

На правах рукописи



КОМЯКОВ Александр Анатольевич

**МЕТОДОЛОГИЯ ОРГАНИЗАЦИИ
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

05.02.22 – Организация производства (транспорт)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Омск 2020

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

Научный консультант

доктор технических наук, профессор
ЧЕРЕМИСИН Василий Титович

Официальные оппоненты

доктор технических наук, профессор
ЛАКИН Игорь Капитонович

доктор технических наук, профессор
ЦЫГАНОВ Владимир Викторович

доктор технических наук, профессор
МЕЛЬНИЧЕНКО Олег Валерьевич

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

Защита состоится 19 февраля 2021 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 218.013.02 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (УрГУПС) в ауд. Б2-15 (зал диссертационных советов) по адресу: 620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: <http://www.usurt.ru>.

Автореферат разослан 2020 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по почте в адрес диссертационного совета Д 218.013.02.

Тел./факс: +7 (343) 221-24-44. E-mail: NSirina@usurt.ru.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



Сирина
Нина Фридриховна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Среднегодовое потребление железнодорожным транспортом топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) превышает 21 млн т у.т., (305,4 млрд руб. согласно бюджету ОАО «РЖД» на 2019 г.). Доля затрат на ТЭР в общих эксплуатационных расходах ОАО «РЖД» остается стабильно высокой: около 19 %. При этом около 85 % затрат приходится на тягу поездов и 15 % – на нетяговые нужды. Значительный рост затрат на ТЭР в ОАО «РЖД» позволяет сделать вывод, что дальнейшая интенсификация деятельности по повышению энергетической эффективности производственных процессов железнодорожного транспорта актуальна.

В настоящее время научные и методологические принципы организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте в основном соответствуют стандарту ISO 50001 «Системы энергетического менеджмента». Эффективное функционирование ресурсосберегающих производственных систем достигается за счет нормирования и прогнозирования расхода и заданий по экономии ТЭР, формирования планов энергосберегающих организационно-технических мероприятий (ОТМ) и их реализации, контроля достижения целевых показателей по расходу и экономии ТЭР, а в случае необходимости – корректировки заданий по расходу и экономии ТЭР, планов реализации ОТМ, разработки управляющих воздействий по снижению нерационального расхода ТЭР.

Но при прогнозировании потребления ТЭР в производственных процессах в большинстве случаев используются методы «от достигнутого» и эвристические, что практически не позволяет учесть влияние производственных и климатических факторов на расход ТЭР и приводит к значительной погрешности, порой превышающей 15 %. Из-за отсутствия единых научных и методологических принципов оценки фактической эффективности организационных, технических и технологических решений, внедряемых при организации ресурсосберегающих производственных систем железнодорожного транспорта, не всегда можно достоверно оценить их фактический вклад в снижение расхода ТЭР и подготовить предложение о целесообразности их дальнейшего применения на объектах железнодорожного транспорта. Недостаточно эффективны и существующие методы и технические средства для мониторинга и управления показателями энергетической эффективности производственных процессов на уровне линейных структурных подразделений.

Таким образом, необходимо совершенствовать научные и методологические принципы организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте; при этом должны учитываться современные требования, предъявляемые к методам оценки энергетических показателей, к которым отно-

ся учет случайного характера энергопотребления, необходимость оценки факторов, влияющих на расход ТЭР и др.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-технических работ Омского государственного университета путей сообщения (темы НИР № г.р. 01200600821, 01201356055).

Степень разработанности темы исследования. Исследования в области совершенствования организации и повышения эффективности функционирования производственных систем на железнодорожном транспорте проводились отраслевыми научными школами и коллективами ВНИИЖТа, УрГУПСа, СамГУПСа, ПГУПСа, ИрГУПСа, РУТ (МИИТа), ОмГУПСа, РГУПСа, ДВГУПСа, СГУПСа, МЭИ, НИИАСа, ИПУ РАН и др. Большой вклад в исследование данных проблем внесли известные отечественные ученые: Б. А. Аржанников, М. П. Бадер, А. Т. Бурков, С. В. Власьевский, А. Г. Галкин, Л. А. Герман, Б. Е. Дынькин, Ю. И. Жарков, В. П. Закарюкин, А. А. Ковалев, А. Б. Косарев, А. В. Крюков, Б. И. Кудрин, Б. А. Левин, А. Н. Лисенков, Э. А. Мамаев, В. З. Манусов, А. Л. Манаков, А. Н. Марикин, А. Н. Митрофанов, А. С. Мишарин, В. М. Сай, В. Г. Сальников, Н. Ф. Сирина, Р. Н. Хамитов, В. В. Цыганов, В. Т. Черемисин, М. Г. Шалимов, М. В. Шевлюгин и др., а также их зарубежные коллеги: Э. Альмешай, А. Бадри, П. Баннун, Дж. Ван, Д. Генетлиу, В. Йепес, Г. Мануэль, К. Б. Парк, И. Сенгор, В. Чжан, Х. Чжоу, Х. Шуненберг и др.

