

На правах рукописи



Зарифьян Александр Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПАССАЖИРСКИХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ
ПРИВОДОМ ПРИ ПИТАНИИ ОТ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону – 2016

Работа выполнена на кафедре «Электрические машины и аппараты»
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Электрические машины и аппараты» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»
Колпахчян Павел Григорьевич

Официальные оппоненты: Грищенко Александр Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Локомотивы и локомотивное хозяйство» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Кожемяка Николай Михайлович,
кандидат технических наук,
технический директор ЗАО «Научно-технический центр «ПРИВОД-Н», г. Новочеркасск

Ведущая организация: ОАО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава», г. Коломна

Защита состоится 14 ноября 2016 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, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 (главный корпус, конференц-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 «___» сентября 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д218.010.01
доктор технических наук, профессор

В.А. Соломин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В соответствии со «Стратегией развития холдинга "РЖД" до 2030 года» и «Энергетической стратегией ОАО "РЖД" на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года», предусматривается последовательное снижение удельного расхода электроэнергии на тягу поездов: если уровень 2012 года принять за 100%, то к 2030 году он должен составить 94,1%.

Поставленная задача носит системный характер и требует для своего решения принятия целого комплекса мер. Прежде всего, необходимо постепенно переходить к производству электровозов нового поколения, имеющих более высокое значение КПД в номинальном режиме. Такой переход предусмотрен документом «Типы и основные параметры локомотивов» (№747р от 27.11.2002 г.), во исполнение которого промышленностью начат выпуск пассажирских и грузовых электровозов с асинхронным тяговым приводом (АТП). В настоящее время идет накопление опыта их эксплуатации. Существенный вклад в экономию энергетических ресурсов может внести также внедрение систем энергооптимального автоведения поездов.

Однако анализ эксплуатационных показателей энергетической эффективности пассажирских электровозов с АТП в реальных режимах движения показывает, что они в ряде случаев не находятся на должном уровне. Причина заключается в том, что двухсистемные электровозы ЭП20 ведут поезда без смены локомотива на всем протяжении маршрута (около 1800 км для линии Москва – Адлер), который проходит по территориям с самым разнообразным рельефом местности и состоянием пути, где имеются ограничения по скорости, а вес поезда в осенне-зимний период меньше расчетного. Как следствие, электровоз длительное время работает с частичной нагрузкой и его энергоэффективность далека от номинальной.

Степень разработанности темы исследования. Проблема недоиспользования доступной мощности локомотива при легком профиле пути и небольшой скорости движения, для неполновесных и порожних составов, неоднократно поднималась в связи с грузовыми перевозками, поскольку многие участки железных дорог характерны неравномерностью грузопотоков в четном и нечетном направлениях.

Применительно к пассажирским перевозкам, где, в отличие от грузовых, масса состава изменяется незначительно, проблема энергетической эффективности встала со всей остротой лишь после начала работы электровоза ЭП20, длительная мощность которого составляет 6600 кВт и позволяет вести поезд из 24 вагонов со скоростью 160 км/ч, или поезд из 17 вагонов со скоростью 200 км/ч. В реальных условиях эксплуатации, на линии С.-Петербург – Москва коэффициент использования мощности (КИМ) электровоза в режиме тяги составляет 0,406 при средней скорости около 140 км/ч; а на перегоне Москва – Рязань КИМ в режиме тяги равен 0,156 при средней скорости около 70 км/ч.

Мощность локомотива, реализуемая в режиме тяги, определяется такими факторами, как масса и длина поезда, профиль пути и скоростной режим. Тяговый привод локомотива является многодвигательным, и для реализации необходимого тягового усилия в текущий момент времени целесообразно использовать минимально достаточное число двигателей. Поскольку на электровозе ЭП20 имеется возможность поосного (индивидуального) регулирования мощности каждого двигателя вплоть до его полного вывода из тяги, вопрос оперативного отключения/подключения одной или нескольких осей в автоматическом режиме может быть решен на верхнем уровне системы управления.

Объектом исследования являются пассажирские электровозы с асинхронным тяговым приводом.

Предметом исследования является энергетическая эффективность пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока.

Целью работы является создание метода адаптивного автоматического управления энергетической эффективностью пассажирского электровоза с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока, основанного на возможности изменения числа работающих тяговых двигателей в зависимости от нагрузки, обусловленной условиями движения. Разработанные алгоритмы должны обеспечить стабилизацию мгновенных значений коэффициента полезного действия (при работе с частичной нагрузкой) на уровне его номинального значения. В результате будет достигнуто повышение энергетической эффективности локомотивной тяги.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. На основании критического анализа литературных источников сделан вывод о возможности повышения энергоэффективности электровоза с многодвигательным тяговым приводом путем регулирования мощности и числа работающих тяговых двигателей.

2. Выполнена обработка записей бортового регистратора, что позволило установить зависимость показателей энергоэффективности электровоза от его скорости, профиля пути и составности поезда в различных условиях движения. Путем статистической обработки массивов записей бортового регистратора получена зависимость КПД электровоза от реализуемой мощности, построена аналитическая аппроксимация полученной зависимости.

3. Разработан алгоритм адаптивного автоматического управления энергетической эффективностью пассажирского электровоза с АТП при питании от сети постоянного тока. Алгоритм обеспечивает стабилизацию мгновенных значений КПД электровоза при работе с частичной нагрузкой на уровне его номинального значения, имеющего место при полной нагрузке. Предложена структура системы управления тяговыми двигателями, включающая этот алгоритм.

4. Создана полноразмерная компьютерная модель электровоза как управляемой электромеханической системы, причем реализовано индивидуальное (поосное) регулирование силы тяги. Построена компьютерная модель пассажирского поезда, включающего электровоз и состав, позволяющая воспроизво-

дить режим ведения поезда по конкретному участку и рассчитывать основные показатели энергопотребления.

5. Выполнено компьютерное моделирование движения пассажирского поезда по типовым участкам условных профилей длиной около 150 км, как при всех работающих тяговых двигателях, так и с использованием предлагаемого алгоритма управления энергоэффективностью путём регулирования мощности и числа тяговых двигателей. Получено, что для составов из 11 и 17 вагонов при движении со скоростью 72 км/ч экономия электроэнергии может составить 18...25%, при скорости 126 км/ч – 6...10%, на высокой скорости (180 км/ч) – в пределах 3%.

6. Сформулированы дополнительные требования, которые должны быть соблюдены при использовании предлагаемого алгоритма управления энергетической эффективностью. Изучены условия работы в контакте «колесо-рельс» для всех колесных пар, свидетельствующие об отсутствии срывов в буксование при отключении/подключении тяговых двигателей.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применены методы: статистической обработки больших массивов экспериментальных данных; формальной логики (составление алгоритмов управления); теории электрических цепей (моделирование электрической части электровоза); формальный метод Ньютона-Эйлера (моделирование механической части электровоза); компьютерного моделирования с помощью программного комплекса «Универсальный Механизм» (построение моделей электровоза и пассажирского поезда).

Достоверность полученных результатов обеспечена корректностью формулировок математических задач и компьютерных моделей, адекватностью примененных методов и специализированных программных комплексов, и подтверждается сопоставлением результатов, полученных путем компьютерного моделирования, с данными записей бортового регистратора. Различие по энергопотреблению находится в пределах несколько процентов (при всех работающих тяговых двигателях), что свидетельствует о достоверности результатов компьютерного моделирования и позволяет использовать их для оценки энергопотребления.

Основные научные результаты и положения, выносимые автором на защиту:

1. Зависимость КПД электровоза от развиваемой им мощности, полученная путем статистической обработки записей бортового регистратора; аналитическая аппроксимация полученной зависимости.

2. Алгоритм адаптивного автоматического управления энергетической эффективностью пассажирского электровоза с АТП при питании от сети постоянного тока, который обеспечивает стабилизацию мгновенных значений КПД электровоза при работе с частичной нагрузкой на уровне его номинального значения.

3. Полноразмерная компьютерная модель пассажирского электровоза с АТП как управляемой электромеханической системы, при наличии индивидуального (поосного) регулирования силы тяги. Компьютерная модель пассажир-

ского поезда, включающего электровоз и состав, позволяющая воспроизводить режим ведения поезда по конкретному участку и рассчитывать основные показатели энергопотребления.

4. Сопоставление результатов, полученных путем компьютерного моделирования движения поезда, с данными записей бортового регистратора. Различие по энергопотреблению не превышает нескольких процентов (при всех работающих тяговых двигателях).

5. Оценки повышения энергетической эффективности, полученные для движения пассажирского поезда с различными скоростями по типовым участкам условных профилей при использовании предлагаемого алгоритма.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Впервые, путем обработки экспериментальных данных, получена зависимость КПД пассажирского электровоза с АТП от развиваемой им мощности.

