

На правах рукописи



ИСТОМИН Станислав Геннадьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ГРАНИЦАХ ЗОН УЧЕТА  
ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ОМСК 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС (ОМИИТ))».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
ЧЕРЕМИСИН Василий Титович.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
КУЛИНИЧ Юрий Михайлович –  
профессор кафедры «Локомотивы», ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»;

доктор технических наук, доцент  
МЕЛЬНИЧЕНКО Олег Валерьевич –  
заведующий кафедрой «Электроподвижной состав», ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения».

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Защита диссертации состоится 23 июня 2017 г. в 9 часов на заседании диссертационного совета Д 218.007.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС (ОМИИТ))» по адресу: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35, ауд. 219.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Омского государственного университета путей сообщения

Автореферат разослан 20 апреля 2017 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять в адрес диссертационного совета Д 218.007.01.

Тел./факс: (3812) 31-13-44; e-mail: d218.007.01@mail.ru

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук,  
профессор



О. А. Сидоров.

---

© Омский гос. университет  
путей сообщения, 2017

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Компания ОАО «Российские железные дороги» является одним из крупнейших потребителей энергоресурсов, на долю которого приходится около 4,4 % от всей вырабатываемой в России электроэнергии, 85 % которой расходуется на тягу поездов, поэтому приоритетными задачами энергетической стратегии холдинга ОАО «РЖД» на период до 2020 г. и на перспективу до 2030 г. являются качественное улучшение структуры управления потреблением тягово-энергетическими ресурсами (ТЭР) на основе использования современных информационных технологий, систем учета, нормирования и мониторинга потребления ТЭР и значительное повышение показателей энергетической эффективности тяги поездов. Так, в целом по ОАО «РЖД» прогнозируемое снижение удельного расхода ТЭР на тягу поездов к уровню 2015 г. должно составить к 2020 г. от 2,5 до 4,4 %, к 2030 г. от 8,0 до 9,0 %, что может быть достигнуто, в частности, за счет: выявления участков железных дорог с неэффективным использованием электрической энергии; выявления локомотивов с систематическим перерасходом электрической энергии с целью постановки их на неплановый вид ремонта; снижения доли непроизводительных потерь электроэнергии и отнесения их на виновных участников перевозочного процесса; снижения технологических и коммерческих потерь электроэнергии в тяговой сети; повышения эффективности нормирования удельного расхода электроэнергии (УРЭ) ТЭР; внедрения коммерческого учета электроэнергии в связи с появлением частного электроподвижного состава (ЭПС).

В настоящее время ряд факторов препятствует реализации на должном уровне названных мероприятий.

Существующие системы учета имеют следующие недостатки: низкий класс точности, высокий порог чувствительности, отсутствие системы спутниковой навигации GPS/ГЛОНАСС, отсутствие беспроводной передачи данных, уязвимость для несанкционированного вмешательства в их работу извне.

Автоматизированная система централизованной обработки маршрутов машинистов (ЦОММ) имеет следующие недостатки: источником данных ЦОММ являются маршруты машинистов, где указываются только общий расход и возврат электроэнергии по результатам работы локомотивных бригад, что ограничивает проведение более детального анализа энергопотребления ЭПС и поиска резервов сбережения ТЭР; не позволяет получать информацию об эффективности использования электроэнергии ЭПС по итогам суток, что препятствует оперативной разработке мероприятий по снижению потерь электроэнергии; предполагает ручной ввод информации с маршрута машиниста, что приводит к появлению многочисленных ошибок в статистической отчетности и, как следствие, к недостоверной организации учета электроэнергии, возникновению доли коммерческой составляющей потерь электроэнергии в тяговой сети и неадекватному нормированию ТЭР.

Анализ отчетных данных системы ЦОММ за 2014 и 2015 гг. об энергопотреблении электровозов, эксплуатирующихся на различных участках Западно-Сибирской железной дороги, показал, что имеется значительный потенциал снижения непроизводительных потерь электроэнергии и существуют проблемы в организации досто-

верного учета электроэнергии. Непроизводительные потери электрической энергии за 2014 г. составляют 2,1 % и за 2015 г. 3,8 % от общего потребления электроэнергии на тягу поездов. В абсолютном выражении это составляет около 26,8 млн кВт·ч в 2014 г. и 53,6 млн кВт·ч за 2015 г. Недоучет электрической энергии за 2014 г. составляет 2,6 % и за 2015 г. 4,1 % от общего потребления электроэнергии на тягу поездов. В абсолютном выражении это составляет около 33,2 млн кВт·ч в 2014 г. и 57,5 млн кВт·ч за 2015 г.

Перечисленные недостатки в той или иной мере могут быть устранены с введением автоматизированных систем учета электрической энергии, выполняющих измерение приращения энергии за интервалы времени от долей секунды до нескольких секунд со спутниковым позиционированием местоположения ЭПС и системы обработки данных с них. При этом появляется широкий комплекс принципиально новых задач для реализации вышеназванных мероприятий на новом уровне.

В данной работе учтено большинство из вышеперечисленных актуальных проблем, учтен опыт зарубежных ученых и предложены конкретные пути решения задач, стоящих перед холдингом ОАО «РЖД».

**Объект исследования** – ЭПС постоянного и переменного тока.

**Область исследования** – методы и средства снижения потерь электроэнергии в тяговой сети.

**Степень разработанности темы исследования.** Значительный вклад в решение задач анализа энергопотребления на тягу поездов внесли такие известные ученые, как Б. А. Аржанников, М. П. Бадёр, Л. А. Баранов, А. А. Бакланов, А. Т. Бурков, Л. А. Герман, В. А. Гречишников, Б. Е. Дынькин, А. М. Евстафьев, Д. В. Ермоленко, Ю. И. Жарков, В. П. Закарюкин, В. Н. Игин, А. Б. Косарев, А. В. Котельников, В. А. Кучумов, А. Н. Марикин, Р. Р. Мамошин, Р. Я. Медлин, О. В. Мельниченко, А. Н. Митрофанов, В. С. Молярчук, Л. А. Мугинштейн, А. К. Пляскин, А. Д. Петрушин, О. Е. Пудовиков, Н. Н. Сидорова, В. П. Феоктистов Н. О. Фролов, М. В. Шевлюгин и др. Вопросы применения информационных технологий на железнодорожном транспорте, разработки и совершенствования систем учета, контроля и анализа энергозатрат изложены в работах Б. И. Давыдова, Ю. А. Давыдова, И. К. Лакина, Е. А. Сидоровой, В. Т. Черемисина и др.