Рост энергетической составляющей в общих эксплуатационных расходах железнодорожного транспорта обуславливает необходимость дальнейших исследований, связанных с совершенствованием методов и средств прогнозирования расхода ТЭР, развитием методов оценки фактической эффективности внедряемых организационных, технических и технологических решений, разработкой методов и технических средств для мониторинга и управления показателями энергетической эффективности производственных процессов.

Цель диссертационной работы: повышение эффективности функционирования и совершенствование производственных процессов для организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте путем создания и применения методов и средств мониторинга использования ТЭР, организационно-методических и технических решений с использованием новых информационных технологий.

Для достижения поставленной цели поставлены и решены следующие задачи:

1) выполнить систематизацию методов и средств эффективного использования ТЭР при организации производственных процессов на железнодорожном транспорте;

2) усовершенствовать научные и методологические принципы повышения эффективности функционирования производственных систем железнодорожного транспорта на основе учета факторов, влияющих на использование ТЭР при организации производственных процессов, результатов внедрения организационных, технических и технологических ресурсосберегающих решений и развития организационной структуры управления процессами использования ТЭР;

3) теоретически обосновать и разработать методологию повышения эффективности функционирования производственных систем на железнодорожном транспорте за счет оптимизации привлечения и использования ТЭР на основе статистических подходов с применением теории машинного обучения;

4) разработать методы и средства эффективного использования ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте на основе применения новых информационных технологий;

5) предложить научные и методологические принципы оценки эффективности организационных, технических и технологических решений, используемых при организации ресурсосберегающих производственных систем железнодорожного транспорта;

6) разработать составляющие стратегии развития железнодорожного транспорта как ресурсосберегающей производственной системы в части комплексной систематизации, анализа и прогнозирования ключевых показателей эффективности использования ТЭР в производственных процессах и выполнить их верификацию;

7) предложить усовершенствованные методы и средства мониторинга использования ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте.

Объект исследования: производственные процессы на железнодорожном транспорте в качестве единой производственной системе.

Область исследования: разработка методов и средств эффективного привлечения и использования материально-технических ресурсов в организацию производственных процессов, разработка научных, методологических и системотехнических принципов повышения эффективности функционирования производственных систем, организация ресурсосберегающих производственных систем.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Предложены усовершенствованные научные и методологические принципы повышения эффективности функционирования ресурсосберегающих производственных систем, базирующиеся на переходе от методов управления процессом использования ТЭР от достигнутого уровня энергопотребления к методам, предполагающим разработку и применение математических моделей, основанных на учете линейного и нелинейного влияния на объем энергопотребления характеристик производственной деятельности, климатических факторов и результатов

внедрения организационных, технических и технологических решений, направленных на повышение энергетической эффективности железнодорожного транспорта, и на совершенствовании организационной структуры управления процессами использования ТЭР на железнодорожном транспорте в части делегирования полномочий по разработке проектов заданий по экономии энергоресурсов на уровень филиалов и линейных структурных подразделений.

2. Теоретически обоснованы, разработаны и экспериментально апробированы математические модели функционирования производственных систем в перевозочных и неперевозочных видах деятельности железнодорожного транспорта в части эффективного использования ТЭР, отличающиеся усовершенствованными алгоритмами выбора гиперпараметров, которые позволяют оценить энергетическую эффективность производственного процесса; доказана эффективность применения методов машинного обучения для решения задачи моделирования процесса использования ТЭР на железнодорожном транспорте.