2. Создан алгоритм адаптивного автоматического управления энергоэффективностью пассажирского электровоза с АТП при питании от сети постоянного тока, обеспечивающий стабилизацию мгновенных значений КПД электровоза при работе с частичной нагрузкой на уровне его номинального значения.

3. Разработана компьютерная модель пассажирского электровоза с АТП при питании от сети постоянного тока при наличии поосного (индивидуального) регулирования тяговых двигателей.

4. Разработана компьютерная модель пассажирского поезда, позволяющая воспроизводить режим ведения поезда по конкретному участку и рассчитывать основные показатели энергопотребления. Достоверность результатов, полученных путем компьютерного моделирования, подтверждена тем, что для конкретных участков расхождение по энергопотреблению от записей бортового регистратора не превышает нескольких процентов (при всех работающих тяговых двигателях), что дает возможность использовать результаты компьютерного моделирования для оценки энергопотребления.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы состоит, главным образом, в установлении зависимости КПД электровоза от развиваемой им мощности и в разработанном алгоритме управления энергетической эффективностью, который может быть распространен не только на пассажирские, но и на грузовые электровозы. Практическая ценность заключается в получении значительного экономического эффекта за счет снижения потребления электроэнергии на локомотивную тягу. Применение предлагаемого алгоритма управления энергоэффективностью путём регулирования мощности и числа тяговых двигателей позволяет, согласно полученным оценкам, обеспечить экономию электроэнергии порядка 18...25% на скорости 72 км/ч; 6...10% – на скорости 126 км/ч, и в пределах 3% – на скорости 180 км/ч. Экономия обеспечивается за счет стабилизации мгновенных значений КПД электровоза при работе с частичной нагрузкой на уровне его номинального значения, имеющего место при полной нагрузке. Например, при использовании предлагаемого алгоритма, потребление электрической энергии на участке

Москва – Рязань может быть сокращено более чем на 25% без отклонений от графика.

Результаты диссертации реализованы в виде алгоритмов и программного обеспечения, которые используются в ООО «Технологии рельсового транспорта» (совместное предприятие ЗАО «ТрансМашХолдинг» и фирмы «Alstom») при проектировании систем управления новых электропоездов, о чем имеется акт внедрения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Международных научно-практических конференциях «Транспорт – 2014, 2015, 2016» – Ростов н/Д, РГУПС, 2014-16; II и III научно-технических семинарах «Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: вопросы динамики, прочности и износа» – Брянск, БГТУ, 2014-2016; VI International Scientific Conference «Transport Problems-2014» – Katowice (Poland), Silesian University of Technology, 2014; II Международной научно-технической конференции «Локомотивы XXI век» – СПб: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2014; Международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России» – Ростов н/Д, РГУПС, 2014; Международной научно-технической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» – Ростов н/Д, РГУПС, 2015; VIII Международном симпозиуме «Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта» (Элтранс-2015) – СПб: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2015; выездном заседании секции «Локомотивное хозяйство» НТС ОАО «РЖД» – Новочеркасск, ООО ПК НЭВЗ, 10.06.2015; заседании кафедры «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта ФГБОУ ВО «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II», 26.11.2015.

Работа полностью доложена и обсуждена 3 июня 2016 г. на совместном заседании кафедр «Локомотивы и локомотивное хозяйство» и «Электрические машины и аппараты» с приглашением специалистов других кафедр ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения».

Публикации. Основные положения опубликованы в 16 работах, из них 4 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, и 2 статьи в журналах, входящих в базу Scopus. Подана заявка на патент на изобретение № 2015139252/11(060332).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа общим объемом 121 страница состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава «Состояние вопроса. Постановка задачи исследования» содержит формулировку проблемы энергосбережения при работе тягового подвижного состава и обзор публикаций по возможности экономии электроэнергии на тягу за счет отключения части ТЭД. Большой вклад в поиск путей решения задачи повышения энергоэффективности локомотивной тяги путем регулирования числа одновременно работающих тяговых двигателей внесли такие исследователи, как В.В. Артемчук, В.М. Бабич, Е.Г. Бове, О.И. Бондарь, П.И. Борцов, Х.Я. Быстрицкий, А.А. Варламов, Г.К. Гетьман, В.И. Гончаров, З.М. Дубровский, В.Л. Закорюкин, А.В. Заручейский, Г.Я. Классен, П.Ю. Красовский, А.Н. Крыгин, В.Г. Кузнецов, В.Ф. Кулиш, А.С. Курбасов, В.А. Кучумов, В.А. Легостаев, В.Н. Лисунов, Н.О. Логвинова, Р.Я. Медлин, Д.В. Мурзин, Р.В. Мурзин, О.А. Некрасов, Н.Б. Никифорова, А.Е. Пыров, В.И. Рахманинов, С.М. Рождественский, О.И. Саблин, В.А. Сенаторов, С.В. Сорокин, Н.Г. Тарасов, Ю.А. Усманов, С.В. Фадеев, В.П. Феоктистов, В.В. Ширяев, В. Dalla Chiara, A. Muller, M. Netz, M. Niessen, R. Ricagno, M. Santarelli, J. Schaarschmidt и другие.

Как показывает опыт эксплуатации пассажирских электровозов с АТП, начавших работать на российских железных дорогах, их доступная мощность в различных условиях движения используется далеко не полностью. Причина неполного использования мощности заключается в том, что современные электровозы ведут пассажирские поезда без смены локомотива на всем протяжении маршрута по территориям с самым разнообразным рельефом местности и состоянием пути, а вес поезда часто меньше расчетного. Как следствие, условия для обеспечения высокой энергоэффективности на всем маршруте далеки от оптимальных.

Анализ публикаций в технической литературе по проблеме повышения энергоэффективности локомотивной тяги и опыт практической эксплуатации электровозов нового поколения позволили сформулировать основные направления повышения энергетической эффективности пассажирских электровозов:

1. Вождение поездов полной составности со скоростью, близкой к конструкционной, что даст повышение реализуемой мощности вплоть до номинальной, в результате чего эксплуатационный КПД электровоза достигнет паспортного значения. Для этого требуется наличие стабильного пассажиропотока и пути в хорошем состоянии, позволяющем поддерживать высокую скорость движения. В перспективе, по мере модернизации инфраструктуры, этого можно достичь.

2. Отключение части двигателей при неполной нагрузке. Поскольку на электровозе ЭП20 имеется возможность поосного (индивидуального) регулирования мощности тяговых двигателей, вопрос оперативного отключения/подключения одной или нескольких осей в автоматическом режиме, то есть

без вмешательства машиниста, может быть решен на верхнем уровне системы управления. Этот вариант, в настоящее время, со всех точек зрения является более реалистичным и быстрее реализуемым.

В первой главе также рассмотрены особенности силовой схемы пассажирских электровозов с АТП и проанализирован опыт их эксплуатации. Сформулированы цели и задачи исследования.

Вторая глава «Алгоритм повышения энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока» содержит анализ эксплуатационных показателей энергетической эффективности электровоза на различных участках, определена зависимость показателей энергоэффективности от режима работы. Синтезирован алгоритм управления энергетической эффективностью локомотива.

Необходимо различать КПД локомотива как силовой установки и КПД эксплуатационный, который зависит от времени работы локомотива в различных режимах при движении поезда и от расхода энергии на поддержание локомотива в работоспособном состоянии во время стоянок.

Построена энергетическая диаграмма электровоза ЭП20 в номинальном (часовом) режиме при питании от сети постоянного тока. Расходы на собственные нужды составляют 184 кВт (2,29%). Потери в силовой электрической цепи составляют 675 кВт (8,38%). Мощность на валах тяговых двигателей составляет 7200 кВт, это значение приводится в технической документации как «часовая мощность ТЭД». «Длительная мощность ТЭД» равна 6600 кВт. Потери мощности после ТЭД составляют 144 кВт (1,79%) за счет трения в зубчатой тяговой передаче и подшипниках. «Часовая касательная мощность» (мощность на тягу) составляет 7056 кВт. КПД в часовом режиме при питании от сети постоянного тока равен $\eta_{\text{ном}} = 87,55\%$.

Эксплуатационный КПД электровоза может быть представлен как

$$\eta_{\text{э}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{затр}}} = \frac{P_{\text{т}}}{P_{\text{т}} + P_{\text{п}} + P_{\text{сн}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{пол}}$ – полезная мощность, $P_{\text{затр}}$ – затраченная мощность, $P_{\text{т}} = P_{\text{пол}}$ – мощность на тягу поезда (касательная мощность), $P_{\text{п}}$ – мощность потерь, $P_{\text{сн}}$ – мощность, затрачиваемая на собственные нужды.