Рассмотрен зарубежный опыт: работы в части автоматизированного анализа расхода электроэнергии ЭПС вели В. Bohlscheid, D. Gulbrandsen, P. Treige, S. Graßmann, G. Harmsen, H. Ströbenreuther и др.

Вопрос повышения эффективности эксплуатации ЭПС является широко проработанным многими учеными, однако внедрение современных измерительных систем на ЭПС, оснащенных спутниковой навигацией и имеющих возможность беспроводной передачи данных, имеет некоторые области потенциального развития.

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности эксплуатации ЭПС и снижение потерь электроэнергии на тягу поездов за счет внедрения технологических решений на основе результатов мониторинга работы локомотивных бригад на плечах обслуживания с детализацией удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии по зонам учета железных дорог.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи**:

1) выполнить систематизацию требований к существующим измерительным системам учета электроэнергии на тяговом ЭПС для определения эффективности их эксплуатации в границах зон учета железных дорог за произвольное время и на ее основе разработать технические требования к автоматизированным ИИК учета электроэнергии на тяговом ЭПС;

2) разработать технологию контроля потребления электрической энергии ЭПС с использованием ИИК и спутниковых навигационных систем позиционирования, позволяющую автоматизировать процесс сбора и обработки информации об энергопотреблении ЭПС, определять расход электроэнергии в границах зон учета железной дороги за произвольное время прошедших суток;

3) разработать метод снижения удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги, позволяющий по итогам суток локализовывать зоны учета с повышенным значением удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии с детализацией по четному и нечетному направлениям, по принадлежности к локомотивному депо, сериям и номерам локомотивов, и разрабатывать мероприятия по повышению эффективности использования электроэнергии ЭПС;

4) разработать технологию определения непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги при неграфиковых остановках, задержках поездов у запрещающих сигналов светофоров, ограничениях скорости движения на участке, нагоне графикового времени, простоях на тракционных путях локомотивных депо и в пунктах оборота, простоях в пути следования и в ожидании работы по данным ИИК ЭПС, позволяющую определять действительные значения данных потерь и относить их на виновных участников перевозочного процесса (функциональных филиалов ОАО «РЖД») для повышения эффективности эксплуатации ЭПС;

5) выполнить апробацию метода снижения удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги.

**Научная новизна работы** заключается в решении комплекса задач по повышению энергетической эффективности ЭПС в границах зон учета железной дороги. При этом выполнено следующее:

1) разработана технология контроля потребления электрической энергии ЭПС с использованием ИИК и спутниковых навигационных систем позиционирования, учитывающая технические требования к подобным комплексам учета электроэнергии и реальные условия эксплуатации ЭПС;

2) разработан метод снижения удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги, учитывающий непроизводительные потери электроэнергии при неграфиковых остановках, задержках поездов у запрещающих сигналов светофоров, ограничениях скорости движения на участке, нагоне графикового времени, простоях на тракционных путях локомотивных депо и пунктах оборота, простоях в пути следования и в ожидании работы, а также потери электроэнергии, связанные с неудовлетворительным техническим состоянием локомотивов и неприменением машинистами рациональных режимов вождения поездов;

3) разработана технология определения непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги при неграфиковых остановках, задержках поездов у запрещающих сигналов светофоров, ограничениях скорости дви-

жения на участке, нагоне графического времени, простоях на тракционных путях локомотивных депо и пунктах оборота, простоях в пути следования и в ожидании работы по данным ИИК, учитывающая влияние профиля пути и параметров состава на конечный результат расчета.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1) разработанная технология контроля электропотребления ЭПС позволяет автоматизировать процесс сбора и обработки информации об энергопотреблении ЭПС и определять расход электроэнергии в границах зон учета железной дороги за произвольное время;

2) разработанный метод снижения удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги позволяет по итогам суток локализовывать зоны учета с повышенным значением удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии с детализацией по четному и нечетному направлениям, по принадлежности к локомотивному депо, сериям и номерам локомотивов и разрабатывать мероприятия по повышению эффективности использования электроэнергии ЭПС;

3) разработанная технология определения непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги по данным ИИК позволяет определять действительные значения данных потерь и относить их на виновных участников перевозочного процесса для повышения эффективности эксплуатации ЭПС;

4) разработанные технические требования и методика применения автоматизированных информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии на тяговом электроподвижном составе утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 31 декабря 2014 г. № 3226р и внедрены в Западно-Сибирской дирекции тяги – структурном подразделении Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД».

**Методология и методы исследования.** В работе использованы основные положения и методы теории тяги поездов, корреляционно-регрессионного анализа и построения сложных алгоритмов. Для проведения расчетов и анализа математических зависимостей применялись лицензионные программные продукты: электронные таблицы Microsoft Excel 2007 и STATISTICA for Windows Release 8.0.

#### **Положения диссертации, выносимые на защиту:**

1) технология контроля потребления электрической энергии ЭПС с использованием ИИК и спутниковых навигационных систем в границах зон учета железных дорог;

2) метод снижения удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железных дорог с неэффективным использованием электроэнергии на тягу поездов;

3) технология определения непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железных дорог по данным ИИК ЭПС.

**Достоверность научных положений и результатов** диссертационной работы обоснована теоретически и подтверждена экспериментальными исследованиями. Полученные статистические модели множественной нелинейной регрессии для прогнозирования удельного расхода электроэнергии на тягу поездов имеют более высокие наблюдаемые значения множественного коэффициента детерминации факторов в сравнении с другими моделями, который находится в пределах от 0,62 до 0,85.

**Апробация результатов работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на второй и третьей всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и по-

вышение эффективности тяги поездов» (Омск, 2014 и 2016); первой и второй международных научно-практических конференциях «Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем» (Омск, 2014 и 2016); международной научно-практической конференции «Современный взгляд на будущее науки» (Челябинск, 2015); VIII Международном симпозиуме «Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта» (Санкт-Петербург, 2015); третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава» (Омск, 2015); научной конференции «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте» (Омск, 2016).

Результаты диссертационной работы отмечены

дипломом III степени на международном конкурсе научных работ молодых ученых и специалистов в области информационно-коммуникационных технологий и управления на транспорте (Москва, 2015), проводимом некоммерческим партнерством по развитию транспорта «Международная академия транспорта»;

дипломом I степени на конкурсе «Молодые ученые транспортной отрасли» (Москва, 2016), проводимом Министерством транспорта Российской Федерации.