3. Разработаны методы и средства эффективного использования ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте с использованием информационных технологий, базирующиеся на определении прогнозируемого расхода энергоресурсов с учетом влияния производственных и климатических факторов и оценке потенциала экономии энергоресурсов на основе анализа временных тенденций изменения заданий по их экономии и результатов энергетического обследования, доказана работоспособность предложенных методов и алгоритмов в условиях действующих предприятий железнодорожного транспорта.

4. Теоретически обоснованы, разработаны и экспериментально апробированы научные и методологические принципы оценки эффективности организационных, технических и технологических решений, используемых при организации ресурсосберегающих производственных систем железнодорожного транспорта, основанные на применении уточненной классификации ресурсосберегающих мероприятий и усовершенствованного алгоритма, предполагающего приведение расхода энергоресурсов в базовом периоде к отчетному за счет корректировок и оценку статистической значимости достигнутой в производственных процессах экономии энергоресурсов с учетом законов распределения выборок энергопотребления.

5. Разработаны составляющие стратегии развития железнодорожного транспорта как ресурсосберегающей производственной системы в части комплексной разработки, анализа и прогнозирования ключевых показателей эффективности использования ТЭР в производственных процессах на основе разработанных математических моделей, доказана их работоспособность и эффективность по результатам верификации и опытной апробации.

6. Предложены усовершенствованные методы и средства мониторинга использования ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте за счет внедрения автоматизированной системы контроля и управления энергопотреблением, учитывающей влияние времени наработки энергопотребляющего оборудования на показатели энергетической эффективности. Доказана возможность использования предлагаемых решений для мониторинга показателей энергетической эффективности производственных процессов на железнодорожном транспорте.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке усовершенствованных научных и методологических принципов повышения эффективности функционирования ресурсосберегающих производственных систем и математических моделей эффективного использования ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте на основе методов машинного обучения, позволяющих повысить точность и эффективность нормирования и прогнозирования потребления ТЭР в производственных процессах. Разработанные подходы к оценке эффективности ресурсосберегающих решений, используемых при организации производственных систем железнодорожного транспорта, позволяют повысить эффективность выполнения заданий по экономии ТЭР в производственных системах.

Практическая значимость работы состоит в разработке и внедрении в производственных процессах на железнодорожном транспорте новых методов и средств эффективного использования ТЭР на основе применения новых информационных технологий, направленных на анализ и управление расходом ТЭР на нетяговые нужды, формирование заданий по экономии ТЭР, мониторинг показателей энергетической эффективности производственных систем ОАО «РЖД». Применение предлагаемых организационных, методических и технических решений позволило снизить нерациональное использование электрической энергии в производственных процессах на железнодорожном транспорте и повысить эффективность их функционирования, а также сформировать ключевые показатели эффективности развития железнодорожного транспорта как ресурсосберегающей производственной системы.

Методология и методы исследования. Для достижения поставленных целей проведены теоретические и экспериментальные исследования: моделирование процессов использования ТЭР с применением численных методов аппроксимации и сглаживания экспериментальных данных, метода наименьших квадратов, метода градиентного спуска, методов машинного обучения; анализ выборок расхода энергоресурсов на основе методов параметрической и непараметрической статистики; моделирование процессов энергопотребления с помощью разработанного про-

граммного комплекса, а также современных программных средств MatLAB и Statistica; методы управления ресурсосбережением как составляющие производственного менеджмента.

Положения, выносимые на защиту.

1. Усовершенствованные научные и методологические принципы повышения эффективности функционирования ресурсосберегающих производственных систем, которые базируются на переходе от методов управления процессом использования ТЭР от достигнутого уровня энергопотребления к методам, предполагающим разработку и применение математических моделей, основанных на учете линейного и нелинейного влияния на объем энергопотребления характеристик производственной деятельности, климатических факторов и результатов внедрения организационных, технических и технологических решений, направленных на повышение энергетической эффективности железнодорожного транспорта, и на совершенствовании организационной структуры управления процессами использования ТЭР на железнодорожном транспорте в части делегирования полномочий по разработке проектов заданий по экономии энергоресурсов на уровень филиалов и линейных структурных подразделений.

2. Математические модели функционирования производственных систем в перевозочных и неперевозочных видах деятельности железнодорожного транспорта в части эффективного использования ТЭР, отличающиеся усовершенствованными алгоритмами выбора гиперпараметров, основанные на применении методов машинного обучения, которые позволяют оценивать энергетическую эффективность производственного процесса.

