованием программных комплексов «Matlab Simulink» и «Универсальный механизм». Было выполнено моделирование движения грузового поезда с выполнением всех условий реальной поездки на участке «Разъезд 9 км – Железный Рог», масса состава 5584 т. Изменение числа работающих дизельных двигателей производилось в зависимости от мощности, необходимой для питания ТЭД, и показано на рисунке 12. Изменение числа активных ТЭД производилось в зависимости от мощности, необходимой на тягу поезда, и показано на рисунке 13.

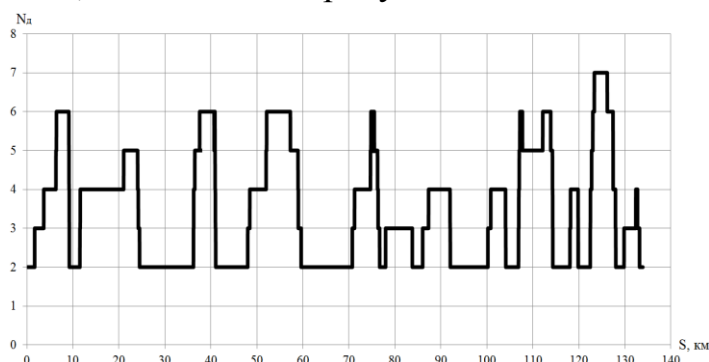


Рисунок 12 – Число работающих дизельных двигателей

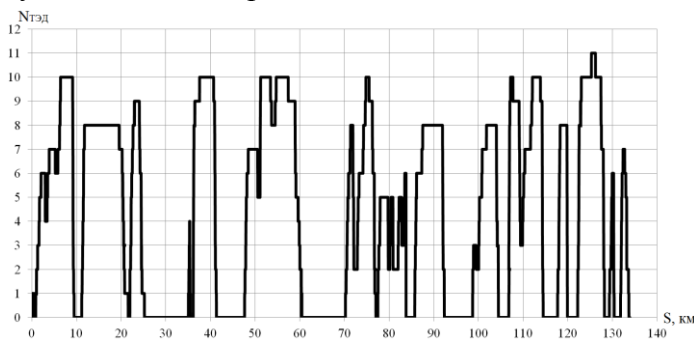


Рисунок 13 – Число активных ТЭД

Далее было выполнено сопоставление результатов компьютерного моделирования для предлагаемого локомотива с модульной структурой тяговой системы и реальных эксплуатационных показателей энергетической эффективности тепловоза 2ТЭ25КМ-022 для того же участка.

Расчетное потребление дизельного топлива тепловозом 2ТЭ25КМ на этом участке показано на рисунке 14 синей линией. Результат компьютерного моделирования работы локомотива с модульной структурой тяговой системы показан на рисунке 14 зеленой линией. Как видно, расход топлива уменьшается на $1607 - 1291 = 316$ кг. Потребленная энергия (по топливу) тепловозом 2ТЭ25КМ составила 18978,7 кВт·ч (рисунок 15, синяя линия), тогда как локомотив с модульной структурой потребил 15237,6 кВт·ч (рисунок 15, зеленая линия). Совершенная полезная работа одинакова и равна 4704,5 кВт·ч (рисунок 15, красная линия). Эксплуатационный КПД тепловоза 2ТЭ25КМ составил 0,248. Локомотив с модульной структурой имеет КПД равный 0,31.