**Личный вклад соискателя.** Автором выполнен основной объем теоретических и экспериментальных исследований, проведен анализ полученных данных, сформулированы положения диссертации, составляющие её новизну и практическую значимость.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 16 печатных работ, из них четыре в изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России, одна в издании, индексируемом в международной реферативной базе данных Scopus. Получено три патента Российской Федерации на изобретения.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, восьми приложений, библиографического списка из 151 наименования и содержит 136 страниц основного текста, 36 рисунков и 23 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассмотрено состояние проблемы повышения эффективности эксплуатации ЭПС в границах зон учета, обоснована ее актуальность, сформулированы цели и задачи исследований, определены научная новизна, практическая ценность работы и основные направления исследований.

**В первой главе** выполнена систематизация требований к существующим измерительным системам учета электроэнергии на тяговом ЭПС для определения эффективности их эксплуатации ЭПС по зонам учета железных дорог за произвольное время и на ее основе разработаны технические требования к автоматизированным ИИК учета электроэнергии на тяговом ЭПС.

Для того чтобы заниматься дальнейшими исследованиями в области повышения эффективности эксплуатации ЭПС, в Распоряжении ОАО «РЖД» от 16.10.2010 №2339р было введено понятие зоны учета электроэнергии – неразветвленный электрифицированный участок железной дороги, в пределах которого действует единый

тариф на электрическую энергию, при выборе границ которого должно учитываться расположение участков работы локомотивных бригад.

Схема разделения железных дорог на зоны учета представлена на рис. 1.

Для определения расхода электрической энергии в границах зон учета необходимо иметь соответствующие средства измерения, удовлетворяющие особым техническим требованиям.

Для формирования технических требований к автоматизированным средствам измерения проведены экспериментальные исследования на Свердловской железной дороге, которые показали, что определение расхода электроэнергии в границах зон учета по данным современных регистраторов параметров движения МСУЛ-РПМ грузовых электровозов серии 2ЭС6 и 2ЭС10 и регистраторов РПДА пассажирских электровозов серии ЭП2К возможно лишь косвенным путем при последующей обработке на основании информации о токах двигателей, напряжении на токоприемнике, времени и данных системы ГИД «Урал-ВНИИЖТ».

Наличие этих данных позволило определить удельный расход электроэнергии и удельную рекуперацию в границах минимальной зоны учета – межподстанционной зоны (МПЗ) (рис. 2).

Таким образом, экспериментальные исследования на Свердловской железной дороге показали перспективность проведения автоматизированного непрерывного мониторинга эффективности эксплуатации ЭПС в границах зон учета за произвольное время прошедших суток, который позволит локализовывать участки неэффективного использования электроэнергии. Однако для реализации данного вида мониторинга в последующем необходимо, чтобы измерительные системы ЭПС соответствовали единым

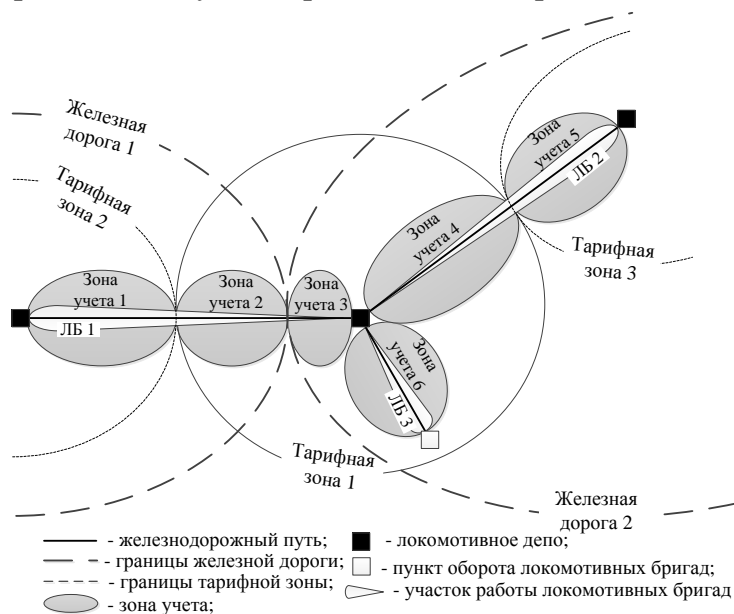


Рис. 1. Схема разделения железных дорог на зоны учета

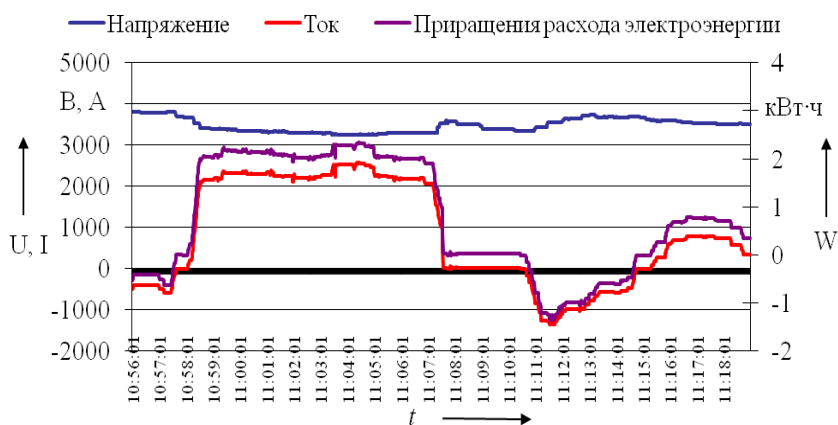


Рис. 2. Графики тока, напряжения и односекундных приращений расхода электроэнергии для электровоза 2ЭС10 с поездом массой 4908 т при движении по МПЗ Сабик – Кузино в четном направлении



техническим требованиям.

При проведении данных экспериментов выявлены недостатки регистраторов параметров движения, препятствующие организации мониторинга эффективности эксплуатации ЭПС, а также выполнена апробация методологии обработки данных с них, что впоследствии позволило разработать технические требования к автоматизированному ИИК и технологию учета расхода электроэнергии ЭПС с использованием подобных комплексов учета электроэнергии на тяговом подвижном составе, которые были разработаны с участием автора и утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 31 декабря 2014 года №3226р.

Необходимо отметить, что существующие системы учета электроэнергии ЭПС не в полной мере отвечают утвержденным требованиям (низкий класс точности, отсутствует возможность беспроводной передачи данных и модуль спутниковой навигации и т.д.), поэтому необходимо или довести их до указанных требований, или создать новый автоматизированный ИИК учета электроэнергии ЭПС.

В Омском государственном университете путей сообщения с участием автора в соответствии с утвержденными требованиями разработаны опытные образцы ИИК учета электроэнергии, которые позволяют определять расход электроэнергии за различные интервалы времени на ЭПС постоянного тока в границах зон учета железной дороги.

Внедрение подобных комплексов учета электроэнергии на тяговом подвижном составе позволит осуществлять контроль потребления электрической энергии ЭПС в границах зон учета железной дороги по итогам прошедших суток.