Коэффициент использования мощности γ (КИМ) представляет собой отношение полезной мощности, реализуемой локомотивом в данный момент времени, к его номинальной мощности.

Для исследования показателей энергетической эффективности электровоза были использованы записи мгновенных значений следующих величин, полученных с помощью бортового регистратора: касательной силы тяги электровоза $F_{\text{к}}$; его скорости V ; напряжения в контактной сети $U_{\text{с}}$; тока, потребляемого электровозом I .

Касательная мощность электровоза $P_{\text{т}}$ (мощность на тягу) равна, в данный момент времени,

$$P_{\text{т}} = F_{\text{к}} \cdot V, \quad (2)$$

тогда полезная энергия E_T , направленная на тягу поезда, будет равна интегралу от P_T за все время движения:

$$E_T = \int P_T dt. \quad (3)$$

Мощность $P_{затр}$, потребляемая из контактной сети в данный момент времени, равна

$$P_{затр} = U_c \cdot I, \quad (4)$$

а полная затраченная электровозом энергия $E_{затр}$ равна интегралу от $P_{затр}$ за все время движения:

$$E_{затр} = \int P_{затр} dt. \quad (5)$$

В работе приведены графики скорости, силы тяги, полной потребляемой мощности и мощности на тягу для скоростного участка Октябрьской ж.д., горного участка Северо-Кавказской ж.д. и равнинного участка Московской ж.д., имеющего ограничение по скорости, полученные при обработке записей бортового регистратора. Основные параметры движения на этих участках представлены в таблице 1.

Таблица 1 Основные параметры участков

Параметр \ Участок	СПб – Москва	Туапсе – Г. Ключ	Москва – Рязань
Расстояние, км	644,5	83	199
Время в пути, мин (ч)	278 (4,63)	85 (1,42)	176 (2,93)
Время в режиме тяги, мин (ч)	169 (2,81)	40 (0,67)	86 (1,44)
Средняя скорость, км/ч	139,1	58,6	67,8
Максимальная скорость, км/ч	198	83	118

Показатели энергетической эффективности на этих участках приведены в таблице 2, сначала во всех режимах работы, а затем только в режиме тяги.

В качестве иллюстрации, на рисунке 1 показан фрагмент записи бортового регистратора пассажирского электровоза ЭП20-006 с фирменным поездом «Невский экспресс», полученные на скоростном участке С.-Петербург – Москва. Машинист в данном случае управляет электровозом вручную, при помощи задания мощности на тягу. Равнинный профиль и хорошее состояние пути позволяют двигаться со скоростью до 200 км/ч.

В результате анализа данных бортового регистратора сделаны выводы, подтверждающие целесообразность отключения части ТЭД при неполной нагрузке:

- на скоростном прямом равнинном участке С.-Петербург – Москва, при скорости до 200 км/ч, среднее значение КПД в режиме тяги составляет $\eta = 0,787$; КИМ на данном участке равен $\gamma = 0,406$;

- на участке с большим количеством кривых, подъемом до 9...15‰ и ограничением скорости (первые 20 км участка Туапсе – Горячий Ключ), КПД составляет $\eta = 0,709$; КИМ на данном участке равен $\gamma = 0,16$;

- на перевальном участке (20-35 км участка Туапсе – Горячий Ключ), при подъеме с уклоном до 23‰, КПД составляет $\eta = 0,823$; КИМ равен $\gamma = 0,325$.

- на равнинном участке Москва – Рязань с ограничением скорости КПД равен $\eta = 0,65$. Значение КИМ равно $\gamma = 0,156$;

- наилучшие мгновенные показатели энергоэффективности достигаются при разгоне до скорости 200 км/ч на прямом равнинном участке и при подъеме на перевал с уклоном до 23‰.

Таблица 2 Показатели энергетической эффективности

№№	Параметр \ Участок	СПб – Москва	Туапсе – Г. Ключ	Москва – Рязань
<u>По всем режимам</u> (за всю поездку)				
1	Полная энергия, потребленная из контактной сети, кВт·ч	11055	1523	2841
2	Потенциально возможная энергия на валах ТЭД (исходя из часовой мощности 7200 кВт), кВт·ч	33342	10152	21059
3	Энергия на валах АТД, кВт·ч	8218	1089	1620
4	КИМ = (3) / (2)	0,246	0,107	0,077
5	КПД = (3) / (1)	0,743	0,715	0,570
6	Средняя мощность на тягу, кВт	1775	767	553
<u>Движение в режиме тяги</u> (за всю поездку)				
7	Энергия, потребленная из контактной сети, кВт·ч	10442	1430	2494
8	Потенциально возможная энергия на валах ТЭД (исходя из часовой мощности 7200 кВт), кВт·ч	20232	4824	10368
9	КИМ = (3) / (8)	0,406	0,226	0,156
10	КПД = (3) / (7)	0,787	0,762	0,650
11	Средняя мощность на тягу, кВт	2921	1625	1125

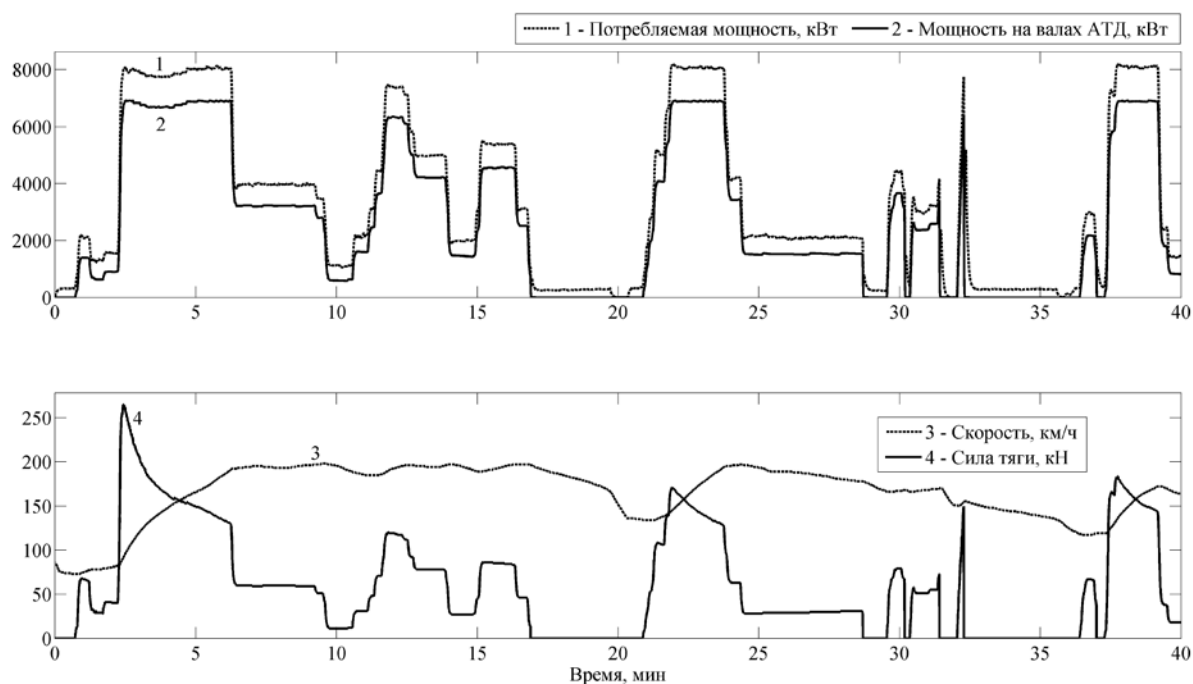


Рисунок 1 Фрагмент записи бортового регистратора на участке С.-Петербург – Москва:
вверху: 1 – мощность, потребляемая из сети, кВт; 2 – мощность на валах АТД, кВт; внизу: 3 – скорость, км/ч; 4 – сила тяги, кН