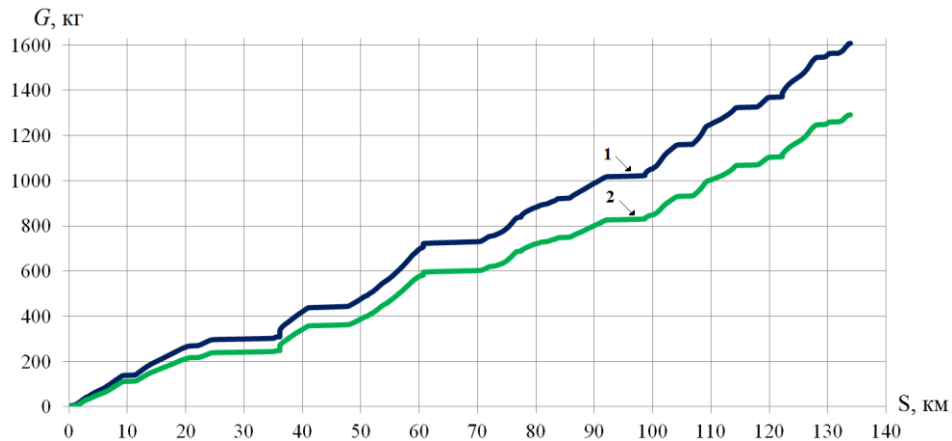


Рисунок 14 – Расход топлива за поездку: синяя линия (1) – тепловозом 2ТЭ25КМ; зеленая линия (2) – АГМЛ с модульной структурой тяговой системы

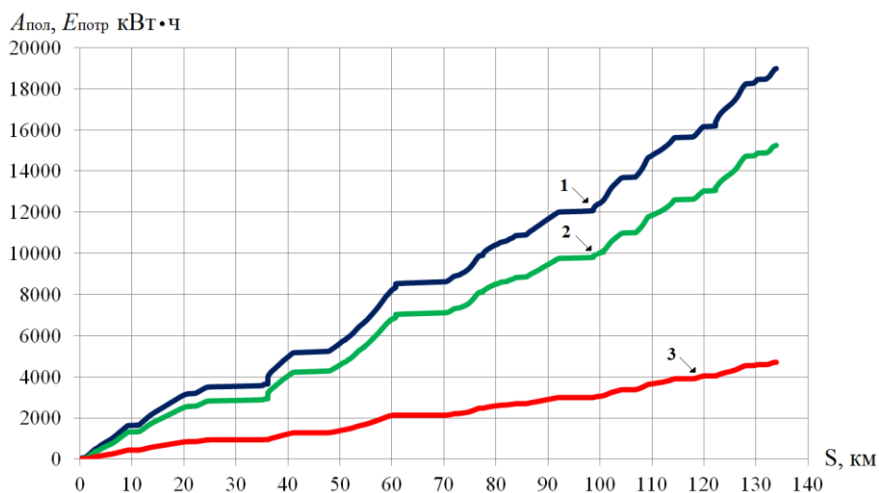


Рисунок 15 – Энергетические показатели: синяя линия (1) – потребленная энергия тепловозом 2ТЭ25КМ; зеленая линия (2)– потребленная энергия АГМЛ с модульной структурой тяговой системы; красная линия (3) – полезная работа на тягу поезда

Подводя итог, имеем увеличение КПД на 6,2 % при сокращении расхода топлива на 19,7 % за счет перехода к модульной структуре тяговой системы.

Это объясняется тем, что при моноблочной структуре СЭУ основной объем потребляемой энергии преобразуется в полезную работу при малой степени ис-

пользования доступной мощности. Тогда как при модульной структуре это преобразование происходит в режимах с гораздо более высокой степенью использования доступной мощности.

Одним из важнейших показателей, определяющих срок службы тепловоза, является ресурс работы его СЭУ. Моторесурс наиболее объективно показывает степень износа узлов и деталей, прежде всего цилиндропоршневой группы, газораспределительного механизма, коренных и шатунных подшипников. Для оценки расхода моторесурса была принята линейная модель. Было получено, что в условиях рассмотренной поездки, для моноблочной ДГУ основной расход моторесурса происходит на холостом ходу, причем в течение одной поездки моторесурс уменьшается на 3,01 моточаса. При модульной структуре СЭУ, для каждого из дизельных двигателей за одну поездку моторесурс уменьшается на 1,1 моточаса.

В работе приведены расчеты, согласно которым, принимая данную поездку за эквивалентную и учитывая, что моторесурс дизельного двигателя Д49 в составе моноблочной СЭУ составляет 24000 моточасов, а прототипа дизеля для модульной СЭУ – 12000 моточасов, получаем, что за жизненный цикл тепловоз с модульной СЭУ совершит на 27 % поездок больше.