**Вторая глава** посвящена разработке технологии контроля потребления электрической энергии ЭПС с использованием ИИК и спутниковых навигационных систем позиционирования, позволяющей автоматизировать процесс сбора и обработки информации об энергопотреблении ЭПС и определять расход электроэнергии в границах различных

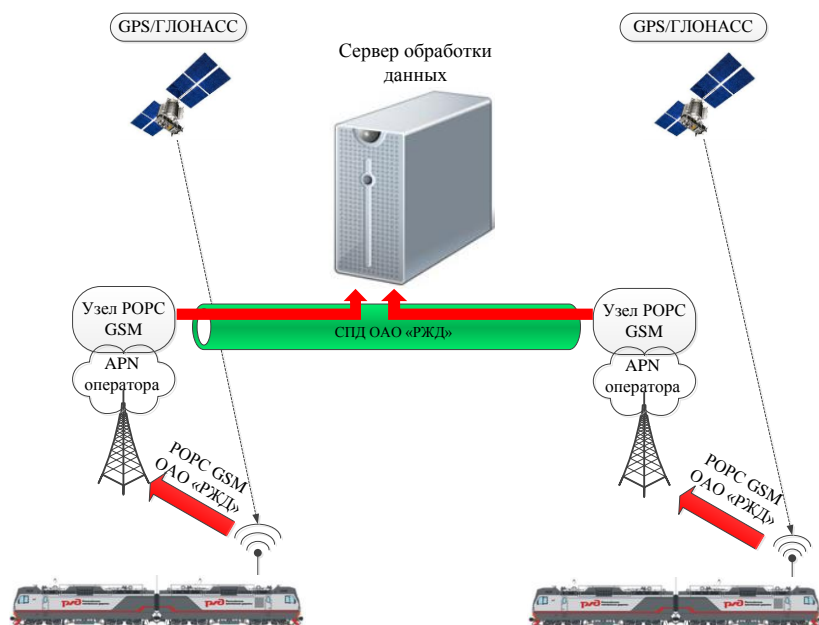


Рис. 3. Принцип организации автоматизированного учета электроэнергии

зон учета железной дороги за произвольное время прошедших суток.

Принцип организации автоматизированного учета электроэнергии по данным ИИК ЭПС приведен на рис. 3.

При движении ЭПС через зоны учёта ИИК учета электроэнергии в каждый момент времени с заданным интервалом осуществляет измерение приращения расхода и возврата электроэнергии ЭПС, а также гео-

графических координат его местоположения. Все измеренные значения сохраняются

в энергонезависимой памяти ИИК с метками времени. Передача данных с борта ЭПС на сервер сбора данных нижнего уровня осуществляется по технологической ремонтно-оперативной радиосвязи в зоне покрытия точек доступа беспроводной связи. Далее информация по волоконно-оптической линии связи передается на сервер сбора и обработки данных верхнего уровня, где формируется массив информации соотнесенных результатов измерения с данными маршрута локомотивной бригады, границами зон учета и кодами состояния ЭПС.

Расход электроэнергии ЭПС в границах выбранной зоны учета за рассматриваемый отрезок времени определяется по формуле:

$$W = \sum_{s=1}^f \sum_{i=1}^q (W_{is} - W_{(i-1)s}), \quad (1)$$

где  $(W_{is} - W_{(i-1)s})$  – измеренное значение приращения количества электроэнергии, потребленной ЭПС из контактной сети, за интервал измерения  $\Delta t$ ;

$q$  – количество интервалов измерения электроэнергии за время нахождения ЭПС в границах расчетной зоны учета в рассматриваемом отрезке времени;

$f$  – количество ЭПС, находившихся в расчетной зоне учета в рассматриваемом отрезке времени.

Удельный расход электроэнергии ЭПС в границах выбранной зоны учета за рассматриваемый отрезок времени определяется по формуле:

$$a = \frac{W \cdot 10^4}{\sum_{k=1}^n A_k}, \quad (2)$$

где  $A_k$  – фактический объем перевозочной работы в границах расчетной зоны учета в  $k$ -й поездке,  $10^4$  ткм брутто.

Аналогично формулам (1) и (2) определяются значения энергии рекуперации ( $W_R$ ), удельной рекуперации ( $a_R$ ) и расхода электроэнергии на энергообеспечение пассажирских вагонов ( $W_B$ ) в границах расчетной зоны учета в рассматриваемом отрезке времени.

Расчетные выражения, приведенные выше, могут быть использованы в алгоритме определения энергетических показателей эксплуатации ЭПС в границах зон учета железной дороги (рис. 4).

Безусловно, при проведении измерений количества потребленной электрической энергии будет возникать погрешность, которая складывается из относительной

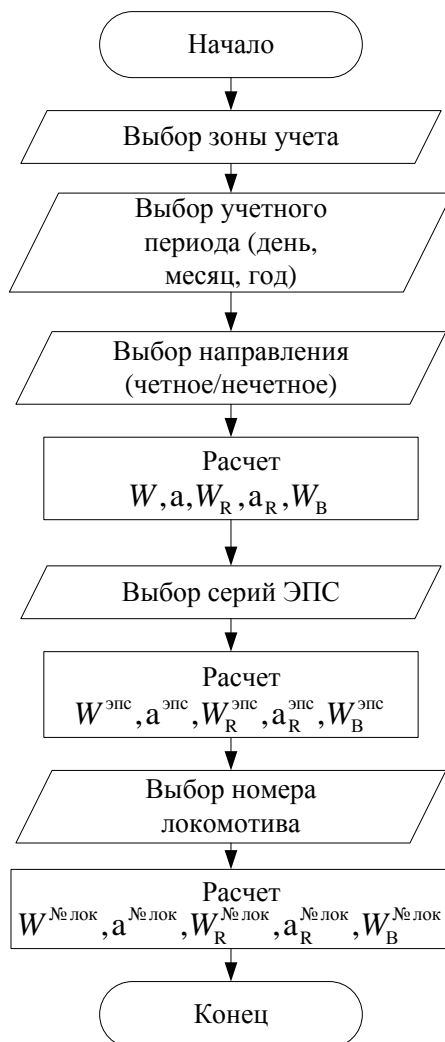


Рис. 4. Алгоритм определения энергетических показателей эксплуатации ЭПС в границах зон учета

погрешности определения пересечения ЭПС границ зон учета и относительной погрешности измерительного комплекса. Относительная результирующая погрешность измерения количества потребленной электрической энергии в границах зон учета не превышает 0,6 %.

**Третья глава** посвящена разработке метода снижения удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги с неэффективным использованием электроэнергии на тягу поездов.