Путем статистической обработки записей бортового регистратора, получена зависимость КПД электровоза от его мгновенной мощности. Построена аналитическая аппроксимация полученной опытным путем зависимости КПД локомотива η от коэффициента использования мощности γ (рисунок 2, кривая 1) при работе всех шести ТЭД, она имеет вид

$$\eta = \frac{\gamma}{1,0983\gamma + 0,044546}. \quad (6)$$

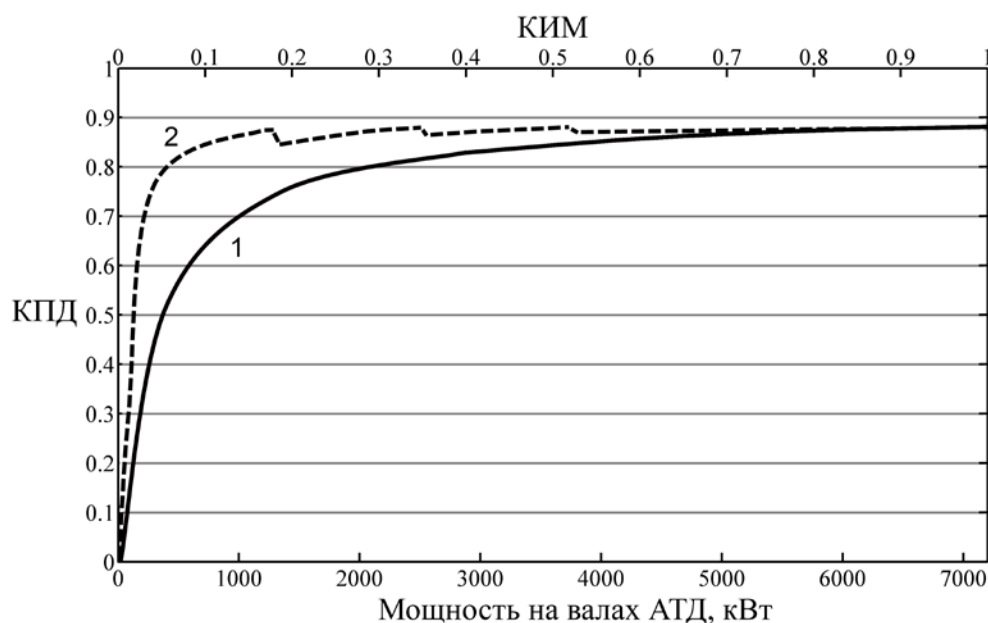


Рисунок 2 КПД электровоза в зависимости от КИМ (верхняя шкала) и мощности на валах АТД (нижняя шкала): 1 — по данным регистратора, 2 — при использовании предлагаемого алгоритма

Предложен алгоритм (рисунок 3) адаптивного автоматического управления энергетической эффективностью пассажирского электровоза с АТП при питании от сети постоянного тока. В результате обеспечивается стабилизация значений КПД электровоза при работе с частичной нагрузкой на уровне, близком к его номинальному значению, чем достигается повышение энергетической эффективности локомотивной тяги и существенное снижение расхода электроэнергии.

На основании выполненных расчетов, построены графики изменения КПД электровоза в зависимости от реализуемой мощности (рисунок 2, кривая 2). Видно, что при работе с частичной нагрузкой (до 50% часовой мощности, то есть до 3600 кВт), КПД электровоза при всех работающих ТЭД находится в пределах 0,42...0,84. При использовании предлагаемого алгоритма, КПД электровоза повышается, стабилизируется и находится в пределах 0,85...0,875 практически во всем диапазоне мощностей — от 700 до 7200 кВт.

Отметим, что предлагаемый алгоритм дает наибольший эффект при частичных нагрузках — в диапазоне реализуемых мощностей до 60% от номинальной мощности, если же реализуемая мощность составляет более 60% от номинальной, то повышение КПД незначительно, в пределах 2%.

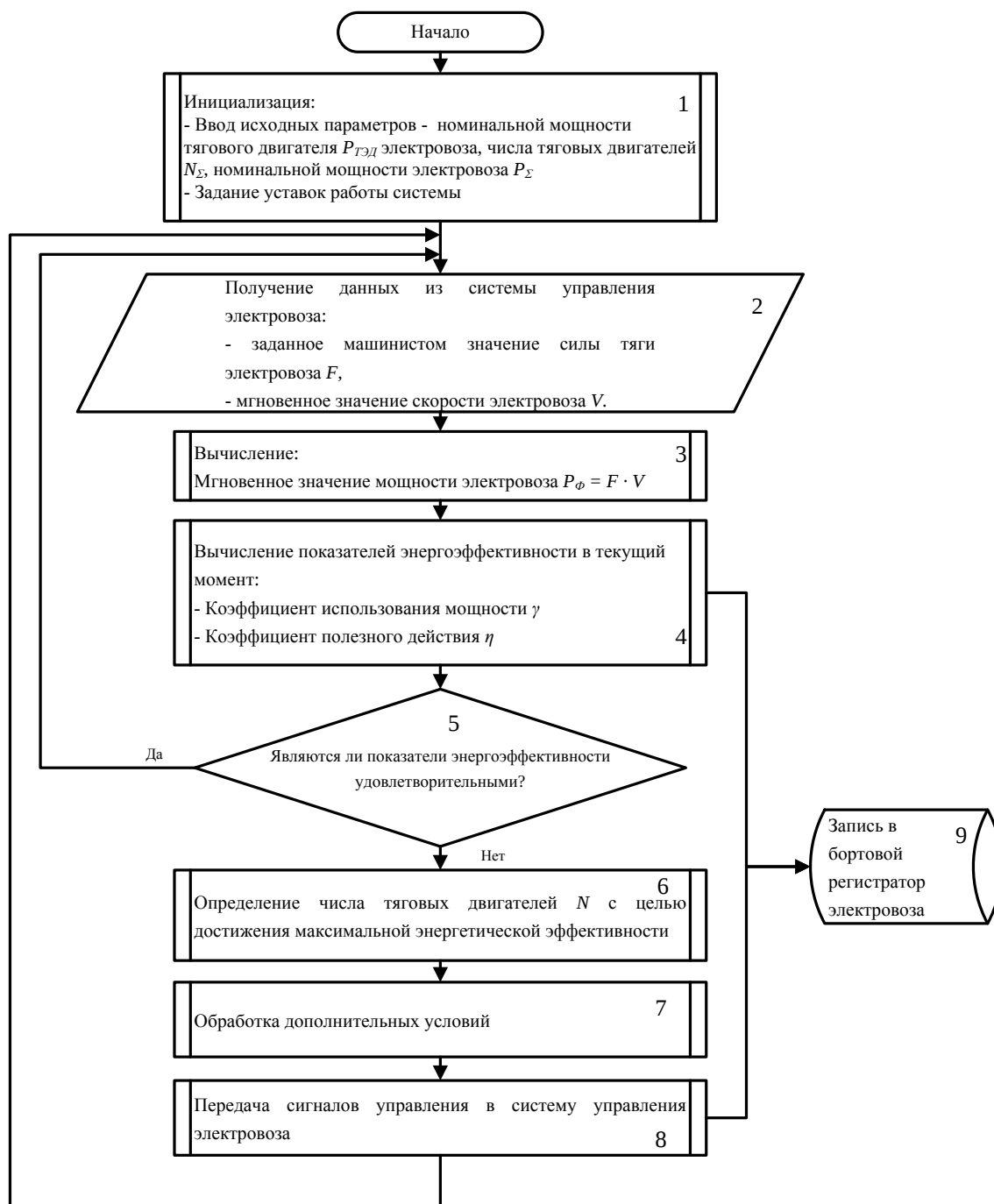


Рисунок 3 Блок-схема алгоритма управления энергетической эффективностью

Таким образом, можно говорить о штатном режиме работы электровоза, когда все ТЭД находятся в тяге, и об энергоэффективном режиме, когда некоторые двигатели временно выводятся из тяги.

Третья глава «Построение компьютерных моделей электровоза и пассажирского поезда» содержит описание разработанных компьютерных моделей пассажирского электровоза с АТП при питании от сети постоянного тока и пассажирского поезда. Для получения оценок потребления электроэнергии в штатном режиме тяги (при всех работающих ТЭД) и в предлагаемом энергоэффективном режиме (при регулировании числа работающих ТЭД) целесообразно

использовать методы компьютерного моделирования. Вопросы создания компьютерных моделей локомотивов рассмотрены в работах Ю.А. Бахвалова, П.Г. Колпахчыяна, Д.Ю. Погорелова, Е.М. Плохова, В.А. Симонова, В.П. Янова и других.

Построена полноразмерная компьютерная модель электровоза с АТП при питании от сети постоянного тока как управляемой электромеханической системы, причем реализовано индивидуальное (поосное) регулирование силы тяги. На верхнем уровне системы управления предлагается разместить «Регулятор количества ТЭД в режиме тяги», реализующий алгоритм управления энергетической эффективностью, в чем состоит главное отличие от известных моделей (рисунок 4).