3. Методы и средства эффективного использования ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте с применением информационных технологий, базирующиеся на определении планового расхода энергоресурсов с учетом влияния производственных и климатических факторов и оценке потенциала экономии энергоресурсов на основе анализа временных тенденций изменения заданий по их экономии и результатов энергетического обследования.

4. Научные и методологические принципы оценки эффективности организационных, технических и технологических решений, используемых при организации ресурсосберегающих производственных систем железнодорожного транспорта, основанные на применении уточненной классификации ресурсосберегающих мероприятий и усовершенствованного алгоритма, предполагающего приведение расхода энергоресурсов в базовом периоде к отчетному за счет корректировок и оценку статистической значимости достигнутой в производственных процессах экономии энергоресурсов с учетом законов распределения выборок энергопотребления.

5. Составляющие стратегии развития железнодорожного транспорта как ресурсосберегающей производственной системы в части комплексной систематизации, анализа, прогнозирования и верификации ключевых показателей эффективности использования ТЭР.

6. Усовершенствованные методы и средства мониторинга привлечения и использования ТЭР на железнодорожном транспорте за счет создания автоматизированной системы контроля и управления энергопотреблением предприятий железнодорожного транспорта.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены и применяются при организации ресурсосберегающих производственных систем в ОАО «РЖД» и ООО «СТМ-Сервис», что подтверждается следующими документами: 1) методика планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды с использованием искусственных нейронных сетей (утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» № 2626р от 06.12.2011); 2) порядок формирования заданий филиалам ОАО «РЖД» по экономии ТЭР на нетяговые нужды (утвержденный распоряжением ОАО «РЖД» № 2754р от 24.12.2018); 3) унифицированная методика по расчету экономии ТЭР от реализации мероприятий программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности структурных подразделений ОАО «РЖД» (утвержденная распоряжением № ЦТех-45 от 28.06.2019); 4) акты об использовании результатов научных исследований и разработок в производстве (Западно-Сибирская ЖД, от 15.04.2015; Свердловская ЖД, от 25.01.2016; ООО «СТМ-Сервис», от 10.04.2018; Департамент технической политики ОАО «РЖД», от 16.03.2020; Дорожный топливно-энергетический центр Западно-Сибирской ЖД, от 26.03.2020).

Основные научные результаты исследования использованы при разработке «Энергетической стратегии холдинга «РЖД» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года», утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2537р.

Разработанные программы для ЭВМ и получившие правовую охрану технические решения применяются для прогнозирования расхода ТЭР на нетяговые нужды и для мониторинга показателей энергоэффективности производственных процессов в ОАО «РЖД» и ООО «СТМ-Сервис».

Степень достоверности и апробация результатов работы.

Достоверность научных положений и результатов диссертационной работы подтверждена экспериментальными исследованиями и результатами апробации предложенных методик и технических решений на действующих объектах железнодорожного транспорта. Средние относительные погрешности разработанных математических моделей не превышают 15 %, а результирующее расхождение

результатов теоретических исследований с экспериментальными данными не превышает 5 %.

Основные положения работы и ее результаты докладывались и обсуждались на 26 научных конференциях, в том числе на научно-практических конференциях «Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте» (Омск, 2011, 2012, 2015, 2016, 2018); научно-практической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте «ИСУЖТ-2012» (Москва, 2012); научно-практической конференции «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» (Омск, 2013); Международной конференции International Conference on Environment and Electrical Engineering (Краков, Польша, 2014; Рим, Италия, 2015; Флоренция, Италия, 2016); Международной научно-практической конференции «Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем» (Омск, 2014, 2016); Международной научно-практической конференции «Транспорт-2014» (Ростов-на-Дону, 2014); VIII, IX и X международных симпозиумах «Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта» Eltrans (Санкт-Петербург, 2015, 2017, 2019); третьей Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава» (Омск, 2015); Всероссийской научно-практической конференции «Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы» (Хабаровск, 2015); Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» (Омск, 2016); Международной конференции International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (Челябинск, 2016; Санкт-Петербург, 2017; Москва, 2018); третьей Международной научно-практической конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов» (Москва, 2018); Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям FarEastCon-2018 (Владивосток, 2018); на Сибирском транспортном форуме TransSiberia-2018 (Новосибирск, 2018); на третьей Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств» (Омск, 2019).