Снижение удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги по итогам суток предлагается осуществлять в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 5.

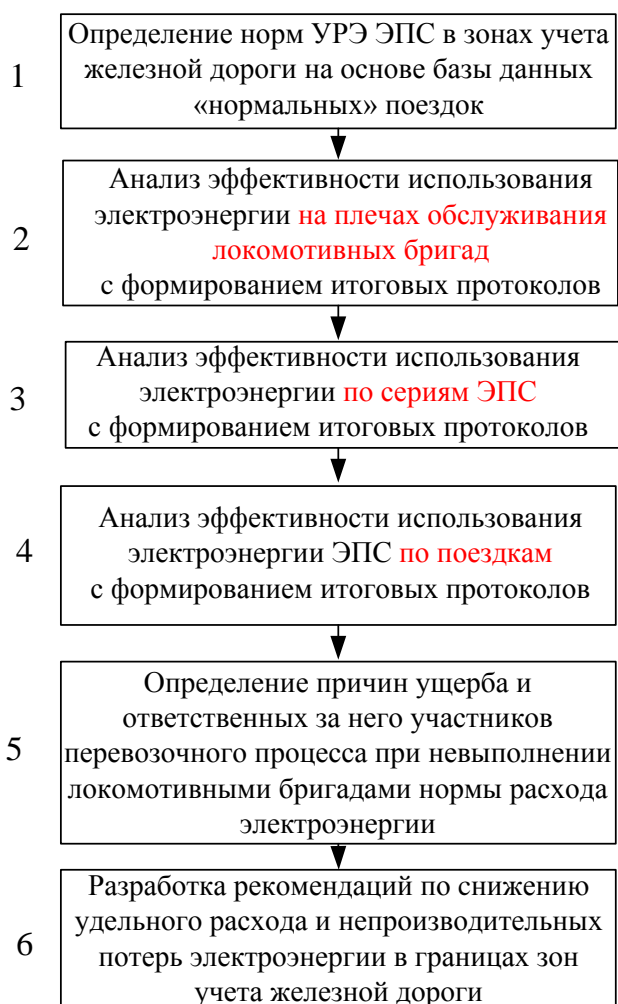


Рис. 5. Алгоритм снижения удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги

В разработанном методе используются следующие методы нормирования УРЭ.

При введении в эксплуатацию ИИК и системы обработки данных с них, а также при отсутствии на определенных участках железных дорог устойчивых статистических закономерностей формирования и изменения УРЭ в зависимости от выбранных факторов предлагается использовать численный метод расчета расхода электроэнергии на движение поезда.

В качестве основного метода нормирования УРЭ на тягу с использованием данных ИИК предлагается использовать статистический метод, в частности, метод корреляционно-регрессионного анализа, что позволит получать нормативные значения УРЭ в границах зон учета на основе базы данных «нормальных» поездов (поезда проследовавшие зоны учета в рамках нормативного графика движения и выполнившие норму УРЭ), определять действительные значения непроизводительных потерь, автоматически актуализировать нормативные значения УРЭ, а также устранить существенный

недостаток системы ЦОММ – возможность корректировки исходных данных и результатов нормирования машинистом-инструктором по теплотехнике.

Норму УРЭ на поездку предлагается определять в отличие от системы ЦОММ, где в основе нормирования лежит задание «основных» норм УРЭ для выбранных значений осевой нагрузки, путем корреляционно-регрессионного анализа по всей выбор-

ке поездов на основе уравнения множественной регрессии, учитывающего нагрузку на ось  $q$ , массу состава  $m$  и температуру окружающего воздуха  $t$ :

$$a_k = B_0 + \frac{B_1}{m} + \frac{B_2}{q} + B_3 \cdot t, \quad (3)$$

где  $B_0$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$  – неизвестные параметры модели, которые вычисляются при помощи системы нормальных уравнений.

Подставляя значения  $m$ ,  $q$  и  $t$  в уравнение (3), определяем индивидуальную техническую удельную норму расхода электроэнергии при работе локомотивной бригады в границах расчетной зоны учета за расчетный период.

Расчетное нормативное значение расхода электроэнергии определяется по выражению, кВт·ч:

$$W_{расч.(k)}^{эnc} = a_k \cdot A_{(k)}, \quad (4)$$

где  $A_{(k)}$  – прогнозируемый объем перевозочной работы в границах расчетной зоны учета в  $k$ -й поездке,  $10^4$  ткм брутто.

На основании индивидуальных технических норм расхода электроэнергии рассчитываются нормативные значения расхода электроэнергии на тягу поездов по сериям локомотивов в четном и нечетном направлениях движения и в границах расчетной зоны учета.

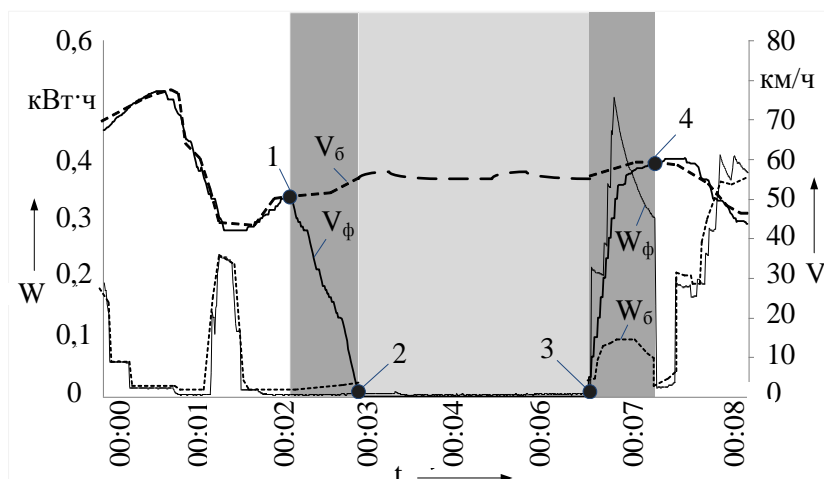
Далее проводится анализ эффективности использования электроэнергии по плечам обслуживания локомотивных бригад, сериям ЭПС и поездкам, определяются причины ущерба и ответственные за него участники перевозочного процесса и в конечном итоге разрабатываются мероприятия по снижению удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги.

**Четвертая глава** посвящена разработке технологии определения непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги по данным ИИК ЭПС.

Разработанные способы основаны на сравнении фактических данных об электропотреблении по показаниям ИИК ЭПС с «базовым» расходом, т.е. с расходом электроэнергии, который мог быть зафиксирован, к примеру, на участках торможения, простоя, разгона или нагона, в случае проследования ЭПС в рамках нормативного графика движения с установленной скоростью.