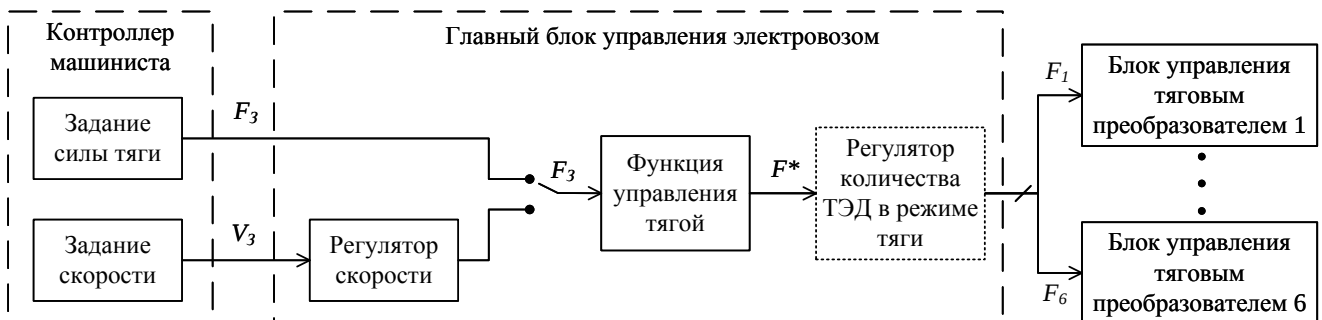


Рисунок 4 Структурная схема системы управления силой тяги

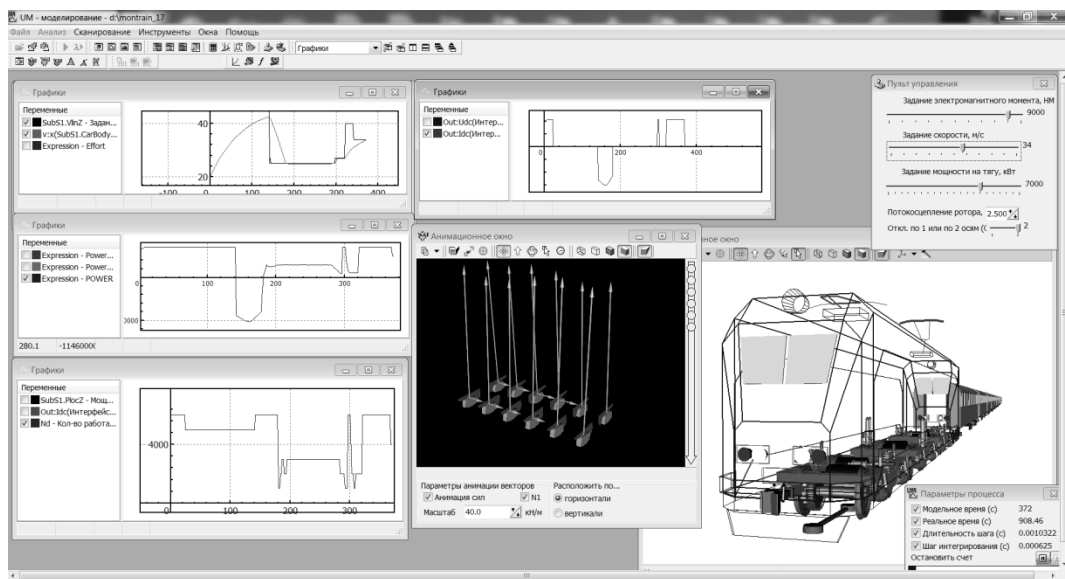


Рисунок 5 Компьютерная модель поезда в ПК «Универсальный механизм»

В состав полноразмерной компьютерной модели электровоза входят: механическая часть, электрическая часть (устройства преобразования энергии и тяговые двигатели) и система управления (алгоритмы управления и их программная реализация). Модель адаптирована к решению задач энергоэффективности.

Компьютерная модель пассажирского поезда, состоящего из электровоза и состава пассажирских вагонов, построена по методике ПК «Универсальный

Механизм» (рисунок 5) и позволяет получать оценки потребления электроэнергии как в штатном режиме тяги (при всех работающих ТЭД), так и в предлагаемом в настоящей работе энергоэффективном режиме (при регулировании числа работающих ТЭД). С её помощью возможно проведение расчетов движения на участках протяженностью сотни километров, с учетом скоростного режима и продольного профиля пути.

В четвертой главе «Оценка энергетической эффективности электровоза в различных режимах работы при использовании предлагаемого алгоритма» приводятся результаты компьютерного моделирования движения пассажирского поезда по различным участкам, как в штатном режиме, так и при использовании энергоэффективного алгоритма, предложенного в главе 2. Выполнено сопоставление с записями бортового регистратора и других источников объективной информации, даны оценки снижения расхода электрической энергии.

Рассмотрим движение на равнинном участке Москва – Рязань, длина которого составляет около 200 км, спрямленный продольный профиль участка показан на рисунке 7, а. Записи регистратора взяты для поезда №104, 07.04.2014, электровоз ЭП20-015, состав из 11 вагонов. Полное время движения составило 2 ч 56 мин, средняя скорость 67,8 км/ч, максимальная скорость 118 км/ч.

Электровоз работал в штатном режиме (все двигатели в тяге). По записям регистратора построены графики скорости и силы тяги (рисунок 6, б). По данным регистратора, потребление энергии из КС за всю поездку составило 2841 кВт·ч, энергия на тягу равна 1620 кВт·ч (графики на рисунке 6, в). Эксплуатационный КПД равен 0,57.

На первом этапе компьютерного моделирования в программу были введены спрямленный профиль участка и число пассажирских вагонов, а скоростной режим воспроизводил записи регистратора. Силы сопротивления движению взяты согласно ПТР, в тяге находились все шесть ТЭД.

Полученные результаты показали, что отклонение значений скорости и силы тяги по результатам моделирования от записей регистратора крайне незначительно (сравни рисунки 6, б и 6, г). Отсюда был сделан вывод об адекватности модели, и осуществлен переход ко второму этапу расчетов. Компьютерная модель электровоза была дополнена блоком, позволяющим регулировать число и мощность тяговых двигателей в зависимости от мгновенной реализуемой мощности электровоза согласно предлагаемому алгоритму.

Затем было выполнено моделирование движения поезда по этому участку в энергоэффективном режиме (при регулировании числа работающих ТЭД) и при условии соблюдения графика движения и скоростного режима. Изменение числа ТЭД, находящихся в режиме тяги, показано на рисунке 6, д. Потребление энергии из КС составило 2087 кВт·ч (рисунке 6, е), энергия на тягу составила 1620 кВт·ч.

Таким образом, расход электрической энергии на участке Москва – Рязань за счет применения предлагаемого алгоритма уменьшится на $2841 - 2087 = 754$ кВт·ч (более чем на 25%). Эксплуатационный КПД электровоза составляет 0,57 в штатном режиме, а в энергоэффективном режиме он равен 0,776.

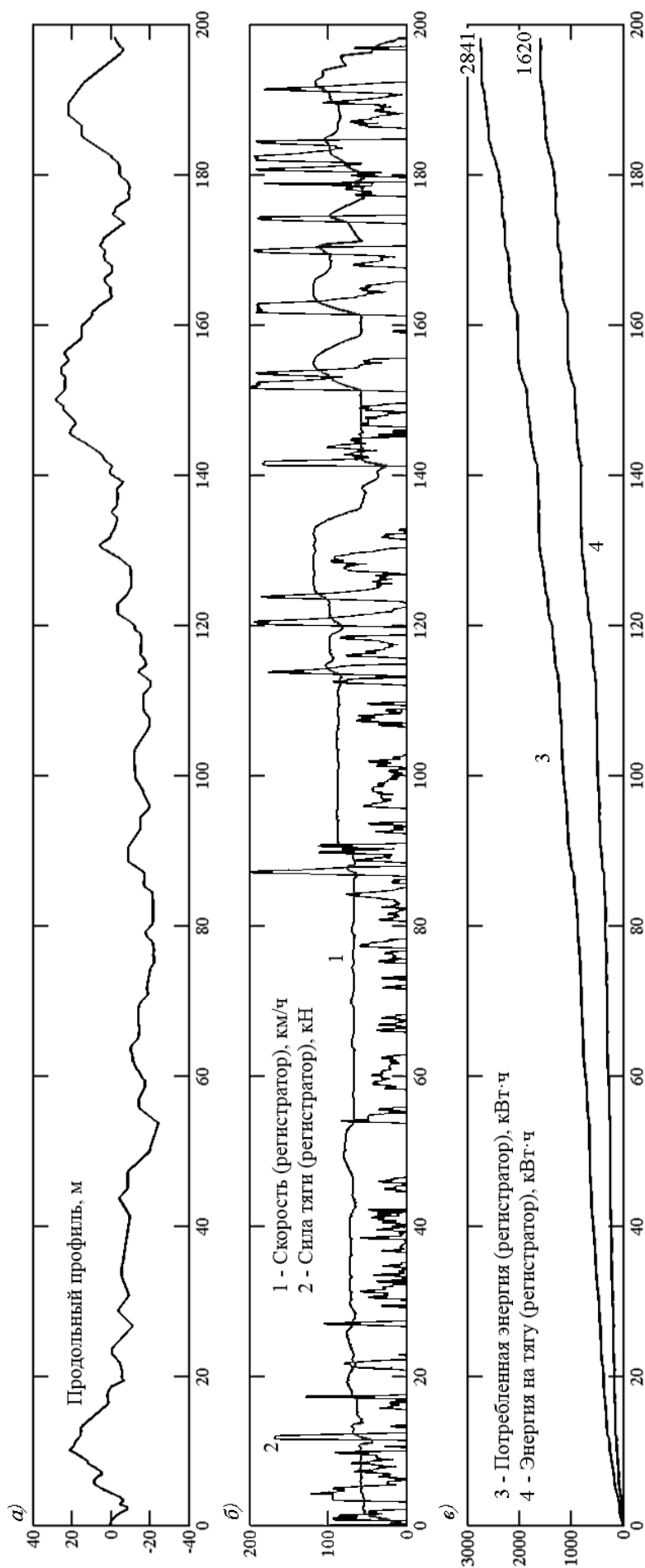


Рисунок 6 Участок Москва – Рязань:

а) – продольный профиль пути; б) – скорость и сила тяги (данные регистратора);
в) – энергетические показатели при работе всех ТЭД (данные регистратора)

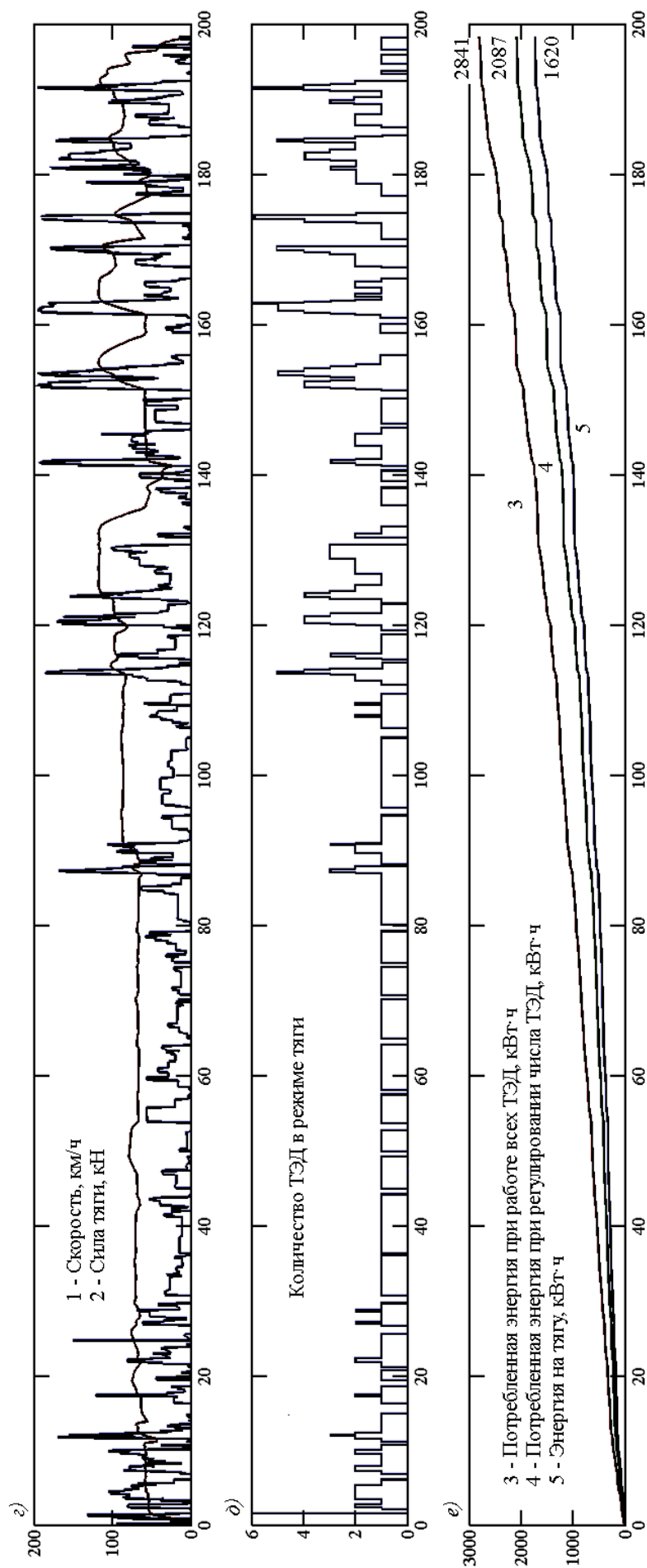


Рисунок 6 (продолжение) Участок Москва – Рязань:

- а) – скорость и сила тяги (компьютерное моделирование);
 б) – количество ТЭД в режиме тяги (работа в энергоэффективном режиме);
 в) – энергетические показатели в штатном и энергоэффективных режимах

На скоростном участке С.-Петербург – Москва проводились поездки электровоза ЭП20 с поездами «Невский Экспресс» при одном отключенном тяговом двигателе. По информации Октябрьской ж.д., выявлена положительная динамика снижения удельного расхода электроэнергии на 4% по сравнению со штатным режимом (все шесть ТЭД в тяге). Согласно результатам компьютерного моделирования, при одном отключенном ТЭД удельный расход снижается на 3,38%, что в целом соответствует данным Октябрьской ж.д. Если же применить предлагаемый алгоритм, то удельный расход за поездку в том же скоростном режиме снизится на 6,6%.

На горном участке Туапсе – перевал поезд поднимается на высоту около 300 м на протяжении 35 км. Применение энергоэффективного алгоритма позволит увеличить эксплуатационный КПД электровоза от 0,777 (в штатном режиме) до 0,835. Потребление электрической энергии из контактной сети составляет в штатном режиме 1305 кВт·ч, и снижается до 1214 кВт·ч в энергоэффективном режиме при совершенной работе на тягу 1014 кВт·ч.

Произведена оценка показателей энергоэффективности при движении по участкам с условными профилями (рисунок 7), согласно методике¹:

- I-II тип, равнинный, с уклонами не более 6‰;
- III тип, холмистый, с уклонами до 9‰;
- IV тип, горный, с уклонами до 11‰.

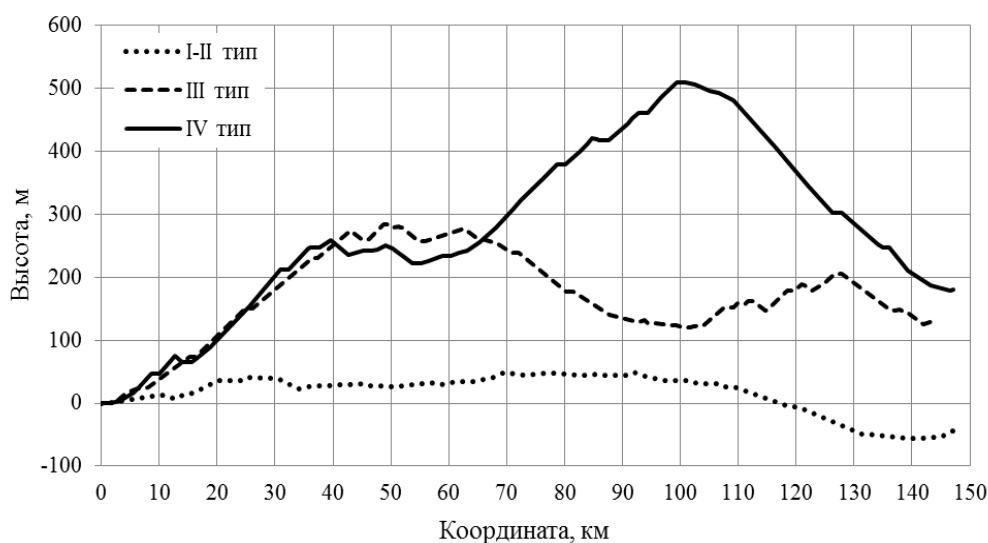


Рисунок 7 Участки с условным профилем различных типов:
I-II – равнинный; III – холмистый; IV – горный

Моделирование было проведено для различных скоростей движения при двух вариантах составности поезда: 11 вагонов (зимнее расписание) и 17 вагонов (летнее расписание). Результаты, полученные в работе, свидетельствуют о возможности получения существенного экономического эффекта при работе электровоза с частичной нагрузкой.

¹ Методика расчета индикатора энергоэффективности электровоза. Утверждено ОАО «РЖД» 26.12.2014, №519. Одобрено Научно-техническим советом ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения», протокол № 3 от 11.12.2014 г. – 29 с.