В пятой главе «Перспективная силовая энергетическая установка локомотива на основе высокооборотных газовых микротурбин» рассмотрены альтернативные СЭУ для применения на АГМЛ. В качестве наиболее перспективных отмечены гибридные СЭУ и установки на основе газовых турбин.

Применение газовых турбин на автономном ТПС, таком как опытный газотурбовоз ГТ1h, изучается в течение длительного времени и обусловлено, в первую очередь, преимуществами природного газа по сравнению с дизельным топливом. Однако, опыт применения подобных локомотивов показал наличие проблем с энергетической эффективностью. Эти проблемы по своей сути идентичны соответствующим проблемам тепловозов, которые были изучены в предыдущих главах.

В связи с этим, предлагается применить подход, изложенный в главе 4 и сводящийся к замене моноблочной силовой установки некоторой модульной структурой. Реализация такого подхода, в данном случае, возможна за счет использования газовых микротурбин (ГМТ) и высокооборотных электрогенераторов (ВЭГ), объединенных в микро-газотурбинную установку (микро-ГТУ).

По аналогии с рисунком 10, представим модульную структурную схему силовой части секции локомотива с СЭУ на основе микро-ГТУ (рисунок 16).

Данная схема также имеет два уровня. На нижнем уровне расположена ЭПМ переменного тока (см. главу 4). На верхнем уровне расположена модульная СЭУ. Она состоит из ГМТ и ВЭГ, конструктивно объединенных в модули, а также накопителя энергии (НЭ). Необходимость последнего обусловлена особенностями эксплуатации и рабочего процесса микро-ГТУ. Локомотив с такой СЭУ будет представлять собой гибридный автономный локомотив. Имеющиеся прототипы микро-ГТУ отечественного производства имеют мощность порядка 100 кВт, тогда как для применения на локомотивах необходима мощность 500...600 кВт.

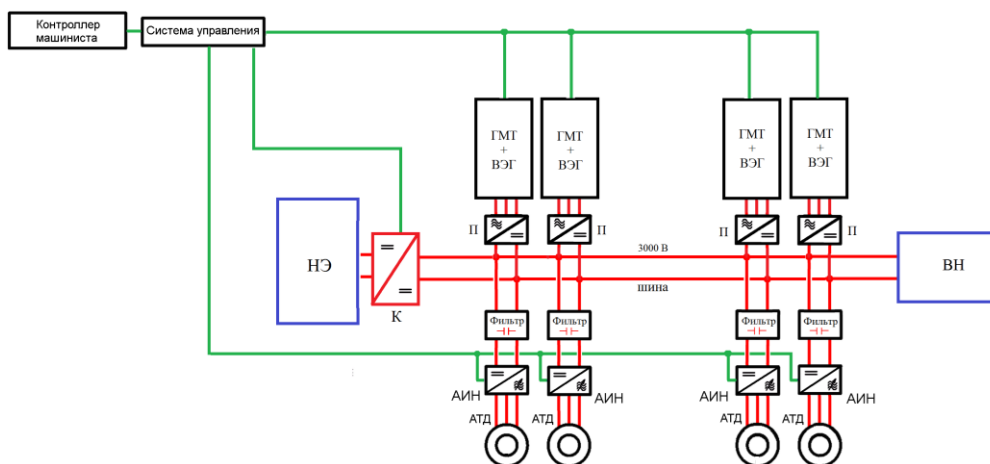


Рисунок 16 – Модульная структурная схема на основе микро-ГТУ: ГМТ – газовая микротурбина; ВЭГ – высокооборотных электрогенератор; П – преобразователь; НЭ – накопитель энергии; К – комутатор; ВН – вспомогательные нужды; АИН – автономный инвертор напряжения; АТД – асинхронный тяговый двигатель

Что касается ВЭГ, он конструктивно расположен на общем валу с микротурбиной для достижения наилучших показателей. В связи с этим, необходимо разработать технические решения, связанные с конструкцией ротора такого ВЭГ, которая определяет его тип, поскольку для применения в составе микро-ГТУ используются только бесколлекторные электрические машины: синхронные машины с постоянными магнитами на роторе или асинхронные машины.