Предложенные в диссертационной работе научно-организационные и технические решения представлены на сетевых школах ОАО «РЖД» «Нормирование

и анализ расхода топливно-энергетических ресурсов» (Самара, 2010; Санкт-Петербург, 2011).

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-техническом семинаре Омского государственного университета путей сообщения «Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта, объектов промышленной теплоэнергетики, телекоммуникационно-информационных систем, автоматики и телемеханики» (Омск, 2020), научном семинаре докторантов и соискателей ученой степени доктора наук Уральского государственного университета путей сообщения (Екатеринбург, 2020).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 60 научных работ, среди которых две монографии, 18 научных статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, восемь работ в изданиях, включенных в международные системы цитирования Web of Science и Scopus, три патента на полезные модели, два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 27 публикаций в прочих изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 332 наименований и девяти приложений. Работа изложена на 340 страницах основного текста, содержит 125 рисунков, 81 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе выполнена систематизация методов и средств эффективного использования ТЭР при организации производственных процессов на железнодорожном транспорте, рассмотрены существующие подходы к анализу, прогнозированию, нормированию и контролю потребления ТЭР на железнодорожном транспорте, в энергетических системах и промышленности.

Анализ структуры управления потреблением ТЭР показывает, что существенное внимание в ОАО «РЖД» уделяется вопросам нормирования и прогнозирования расхода ТЭР в производственных процессах, внедрения ресурсосберегающих решений. Работа ведется на уровне аппарата управления, филиалов, региональных дирекций и линейных структурных подразделений. Для контроля показателей энергоэффективности внедрена и успешно применяется АИС «Энергоэффективность» (более 2200 энергопотребляющих подразделений). В ОАО «РЖД»

применяется стандарт ISO 50001 – непрерывный мониторинг процессов, определяющих энергетическую эффективность; предпринимаются действия по снижению нерационального использования ресурсов. Но существующие подходы к решению указанных задач, в числе которых можно отметить методы, основанные на нормировании расхода ТЭР в расчете на единицу перевозочной работы, по бюджетным статьям доходов и расходов в расчете на единицу конечной продукции «от достигнутого уровня» обладают рядом недостатков. В большинстве случаев они не позволяют учесть влияние состава и режимов работы энергопотребляющего оборудования, производственных климатических и иных факторов на расход ТЭР в производственных процессах, что приводит к значительному расхождению между запланированным и фактическим объемом энергопотребления.

Например, погрешность прогнозирования расхода электроэнергии в структурных подразделениях в границах Западно-Сибирской ЖД менее чем в половине случаев имеет удовлетворительное значение – 5 %, а в 9 % случаев превышает 15 %. Кроме того, применяемые подходы практически не предусматривают применение новых информационных технологий при использовании ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте. Также отмечается недостаточная эффективность существующих методов оценки фактической энергетической эффективности внедряемых организационных, технических и технологических решений, а также методов и технических средств мониторинга показателей энергетической эффективности производственных процессов.

Это затрудняет реализацию эффективной ресурсосберегающей производственной системы, которая включает в себя процессы нормирования и прогнозирования расхода ТЭР, мониторинга использования ТЭР в производственных системах железнодорожного транспорта, выявление нерационального использования ТЭР и своевременного принятия управляющих воздействий для его снижения.

Математический аппарат, положенный в основу современной системы контроля и управления процессами энергопотребления в производственных системах на железнодорожном транспорте, должен учитывать следующие особенности: случайный резко переменный характер расхода ТЭР, наличие значительного количества воздействующих факторов, а также нелинейных зависимостей между расходом ТЭР и влияющими факторами и др.

Сформирована классификация возможных подходов к реализации эффективной методологии анализа, нормирования и прогнозирования расхода ТЭР и управления энергетической эффективностью производственных процессов на железнодорожном транспорте, анализ опыта применения которых показал, что поставленным требованиям удовлетворяют методы машинного обучения. Для даль-

нейшего исследования выбраны методы искусственных нейронных сетей (ИНС), нечетких нейронных сетей (ННС) и опорных векторов (SVM).

На основе систематизации методов и средств эффективного использования ТЭР при организации производственных процессов сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе обоснованы основные принципы предлагаемой методологии организации ресурсосберегающих производственных систем.