Для оценки энергоэффективности в «Методике...» рекомендуется участок с универсальным профилем, в котором доля профилей I-II типа составляет 49,3%, III типа – 37,6%, IV типа – 13,1%. Для такого участка длиной около 150 км было выполнено моделирование, результаты которого представлены на рисунках 8 – 10.

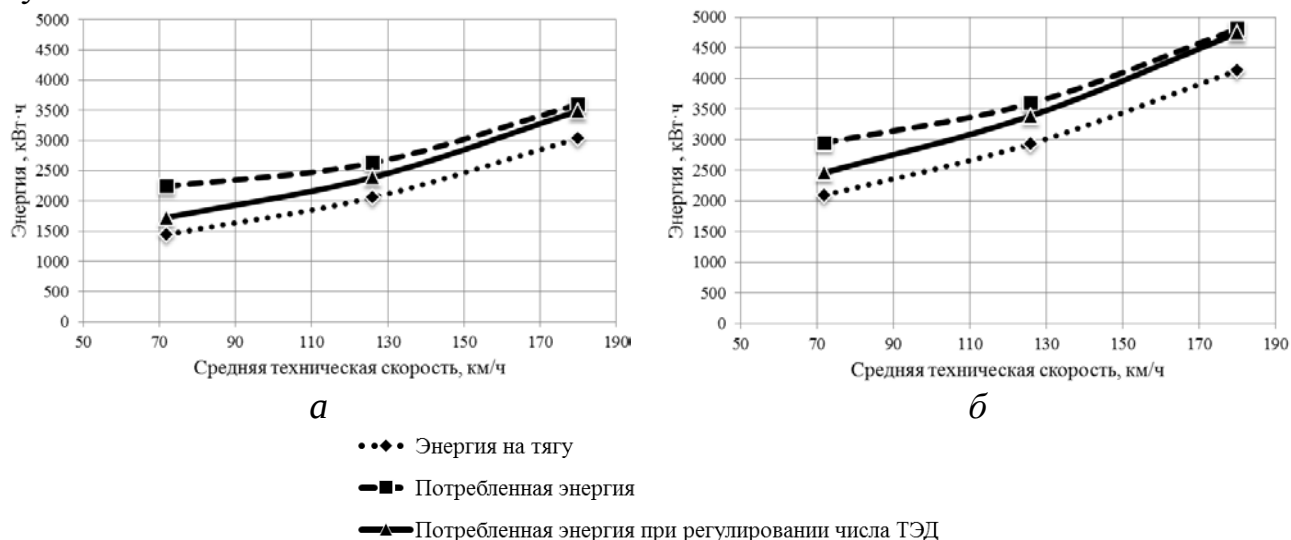


Рисунок 8 Расход электроэнергии при движении по участку с универсальным профилем:
а) 11 вагонов, б) 17 вагонов.

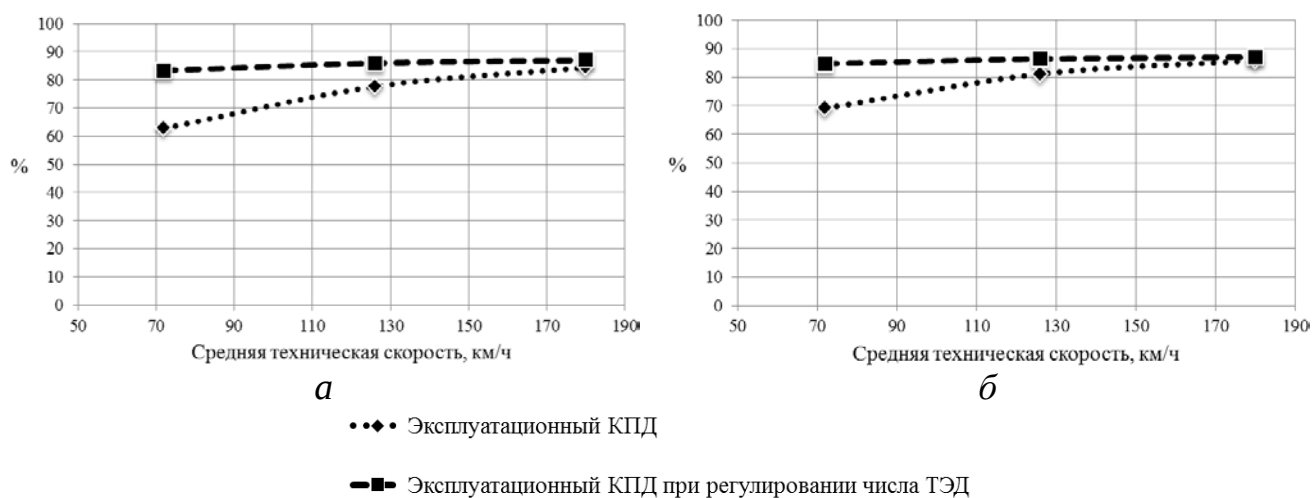


Рисунок 9 Эксплуатационный КПД при движении по участку с универсальным профилем:
а) 11 вагонов, б) 17 вагонов.

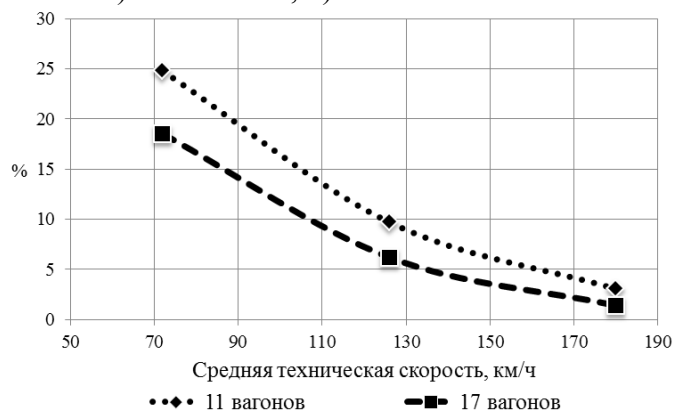


Рисунок 10 Относительная экономия электроэнергии при регулировании числа ТЭД

Видно, что при движении со скоростью 72 км/ч экономия электроэнергии составляет от 16 до 25%, при скорости 126 км/ч – от 6 до 9%, на высокой скорости (180 км/ч) – в пределах 3%.

В пятой главе «Контроль состояния контакта колесо-рельс и доработка вспомогательного привода при реализации энергоэффективного алгоритма» рассмотрены вопросы, связанные с практической реализацией энергоэффективного алгоритма. Основные требования таковы:

- 1) недопущение срыва колесных пар в боксование при возрастании нагрузки на подключаемые ТЭД (контроль состояния контакта колесо-рельс);
- 2) недопущение возникновения дополнительных продольно-динамических нагрузок по длине поезда (плавное переключение числа ТЭД);
- 3) выравнивание ресурса всех ТЭД локомотива;
- 4) недопущение перегрева ТЭД, должны подключаться в работу ТЭД с минимальной температурой, а отключаться – ТЭД с максимальной температурой;
- 5) необходимо контролировать частоту вращения ТЭД, его температуру, ток и напряжение.

Кроме того, должна быть выполнена доработка вспомогательного привода для обеспечения поканальной регулировки скорости вращения мотор-вентиляторов, а также, кроме штатной частоты 50 Гц, необходимо иметь пониженные частоты (например, 40, 33 и $16\frac{2}{3}$ Гц) для наддува корпусов отключенных ТЭД. Вопросы автоматического регулирования температуры тягового электрооборудования изучены в работах А.С. Космодамианского, Н.М. Лукова и других.

Также было отмечено, что ось с отключенным двигателем (которая будет представлять собой бегунковую ось) можно использовать для нахождения линейной скорости электровоза, что увеличит эффективность работы противобоксовочной системы и позволит максимально использовать его тяговые свойства. В качестве альтернативы, для определения линейной скорости можно использовать устройство, основанное на сканировании рельсо-шпальной решетки.

Рассмотрены вопросы, связанные с первым из перечисленных выше требований (контроль состояния контакта колесо-рельс при возрастании нагрузки на подключаемые ТЭД). Позиции 2-5 представляют собой направление дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В работе создан метод адаптивного автоматического управления энергетической эффективностью пассажирского электровоза с АТП при питании от сети постоянного тока, основанный на возможности изменения числа работающих тяговых двигателей в зависимости от нагрузки, обусловленной условиями движения. Обеспечивается стабилизация мгновенных значений коэффициента полезного действия электровоза (при работе с частичной нагрузкой) на уровне его номинального значения. В результате достигается повышение энергетической эффективности локомотивной тяги.