Для изучения особенностей конструкции и управления микро-ГТУ в РГУПС разработан испытательный стенд на мощность 100 кВт (рисунок 17), в рамках соглашения № 14.604.21.0174 (код RFMEFI60417X0174) от 26.09.2017.

Стенд конструктивно состоит из двух бесколлекторных электрических машин, работающих по методу взаимной нагрузки (справа). Статор обеих электрических машин одинаковый, а роторы могут быть разного типа, для возможности экспериментального изучения эффективности применения его различных конструкций. Управляют работой машин два автономных инвертора напряжения (слева), использующего для формирования выходного напряжения метод выборочного удаления гармоник при широтно-импульсной модуляции (SHE PWM метод).



Рисунок 17 – Испытательный стенд разработки РГУПС

В заключение отметим, что практическая реализация изложенных предложений требует, с одной стороны, наличия соответствующего силового оборудования, а с другой стороны, программного обеспечения для надлежащего функционирования тяговой системы локомотива.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В работе сформулированы и обоснованы предложения по повышению энергетической эффективности магистральных автономных локомотивов за счет перехода к модульным силовым установкам:

1 Для тепловоза 2ТЭ25КМ выполнена обработка массивов записей бортовых регистраторов. В результате получены качественные и количественные оценки, позволяющие установить зависимость показателей энергетической эффективности локомотива в различных условиях эксплуатации от массы поезда, профиля участка пути и условий движения на Южном полигоне.

2 Выделен и оценен вклад каждого из элементов системы преобразования энергии в конечные показатели энергетической эффективности – КИМ и КПД тепловоза.

3 Получены зависимости, показывающие распределение времени работы и потребляемой энергии тепловоза от степени использования доступной мощности. Установлено, что в эксплуатационных условиях моноблочная СЭУ тепловоза основную часть времени работает в режимах с низкими значениями КПД дизель-генератора, при работе, как с груженными, так и с порожними поездами.

4 Получено решение дифференциального уравнения движения поезда, а также уравнение баланса мощностей и энергетического баланса. Предложена методика нахождения полезной работы, совершаемой локомотивом с поосным регулированием силы тяги при известной массе поезда, профиле участка пути и заданном скоростном режиме.

5 На основе изложенной методики составлена компьютерная модель. Выполнено сопоставление результатов компьютерного моделирования с записями бортового регистратора, которое показало относительное расхождение в пределах 2 %.

6 В свете тенденций мирового и отечественного локомотивостроения, предложен способ повышения энергетической эффективности магистральных автономных локомотивов за счет перехода к модульным силовым установкам, основанный на принципе приведения мгновенной мощности, генерируемой СЭУ, в соответствие с полезной мощностью на тягу поезда, путем отключения/подключения избыточных модулей.

7 Разработана и обоснована модульная структура тяговой системы АГМЛ, позволяющая реализовать предлагаемый способ. Определены ее параметры. Разработана ее компьютерная модель с использованием программных комплексов «Matlab Simulink» и «Универсальный механизм».

8 Выполнено компьютерное моделирование движения грузового поезда. Изменение числа работающих дизельных двигателей производилось в зависимости от мощности, необходимой для питания ТЭД. Изменение числа активных ТЭД производилось в зависимости от мощности, необходимой на тягу поезда. Результаты сопоставлены с записями бортового регистратора. Получено, что при использовании предложенного способа повышения энергетической эффективности увеличение КПД составляет 6,2 % при сокращении расхода топлива на 19,7 %.

9 Выполнена оценка моторесурса СЭУ согласно линейной модели. Получено, что срок службы тепловоза с модульной структурой СЭУ увеличится на 27 %.

10 Необходимо отметить, что реализация предлагаемой модульной структуры требует, с одной стороны, наличия соответствующего силового оборудования (дизельные двигатели, электромагнитные муфты, генераторы, преобразователи, ТЭД), а с другой стороны, разработки алгоритмов управления и программного обеспечения для надлежащего функционирования тяговой системы локомотива.