1. Переход от методов управления процессом использования ТЭР «от достигнутого» к методам, предполагающим разработку и применение математических моделей процесса энергопотребления, на следующих этапах: прогнозирование расхода ТЭР, оценка фактической эффективности ресурсосберегающих решений, разработка методов и средств мониторинга использования ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте, планирование заданий по экономии ТЭР.

2. Совершенствование организационной структуры управления процессами использования ТЭР на железнодорожном транспорте в части делегирования полномочий по разработке проектов заданий по экономии энергоресурсов с уровня центрального аппарата на уровень филиалов и линейных СП.

3. Разработка и прогнозирование целевых показателей развития железнодорожного транспорта как ресурсосберегающей производственной системы на долгосрочную перспективу.

Для реализации первого принципа исследованы факторы, влияющие на использование ТЭР при организации ресурсосберегающих производственных систем для перевозочного процесса и неперевозочных видов производственной деятельности. Для перевозочного процесса с учетом специфики решаемой задачи использована известная классификация влияющих факторов с разделением на две группы: условно-постоянные и переменные факторы.

Для неперевозочных видов производственной деятельности уточнена классификация влияющих факторов с разделением на три группы: климатические, производственные, прочие.

По результатам анализа факторов к дальнейшему рассмотрению приняты: объем производственной деятельности $V_{\text{произв}}$, измеритель которого принимался в соответствии со спецификой хозяйственной деятельности структурного подразделения (СП), и климатические факторы: температура воздуха t , °С; продолжительность светового дня $T_{\text{св. дня}}$, с; облачность Cl , %; ветер F_w , м/с; снег Sn .

В качестве исследуемых производственных систем в перевозочных видах деятельности приняты процессы перевозки грузов и пассажиров с применением приписного парка локомотивов эксплуатационных локомотивных депо Карасук

(грузовое движение, 4658 поездок), Барабинск (пассажирское движение, 2334 поездки), моторвагонного депо Омск (пригородное движение, 5100 поездок) Западно-Сибирской ЖД, а в неперевозочных видах деятельности – производственные системы 122 СП различной хозяйственной принадлежности, расположенных в границах Московской, Октябрьской, Западно-Сибирской, Забайкальской, Южно-Уральской и Юго-Восточной ЖД (общий объем выборки: 3426 значений).

Для оценки степени влияния принятых к рассмотрению факторов на расход электроэнергии W применен математический аппарат, основанный на методах корреляционного анализа. Результаты представлены в виде нормированных корреляционных матриц, при этом статистически значимые коэффициенты определялись на основе t -критерия (выделены жирным шрифтом; таблица 1).

Таблица 1 – Корреляционная матрица для производственного процесса дистанций СЦБ

Фактор	W	$V_{\text{произв}}$	t	$T_{\text{св. дня}}$	Cl	F_w	Sn
W	1,000	0,227	-0,369	-0,372	0,180	-0,044	0,223
$V_{\text{произв}}$	–	1,000	0,026	0,015	-0,032	-0,112	-0,046
t	–	–	1,000	0,888	-0,535	-0,352	-0,646
$T_{\text{св. дня}}$	–	–	–	1,000	-0,685	-0,202	-0,399
Cl	–	–	–	–	1,000	0,337	0,019
F_w	–	–	–	–	–	1,000	-0,036
Sn	–	–	–	–	–	–	1,000

По результатам корреляционного анализа влияющих факторов можно сделать вывод, что в большинстве случаев наблюдается мультиколлинеарность между различными факторами. Это обуславливает необходимость проведения исследований по исключению мультиколлинеарности и отбору факторов для формирования конкретных математических моделей.

Данная задача может быть формализована следующим образом: для исходной выборки $A = \{(X_i, W_i)\}_{i=1}^n$, где n – количество значений в выборке, W – расход ТЭР, необходимо среди множества m производственных, климатических и иных факторов $X_i = \{(x_{ij})\}_{j=1}^m$ выбрать некое подмножество значимых факторов.

Выполнена классификация методов отбора факторов, по результатам анализа которых для дальнейших исследований выбраны последовательные алгоритмы поиска и метод главных компонент (МГК).