В качестве примера на рис. 6 представлена запись параметров ИИК учета электроэнергии при наличии и отсутствии неграфиковой остановки. Для обработки данной информации (см. рис. 6) разработан способ определения непроизводительных потерь электроэнергии при неграфиковой остановке, в котором реализована возможность определения временных и пространственных границ начала (точка 1) и окончания (точка 2) торможения, простоя (интервал времени от точки 2 до точки 3), трогания (точка 3) и разгона (интервал времени от точки 3 до точки 4) при неграфиковой остановке путем сопоставления фактической скорости движения поезда ( $V_{ф}$ ) с базовой ( $V_{б}$ ), определяемой по результатам статистической обработки данных массива поездов для поездов с аналогичными параметрами, проследовавших на данном участке без остановок.

Для каждой  $i$ -й точки пути данного участка средние (базовые) значения расхода электроэнергии и скорости определяются (на рис. 6 кривые  $W_{\phi}$  и  $V_{\phi}$ ) по формулам:



$$W_{\phi i} = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij}}{n}; \quad (5)$$

$$V_{\phi i} = \frac{\sum_{j=1}^n V_{ij}}{n}, \quad (6)$$

где  $W_{ij}$ ,  $V_{ij}$  – значения расхода электроэнергии и скорости в  $i$ -й точке пути для  $j$ -й поездки;

$n$  – количество  $j$ -х поездов.

Рис. 6. Пример записи параметров ИИК учета электроэнергии при наличии и отсутствии неграфиковой остановки

Это позволяет выделять долю расхода электроэнергии ЭПС, затраченной непосредственно в процессе торможения, простоя, трогания и разгона.

В данном случае непроизводительные потери электрической энергии на неграфиковую остановку определяются по формуле:

$$\Delta W_{\text{нр}} = (W_{\phi 4} - W_{\phi 1}) - (W_{\phi 4} - W_{\phi 1}), \quad (7)$$

где  $W_{\phi 1}$  и  $W_{\phi 4}$  – базовое значение расхода электроэнергии по измерительным системам ЭПС в точке 1 и 4 на рис. 6;

$W_{\phi 1}$  и  $W_{\phi 4}$  – фактическое значение расхода электроэнергии по измерительным системам ЭПС в точке 1 и 4 на рис. 6.

Аналогичные способы разработаны для определения всех указанных непроизводительных потерь электроэнергии.

Технический результат предлагаемых способов заключается в следующем:

снижение потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги за счет организации ежесуточного контроля непроизводительных потерь с отнесением их на участников перевозочного процесса и разработки рекомендаций по повышению эффективности использования электроэнергии ЭПС; повышение точности определения потерь электроэнергии ЭПС за счет использования данных о фактическом значении расхода электроэнергии ЭПС в процессе торможения, простоя, разгона до установленной скорости и движения с ограниченной скоростью; реализация возможности определения действительных значений потерь электроэнергии; устранение необходимости проведения дополнительных исследований для определения расхода электроэнергии на торможение, простой, движение с ограниченной скоростью, трогание и разгон поезда для новых серий электроподвижного состава, вводимых в эксплуатацию.

Новизна способов определения непроизводительных потерь электроэнергии ЭПС, вызванных неграфиковыми остановками, нагоном графического времени и огра-

ничениями скорости движения на участке, защищена патентами РФ на изобретения № 2591559, № 2591558 и № 2600960.

В пятой главе приведены результаты апробации метода снижения удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги на примере эксплуатационного депо ТЧЭ-2 Омск.

В соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 5, вначале определены нормы расхода электроэнергии для зон учета в четном и нечетном направлениях, серий ЭПС и поездов локомотивных бригад статистическим методом.

Для адекватного определения норм расхода статистическим методом были отобраны данные об энергопотреблении грузовых электровозов серии 2ЭС6 и ВЛ10, полученные по результатам расшифровки картриджей регистраторов параметров движения. В этом случае ошибки при определении фактического расхода и возврата электроэнергии были сведены к минимуму.

В результате для определения норм расхода электроэнергии получили уравнения множественной регрессии и исследовали значимость коэффициентов этих уравнений для различных сочетаний факторов. Данные исследования подтвердили, что, помимо нагрузки на ось статистически значимыми факторами, оказывающими влияния на УРЭ электровозов 2ЭС6 и ВЛ10, являются масса состава и температура окружающего воздуха, которые включены в модель множественной нелинейной регрессии (табл.).

Табл.

Уравнения множественной нелинейной регрессии для серии 2ЭС6 на плечах обслуживания локомотивных бригад депо ТЧЭ-2 Омск

Наименование плеча обслуживания	Направление	Уравнение регрессии
Входная - Иртышское	Неч.	$a_{э} = 24,6 + \frac{35966}{m_c} + \frac{440,8}{q} - 0,13 \cdot t$
	Чет.	$a_{э} = 25,9 + \frac{22976}{m_c} + \frac{686,5}{q} - 0,64 \cdot t$
Входная - Ишим	Неч.	$a_{э} = 34,6 + \frac{46705}{m_c} + \frac{115,7}{q} - 0,12 \cdot t$
	Чет.	$a_{э} = 25,1 + \frac{42078}{m_c} + \frac{558,1}{q} - 0,39 \cdot t$
Московка - Барабинск	Неч.	$a_{э} = 21,7 + \frac{22961}{m_c} + \frac{544,7}{q} - 0,33 \cdot t$
	Чет.	$a_{э} = 21,2 + \frac{31632}{m_c} + \frac{559,5}{q} - 0,24 \cdot t$
Московка - Ишим	Неч.	$a_{э} = 24,3 + \frac{35308}{m_c} + \frac{450,4}{q} - 0,12 \cdot t$
	Чет.	$a_{э} = 23,2 + \frac{45450}{m_c} + \frac{514,2}{q} - 0,39 \cdot t$

Проведена оценка качества построенной модели множественной регрессии, учитывающей перечисленные выше факторы. Для оценки качества предсказания использовался коэффициент детерминации  $R^2$ . Результаты исследования подтвердили,

что модель множественной нелинейной регрессии, учитывающая названные факторы, в сравнении с моделями гиперболической нелинейной и множественной линейной регрессии позволит достичь более достоверного определения нормы УРЭ на поездку (получены более высокие значения  $R^2$ ). Нужно заметить, что данные параметры являются известными перед поездкой.

Важной предпосылкой корректности использования уравнения регрессии является тот факт, что остатки подчиняются нормальному закону. На всех выборках с помощью критерия  $\chi^2$  была проверена нормальность остатков. В рассмотренных случаях при уровне значимости 0,05 не было оснований отвергнуть гипотезу о нормальности.