11 Рассмотрены альтернативные СЭУ для применения на АГМЛ. В качестве наиболее перспективных отмечены установки на основе газовых турбин и гибридные СЭУ. Для повышения энергетической эффективности таких локомотивов также может быть применен способ, заключающийся в замене моноблочной силовой установки модульной структурой на основе микро-ГТУ и накопителя энергии.

12 Соискатель лично участвовал в разработке генераторов для применения в составе модульной СЭУ.

Основное содержание диссертационного исследования отражено в следующих публикациях:

Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК, и в международных базах данных:

1 Определение полезной работы, совершаемой локомотивом при тяге поезда / А.А. Зарифьян, Н.В. Гребенников, Т.З. Талахадзе, В.В. Сироткин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 1 (69). – С.40-49.

2 Зарифьян, А.А. Анализ эксплуатационных показателей энергетической эффективности грузовых тепловозов / А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 3 (71). – С.46-53.

3 Зарифьян, А.А. Концепция повышения энергетической эффективности тепловозной тяги / А.А. Зарифьян, Н.В. Гребенников, Т.З. Талахадзе, // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9. – 2017. – № 6. – URL статьи: <https://naukovedenie.ru/PDF/122TVN617.pdf>

4 An experimental setup to study a hybrid drive train for a shunting locomotive (Conference Paper) / S. Le Ballois, T. Talakhadze, L. Vido, A. Zarifyan // 2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2016. – DOI: 10.1109/EVER.2016.7476355.

5 Grebennikov, N. Equivalent Magnetic Circuit for Switched Reluctance Motor with Strong Mutual Coupling between Phases (Conference Paper) / N. Grebennikov, T. Talakhadze, A. Kashuba // 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED). Publisher: IEEE – 2019. – DOI: 10.1109/IWED.2019.8664226.

6 Increasing the Energy Efficiency of Rail Vehicles Equipped with a Multi-Motor Electrical Traction Drive (Conference Paper) / T. Talakhadze, N. Grebennikov, A. Zarifyan, A. Zarifyan (jr.), N. Romanchenko, A. Shapshal // 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED). Publisher: IEEE. – 2019. DOI: 10.1109/IWED.2019.8664283.

Статьи в профессиональных журналах, научных сборниках, доклады на научных конференциях и другие публикации:

7 Зарифьян, А.А. Показатели энергетической эффективности локомотивной тяги. уравнение баланса сил / А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. №5 (Спецвыпуск). – С. 20–25.

8 Компьютерная модель реостатных испытаний / Н.В. Гребенников, А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе, В.В. Черников // Локомотивы. XXI век: материалы III Международной научно-технич. конференции, посвященной 85-летию со дня рождения д.т.н., профессора В.В. Стрекопытова. – С.-Петербург, 17-19 ноября 2015 г. – СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – С. 33–38.

9 Experimental installation for studying processes in hybrid traction drive / S. Le Ballois, T. Talakhadze, L. Vido, A. Zarifyan // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт - 2015». Часть 2. Технические науки. – Рост. гос. ун-т путей сообщения. Ростов н/Д, 2015. – С. 145–147.

10 Зарифьян, А.А. Показатели энергетической эффективности локомотивной тяги. Уравнение энергетического баланса / А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. №5 (Спецвыпуск). – С. 27–31.

11 Зарифьян, А.А. О возможности повышения энергетической эффективности локомотивов при работе с частичной нагрузкой / Н.В. Гребенников, А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе // Сб. научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». Том 2. Технические науки. – Рост. гос. ун-т путей сообщения. Ростов н/Д, 2016. – С. 74–76.

12 Талахадзе, Т.З. Опытная установка для изучения процессов в гибридном тяговом приводе / Т.З. Талахадзе // Сб. научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». Том 2. Технические науки. – Рост. гос. ун-т путей сообщения. Ростов н/Д, 2016. – С. 160–162.

13 Талахадзе, Т.З. Обзор существующих видов гибридных силовых установок и перспективы их применения на железнодорожном транспорте / Т.З. Талахадзе // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. №2(35). – С. 64–66.