Расчеты на основе МГК выполнены с применением программного комплекса Statistica и представлены на примере производственного процесса дистанции СЦБ Брянск-Льговский, для которой сгенерированы два новых признака: F_1, F_2 . В данном случае признак F_1 в большей степени связан с метеорологическими факто-

рами (за исключением ветра), а F_2 – с объемом производственной деятельности (таблица 2). Согласно критерию Кайзера (таблица 3), в модели целесообразно оставлять два фактора.

Таблица 2 – Факторные нагрузки сгенерированных признаков для дистанции СЦБ Брянск-Льговский

Признак	F_1	F_2
$V_{\text{произв}}$	0,009	0,982
t	-0,947	0,058
$T_{\text{св. дня}}$	-0,942	-0,055
Cl	0,778	0,123
F_w	0,553	-0,159
Sn	0,800	-0,076

Таблица 3 – Собственные числа и доля общей дисперсии сгенерированных признаков для производственного процесса дистанции СЦБ Брянск-Льговский

Признак	Собственные числа	Доля общей дисперсии, %	Накопленные собственные числа	Накопленная доля общей дисперсии, %
F_1	3,34	55,61	3,34	55,61
F_2	1,02	16,94	4,35	72,55

На основе сказанного предложена методология отбора факторов, влияющих на расход ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте (рисунок 1), и проведено ее испытание на примере процессов перевозки грузов и пассажиров с применением приписного парка локомотивов эксплуатационных локомотивных депо ТЧЭ Барабинск, ТЧЭ Карасук и моторвагонного депо ТЧПриг Омск и производственных процессов в неперевозочных видах деятельности (сервисное локомотивное депо СЛД Аркаим, дистанция СЦБ ШЧ Брянск-Льговский, дистанция погрузочно-разгрузочных работ МЧ Апатиты).

Пусть имеется выборка $A = \{(x_i, W_i)\}_{i=1}^n$. Задача состоит в нахождении функции F , наилучшим образом описывающей зависимость между расходом электроэнергии W и влияющими факторами x :

$$W = f(x_1, x_2, \dots, x_m). \quad (1)$$

Математические модели формируются следующим способом. Исходная выборка разделялась случайным образом на обучающую и тестовую в соотношении 80 %:20 %. К рассмотрению принимались факторы, отобранные с применением методов последовательного с включением, последовательного с исключением и МГК. Дополнительно рассматривался случай, когда в модель включаются все фак-

торы. Затем определяются показатели, характеризующие точность полученных моделей.