В конечном итоге по полученным уравнениям регрессии были определены соответствующие нормы УРЭ и проведен анализ их выполнения.

Анализ по плечам обслуживания локомотивных бригад (рис. 7) показал, что нормы УРЭ не выполнены только на плече обслуживания Московка – Барабинск в нечетном направлении. Дальнейший анализ по сериям электровозов (рис. 8), эксплуатирующихся на данном участке, показал, что нормы не выполнены электровозами серии 2ЭС6, затем выявлены поездки с электровозами 2ЭС6 (рис. 9), в которых нормы вышли за установленный диапазон отклонения в  $\pm 30\%$ , и выявлены МПЗ с пониженной энергетической эффективностью в конкретной поездке (рис. 10), а также причина невыполнения локомотивной бригадой нормы УРЭ за поездку (выявлено наличие двух неграфиковых остановок и одного предупреждения об ограничении скорости).

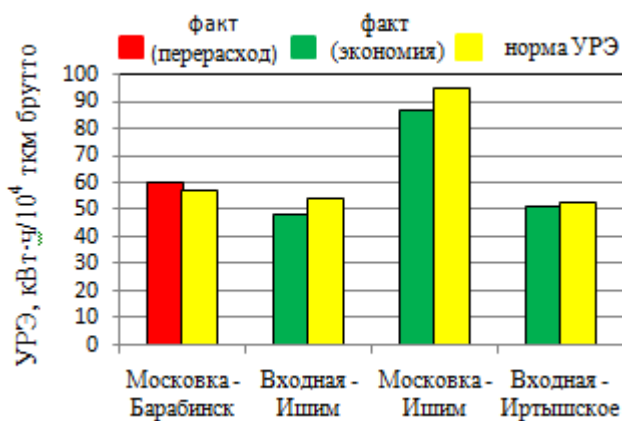


Рис. 7. Результаты анализа эффективности использования электроэнергии ЭПС на плечах обслуживания локомотивных бригад в нечетном направлении

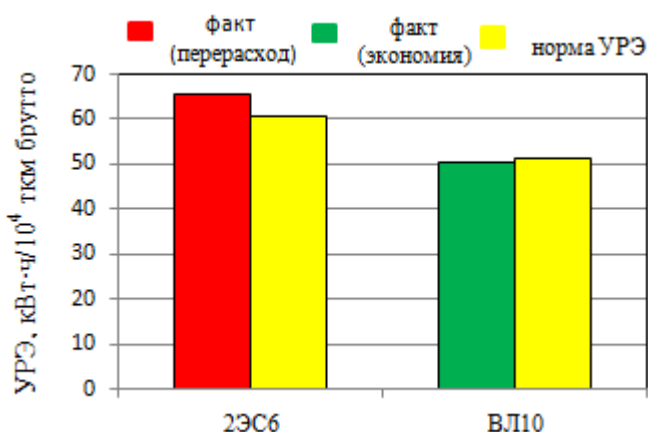


Рис. 8. Результаты анализа эффективности использования электроэнергии ЭПС по сериям электровозов на плече обслуживания локомотивных бригад Барабинск – Московка в нечетном направлении

Общая величина непроизводительных потерь электроэнергии от наличия двух неграфиковых остановок и одного предупреждения об ограничении скорости на участке в анализируемой поездке (см. рис. 10) составила 1287 кВт·ч. Если данное значение непроизводительных потерь электроэнергии учесть, то машинист уложится в установленный диапазон  $\pm 30\%$ .

В данном случае величину ущерба от непроизводительных потерь электроэнергии следует отнести на службу движения центральной дирекции управлением движе-

ния, а также рекомендовать произвести корректировку графика движения с целью сокращения неграфиковых остановок, ограничений скорости движения на участке и т. д.

Анализ остальных поездок с перерасходом электроэнергии показал, что данные поезда следовали в рамках нормативного графика движения поездов, поэтому эти номера электровозов и фамилии машинистов следует взять на контроль в последующих поездках с целью обоснования необходимости проведения непланового вида ремонта электровозов и обучения машинистов рациональным режимам вождения поездов.



Рис. 9. Результаты анализа эффективности использования электроэнергии ЭПС по итогам работы локомотивных бригад на плече обслуживания Барабинск – Московка (направление нечетное)

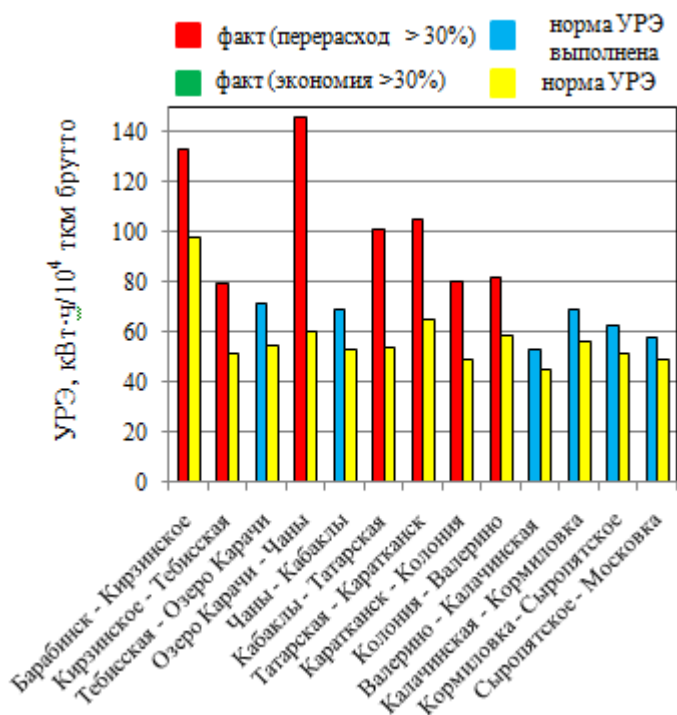


Рис. 10. Результаты анализа эффективности использования электроэнергии ЭПС в анализируемой поездке локомотивной бригады в границах МПЗ на плече обслуживания Барабинск – Московка (направление нечетное)

Внедрение системы мониторинга, предлагаемой в диссертационной работе, позволит обеспечить ежесуточный контроль непроизводительных потерь электроэнергии с отнесением их на участников перевозочного процесса и разрабатывать рекомендации по повышению эффективности использования электроэнергии ЭПС в зонах учета железной дороги, что позволит снизить непроизводительные потери и расход электроэнергии на тягу поездов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны и утверждены в ОАО «РЖД» технические требования к автоматизированным ИИК учета электроэнергии на тяговом ЭПС, позволяющие производителям создавать измерительные системы учета, обеспечивающие возможность определения эффективности эксплуатации ЭПС в границах зон учета железной дороги за произвольное время.