14 Мировой опыт в гибридном локомотивостроении / А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе, Н.В. Романченко, А.В. Илларионов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. №3(36). – С. 54–59.

15 Пути повышения энергетической эффективности перспективных локомотивов / Н.В. Гребенников, А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе, В.В. Черников // Локомотивы. Транспортно-технологические комплексы. XXI век: материалы V Международной научно-технической конференции, посвященной 180-летию железных дорог России. С.-Петербург, 14-16 ноября 2017 г. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. – С. 351–356.

16 Зарифьян, А.А. Обзор конструкций тягового подвижного состава, оснащенных гибридным тяговым приводом / А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». Том 1. Технические науки. – РГУПС. Ростов н/Д, 2017 – С. 136–139.

17 Зарифьян, А.А. Разработка тягового подвижного состава на гибридной тяге / А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе, Н.В. Романченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. №4 (41). – С. 35–39.

18 Энергетическая эффективность маневровых тепловозов и способы ее повышения / А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе, Н.В. Романченко, А.С. Шапшал // Сборник научных трудов «Современное развитие науки и техники» («Наука-2017»). Том 1. Технические и естественные науки. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2017, С. 214–218.

19 Компьютерная модель перспективного маневрового тепловоза с модульной энергетической установкой / Н.В. Гребенников, А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе, В.В. Черников, В.П. Дудкевич, М.В. Харченко // Компьютерное моделирование на железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ: IV научно-технический семинар, г. Брянск, 3-4 апреля 2018 г.: сб. тез. / под ред. Д.Ю. Погорелова. – Брянск: БГТУ, 2018. – С. 33–36.

20 Модульная силовая энергетическая установка современного тепловоза / А.А. Зарифьян, Н.В. Гребенников, Т.З. Талахадзе, Н.В. Романченко // Сборник научных

трудов «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России», Том 1. Технические науки. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2018. – С. 191–195.

21 The rolling stock with hybrid generator set based on hi-speed gasmicroturbine electric / N. Grebennikov, P. Kolpakhchyan, T. Talakhadze, A. Zarifyan, A. Zarifyan (jr.) // X International Scientific Conference TRANSPORT PROBLEMS 2018, June 27-29, 2018, Katowice, Poland, P. 237–245.

22 Зарифьян, А.А. Повышение энергетической эффективности тепловозов за счет применения модульной силовой установки / А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе // Сборник научных трудов "Транспорт: наука, образование, производство". Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2018. С. 100–104.

23 Зарифьян, А.А. Повышение энергетической эффективности тепловозной тяги путем перехода к модульным силовым установкам / А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе, Н.В. Романченко // Сборник материалов 6 Международной научно-технической конференции ЛОКОМОТИВЫ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ.21 ВЕК. (Том 2) ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра 1» – 2018, С. 208–212.

24 Колпахчян, П.Г. Применение энергетических установок на основе газовых микротурбин на гибридном тяговом подвижном составе / П.Г. Колпахчян, Т.З. Талахадзе, М.С. Подберезная // Сборник материалов 6 Международной научно-технической конференции ЛОКОМОТИВЫ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ.21 ВЕК. (Том 2) ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра 1» – 2018, С. 159–164.

25 Предложения по повышению энергетической эффективности локомотивов ОАО «РЖД», находящихся в эксплуатации / А.Е. Богославский, А.А. Зарифьян, В.М. Коротков, Т.З. Талахадзе // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: материалы третьей международной научно-практической конференции. М.: ООО «ЛокоТех», 2018 г. – С. 121–124.

Личный вклад соискателя. Основные положения и результаты исследований самостоятельно получены автором. Статьи [12, 13] подготовлены единолично. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве: [1–11, 13–25] – постановка задач исследований, проведение расчетов, обработка и обобщение полученных результатов.

Талахадзе Темур Зурабович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
МАГИСТРАЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ ЛОКОМОТИВОВ ЗА СЧЕТ
ПЕРЕХОДА К МОДУЛЬНЫМ СИЛОВЫМ УСТАНОВКАМ**

Автореферат

Подписано в печать __.__.__. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 1,39.

Тираж 100 экз. Заказ 10282.

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

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