По результатам выполненной работы можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Путем статистической обработки массивов записей бортового регистратора, установлена зависимость показателей энергоэффективности электровоза от его скорости, профиля пути и составности поезда в различных условиях движения. Найдена зависимость КПД электровоза от реализуемой мощности, построена аналитическая аппроксимация полученной зависимости.

2. Разработан алгоритм адаптивного автоматического управления энергетической эффективностью пассажирского электровоза с АТП при питании от сети постоянного тока. Алгоритм обеспечивает стабилизацию мгновенных значений КПД электровоза при работе с частичной нагрузкой на уровне его номинального значения, имеющего место при полной нагрузке. Предложена структура системы управления тяговым приводом, включающая этот алгоритм.

3. Создана полноразмерная компьютерная модель электровоза как управляемой электромеханической системы, причем реализовано индивидуальное (поосное) регулирование силы тяги. Построена компьютерная модель пассажирского поезда, включающего электровоз и состав, позволяющая воспроизводить режим ведения поезда по конкретному участку и рассчитывать основные показатели энергопотребления.

4. Выполнено компьютерное моделирование движения пассажирского поезда по типовым участкам условных профилей длиной около 150 км, как при всех работающих тяговых двигателях, так и с использованием предлагаемого алгоритма управления энергоэффективностью путём регулирования мощности и числа тяговых двигателей. Получено, что при движении со скоростью 72 км/ч экономия электроэнергии может составить 18...25%, при скорости 126 км/ч – 6...10%, на высокой скорости (180 км/ч) – в пределах 3%.

5. Достоверность результатов, полученных путем компьютерного моделирования, подтверждена тем, что для конкретных участков расхождение по энергопотреблению от записей бортового регистратора не превышает нескольких процентов (при всех работающих тяговых двигателях), что дает возможность использовать результаты компьютерного моделирования для оценки энергопотребления. Кроме того, при отключении одного ТЭД электровоза ЭП20 с поездами «Невский Экспресс» выявлена положительная динамика снижения удельного расхода электроэнергии на 4%, тогда как по результатам компьютерного моделирования снижение расхода оценивалось в 3,38%.

6. Сформулированы дополнительные требования, которые должны быть соблюдены при использовании предлагаемого алгоритма управления энергетической эффективностью. Изучены условия работы в контакте «колесо-рельс» для всех колесных пар, свидетельствующие об отсутствии срывов в буксование при отключении/подключении тяговых двигателей.

7. Сформулированы предложения по доработке схемы вспомогательного привода для обеспечения поканальной регулировки скорости вращения мотор-вентиляторов.

8. Предлагаемый энергоэффективный алгоритм (система регулирования числа тяговых двигателей в зависимости от мгновенной мощности) может применяться и на грузовых электровозах. Поскольку при грузовых перевозках нагрузка крайне неравномерная, то ожидается значительный экономический эффект.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1 Зарифьян, А.А. Алгоритм повышения энергетической эффективности электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока / А.А. Зарифьян (мл.) // Вестник РГУПС – 2016. – №1. – С. 50-61.

2 Андрющенко, А.А. Показатели энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока. / А.А. Андрющенко, А.А. Зарифьян, П.Г. Колпахчян // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – №2. – С. 21-29.

3 Андрющенко, А.А. Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом / А.А. Андрющенко, А.А. Зарифьян, П.Г. Колпахчян // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 4. – С. 5-14.

4 Шаповалов, В.Л. Радиолокационные методы определения кинематических характеристик железнодорожного подвижного состава / В.Л. Шаповалов, А.В. Морозов, А.А. Зарифьян, З.Б. Хакиев, В.А. Явна // Инженерный вестник Дона: Электронный научный журнал. – 2011. – №4. – ПИ № ФС77-27308 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/565>

Статьи в журналах, входящих в базу Scopus

5 Kolpahchyan, P.G. Study of the asynchronous traction drive's operating modes by computer simulation. Part 1: Problem formulation and computer model (Исследование режимов работы асинхронного тягового привода методами компьютерного моделирования. Часть 1 : Постановка задачи и компьютерная модель) / P.G.Kolpahchyan, A.A. Zarifyan (Jr) // Transport Problems. International scientific journal. – 2015. – Vol. 10, Issue 2. – P. 125-136.

6 Kolpahchyan, P.G. Study of the asynchronous traction drive's operating modes by computer simulation. Part 2 : Simulation results and analysis (Исследование режимов работы асинхронного тягового привода методами компьютерного моделирования. Часть 2 : Результаты моделирования и анализ) / P.G.Kolpahchyan, A.A. Zarifyan (Jr) // Transport Problems. International scientific journal. – 2015. – Vol. 10, Issue 3. – P. 5-15.

Публикации в других изданиях

7 Колпахчян, П.Г. Компьютерная модель скоростного пассажирского электровоза с асинхронным тяговым приводом / П.Г. Колпахчян, А.А. Андрющенко, А.А. Зарифьян // Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: вопросы динамики, прочности и износа (Второй научно-технический семинар). Сборник тезисов. 9-10 апреля 2014 г. – Брянск, БГТУ, 2014. – С. 22-24.

8 Колпахчян, П.Г. Построение модели асинхронного тягового привода электровоза ЭП20 в среде Matlab-Simulink / П.Г. Колпахчян, А.А. Зарифьян // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт - 2014». Часть 2. Техн. науки. – Рост. гос. ун-т путей сообщения. Ростов н/Д, 2014. – С. 70-73.

9 Kolpahchyan, P. Study of the asynchronous traction drive's operating modes by computer-simulation (Исследование режимов работы асинхронного тягового привода методами компьютерного моделирования) / P. Kolpahchyan, A. Zarifyan (jr) // VI International Scientific Conference «Transport Problems-2014» – Silesian University of Technology - Katowice (Poland), 25-27.06.2014. – P. 357-364.

10 Зарифьян, А.А. Особенности схем вспомогательного привода современных локомотивов с асинхронными тяговыми двигателями / А.А. Зарифьян // Локомотивы XXI век: Сб. материалов II Межд. научно-техн. конференции, Санкт-Петербург, 18-20 ноября 2014 г. – СПб: Петербургский гос. университет путей сообщения Императора Александра I, 2014. – С. 115-119.

11 Зарифьян, А.А. Особенности схем вспомогательного привода двухсистемных локомотивов с асинхронными тяговыми двигателями / А.А. Зарифьян // Труды Междунар. научно-практ. конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России», 20-21 ноября 2014 г. Часть 1. Техн. науки. Рост.гос. ун-т путей сообщения. Ростов н/Д, 2014. – С. 174-175.

12 Зарифьян, А.А. Особенности схем вспомогательного привода современных локомотивов с асинхронными тяговыми двигателями / Бюллетень результатов научных исследований: Электронный научный журнал. 2014, №4 (13) – С. 29-35. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.brni.info.

13 Андриющенко, А.А. Энергетическая эффективность пассажирских электровозов с асинхронными тяговыми двигателями / А.А. Андриющенко, А.А. Зарифьян, П.Г. Колпахчян // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт - 2015». Часть 2. Технические науки. – Рост.гос. ун-т путей сообщения. Ростов н/Д, 2015. – С. 148-150.

14 Зарифьян, А.А. Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронными тяговыми двигателями при работе с неполной нагрузкой / А.А. Зарифьян // Труды Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» / Ростов н/Д: РГУПС, 2015. – С. 75-80.

15 Андриющенко, А.А. Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом / А.А. Андриющенко, А.А. Зарифьян, П.Г. Колпахчян // Тезисы докладов. VIII Международный симпозиум «Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта» (Элтранс-2015). – СПб: Петербургский гос. университет путей сообщения Императора Александра I, 7-9 октября 2015 г. – С. 4.

16 Андриющенко, А.А. Оценка энергетической эффективности электровоза с асинхронным тяговым приводом методами компьютерного моделирования / А.А. Андриющенко, А.А. Зарифьян, П.Г. Колпахчян // Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ: (3-й научно-технический семинар). Сборник тезисов. 6-7 апреля 2016 г. – Брянск, БГТУ, 2016. – С. 9-11.

Патент

17 Способ управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой / А.А. Андриющенко, А.А. Зарифьян, Ю.А. Орлов, К.П. Солтус // Заявка на изобретение 2015139252/11 (060332) от 15.09.2015.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве: [2-9, 12-13, 15-17] – идеи технических решений, разработка моделей и алгоритмов; проведение компьютерного моделирования и обобщение полученных результатов.

Зарифьян Александр Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПАССАЖИРСКИХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ
ПРИВОДОМ ПРИ ПИТАНИИ ОТ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати _____ Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. _____
Уч.- изд. л. _____ Тираж 100 экз. Заказ № _____

Ростовский государственный университет путей сообщения.
Ризография ФГБОУ ВО РГУПС.

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