2. Разработана и утверждена в ОАО «РЖД» новая технология контроля потребления электрической энергии ЭПС с использованием ИИК и спутниковых навигационных систем, позволяющая автоматизировать процесс сбора и обработки информации об энергопотреблении ЭПС, определять расход электроэнергии в границах зон учета железной дороги за произвольное время прошедших суток.

3. Разработан метод снижения удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги, позволяющий по итогам суток локализовывать зоны учета с повышенным значением удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии с детализацией по четному и нечетному направлениям, по принадлежности к локомотивному депо, сериям и номерам локомотивов, и разрабатывать мероприятия по повышению эффективности использования электроэнергии ЭПС.

4. Разработана технология определения непроизводительных потерь электроэнергии в границах зон учета железной дороги при неграфиковых остановах, задержках поездов у запрещающих сигналов светофоров, ограничениях скорости движения на участке, нагоне графика времени, простоях на тракционных путях локомотивных депо и в пунктах оборота, простоях в пути следования и в ожидании работы по данным ИИК ЭПС, позволяющая определять действительные значения данных потерь и отнести их при взаимодействии с существующими автоматизированными системами ОАО «РЖД» на виновных участников перевозочного процесса (функциональных филиалов ОАО «РЖД») для повышения эффективности эксплуатации ЭПС.

5. Выполнена апробация метода снижения удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии в границах различных зон учета железной дороги на основе статистической модели множественной нелинейной регрессии, позволяющего локализовывать участки с неэффективным использованием электроэнергии.

В качестве рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации предлагаются внедрение системы мониторинга эффективности эксплуатации ЭПС и разработка выходных протоколов по итогам работы локомотивных бригад на плечах обслуживания с детализацией повышенного удельного расхода по зонам учета железных дорог, локомотивным депо и сериям локомотивов и рекомендаций по снижению удельного расхода и непроизводительных потерь электроэнергии.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

#### **а) научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК:**

1. Черемисин, В. Т. Контроль нерационального использования электрической энергии на тягу поездов с применением бортовых информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, С. Г. Истомин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 1 (21). – С. 69 – 74.

2. Истомин, С. Г. Определение непроизводительных потерь электроэнергии электроподвижным составом с использованием бортовых информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии / С. Г. Истомин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. – № 2 (58). – С. 19 – 24.

3. Черемисин, В. Т. Оценка влияющих факторов на значение интегрального показателя энергетической эффективности электровозов ЭП2К и 2ЭС6 на основе данных регистраторов параметров движения / В. Т. Черемисин, О. В. Гателюк, С. Г. Истомин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Новосибирская гос. акад. водного транспорта. – Новосибирск. – 2015. – № 2. – С. 85 – 89.

4. Черемисин, В. Т. Разработка алгоритма определения причин ущерба и ответственных за него участников перевозочного процесса при невыполнении локомотивной бригадой удельной нормы электроэнергии на поездку / В. Т. Черемисин, С. Г. Истомин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – № 2 (22). – С. 101 – 109.

**б) научные работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus и Web of Science:**

5. Istomin, S. Analyse des Betriebs der Lokomotive 2ES10 auf der Gleichstromstrecke der Swerdlowsker Eisenbahn/ S. Istomin, V. Nesewak // Elektrische Bahnen. – 2015. – № 4. – P. 186 – 189.

**в) патенты на изобретения**

6. Пат. 2591559 Российская Федерация, МПК В 60 L 3/00. Способ определения потерь электроэнергии электроподвижным составом при неграфиковых остановках с использованием бортовых информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии / Черемисин В. Т., Каштанов А. Л., Незевак В. Л., Пашков Д. В., Ушаков С. Ю., Истомин С. Г., Шатохин А. П.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2015105231/11; заявл. 16.02.15; опубл. 20.07.16. Бюл. № 20.

7. Пат. 2591558 Российская Федерация, МПК В 61 L 3/12. Способ определения непроизводительных потерь электроэнергии электроподвижным составом при нагоне графического времени с использованием бортовых информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии / Черемисин В. Т., Пашков Д. В., Ушаков С. Ю., Истомин С. Г.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2015114306/11; заявл. 16.04.15; опубл. 20.07.16. Бюл. № 20.

8. Пат. 2600960 Российская Федерация, МПК В 60 L 3/12. Способ определения непроизводительных потерь электроэнергии электроподвижным составом при проследовании участков с временным ограничением скорости с использованием бортовых информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии / Черемисин В. Т., Пашков Д. В., Ушаков С. Ю., Истомин С. Г.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – № 2015114900/11; заявл. 20.04.15; опубл. 27.10.16. Бюл. № 30.

**г) научные работы, опубликованные в других изданиях:**

9. Черемисин, В. Т. Мониторинг энергетической эффективности работы электроподвижного состава на плече обслуживания локомотивных бригад / В. Т. Черемисин, С. Г. Истомин // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 156 – 162.

10. Ушаков, С. Ю. О методах анализа эффективности потребления электроэнергии электроподвижным составом с использованием данных современных бортовых информационно-измерительных комплексов / С. Ю. Ушаков, Д. В. Пашков,

С. Г. Истомин // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 134 – 139.

11. Истомин, С. Г. Анализ удельного расхода электрической энергии на тягу поездов на плече обслуживания локомотивных бригад / С. Г. Истомин, Е. А. Лисенков // Современный взгляд на будущее науки: Сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. Уфа: ОМЕГА САЙНС, 2015. Ч. 2 – С. 57 – 61.

12. Черемисин, В. Т. Совершенствование статистического метода нормирования удельного расхода электроэнергии / В. Т. Черемисин, С. Г. Истомин, А. Е. Перестенко // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – Ч. 3 – С. 111 – 116.

13. Черемисин, В. Т. Автоматизированный анализ расхода электрической энергии на тягу поездов в границах зон учета / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, С. Г. Истомин // Материалы VIII Междунар. симпозиума «Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта» Eltrans'2015. Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. СПб. – 2015. – С. 52-55.

14. Истомин, С. Г. Оценка энергетической эффективности работы электроподвижного состава в границах произвольных зон учета / С. Г. Истомин // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 55 – 62.

15. Истомин, С. Г. Разработка технологии повышения эффективности использования электроэнергии электроподвижным составом в границах зон учета / С. Г. Истомин // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 15 – 22.

16. Истомин, С. Г. Разработка технологии определения эффективности эксплуатации электроподвижного состава в границах зон учета / С. Г. Истомин // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: Материалы междунар. науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 70 – 77.