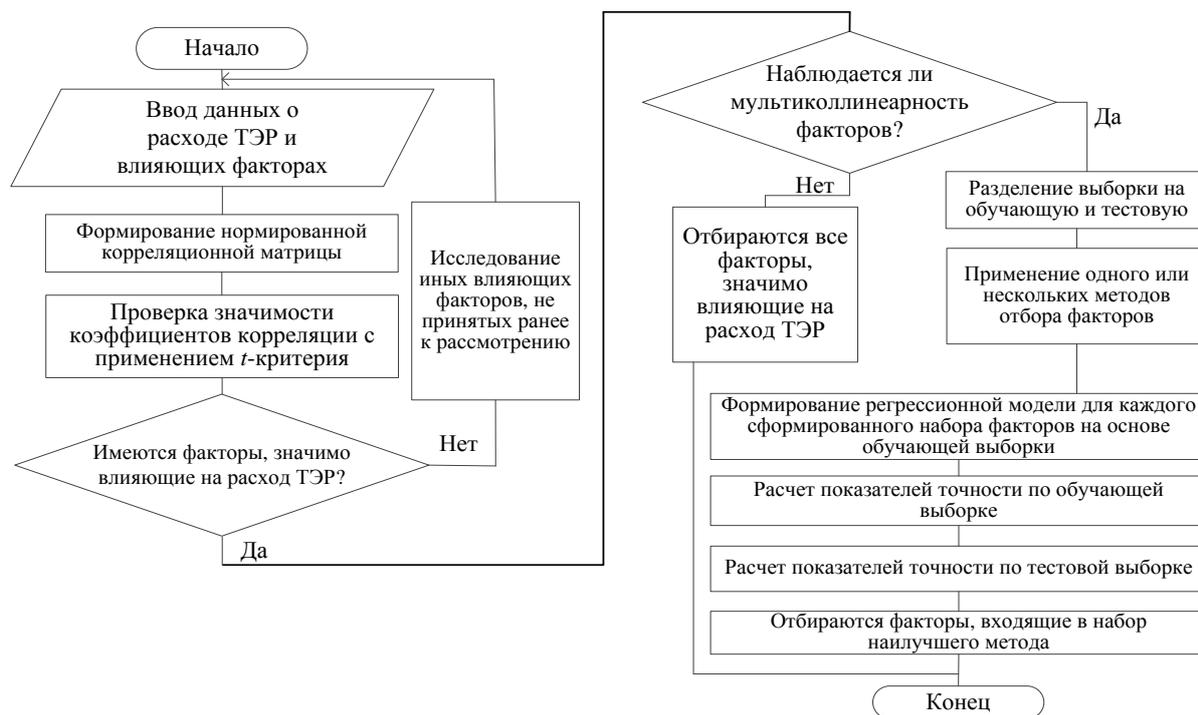


Рисунок 1 – Алгоритм отбора факторов, влияющих на расход ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте

По данным обучающей выборки рассчитываются коэффициенты корреляции и детерминации, а по данным тестовой выборки – средняя относительная погрешность $MARE$, средняя квадратическая погрешность $RMSE$, коэффициент вариации CV .

По результатам апробации предложенной методологии отбора факторов можно сделать следующие выводы.

1. При отборе влияющих факторов для перевозочного процесса рекомендован метод «последовательный с исключением», а для неперевозочных видов деятельности – «последовательный с включением», «последовательный с исключением» и МГК.

2. Показатели точности математических моделей, построенных на основе регрессионного анализа, сравнительно невысоки. Как видно из рисунка 2, средняя относительная погрешность в большинстве случаев превышает 10 %, а в ряде случаев – 15 %.

Коэффициенты вариации для большинства объектов превышают 0,15. Следовательно, применение статистических методов, основанных на регрессионном анализе, не всегда приемлемо для формирования математических моделей потреб-

ления ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте, особенно для неперевозочных видов деятельности. Необходимо рассмотреть другие варианты формирования математических моделей, в частности, методы машинного обучения – ИНС, ННС и SVM.

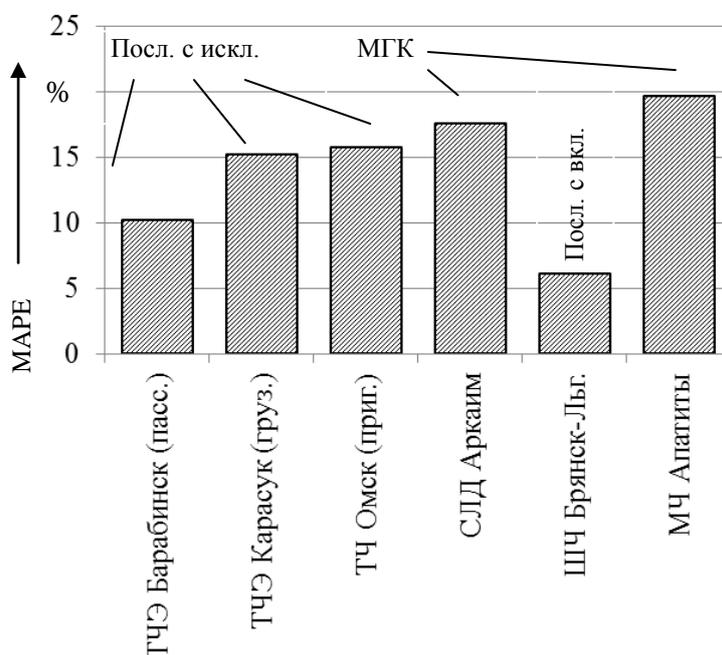


Рисунок 2 – Средние относительные погрешности регрессионных моделей для наилучшего метода отбора факторов

Представленная методология и предложенные рекомендации использованы при разработке математических моделей эффективности использования ТЭР на железнодорожном транспорте на основе методов машинного обучения.

В третьей главе выполнены теоретическое обоснование и разработка математических моделей использования ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте.

Выполнен анализ выборок расхода электроэнергии и влияющих факторов для рассматриваемых производственных систем, по итогам которого разработаны алгоритмы выбора гиперпараметров ИНС, ННС и SVM. Для ИНС выбрана модель многослойного персептрона с одним скрытым слоем. Количество нейронов входного слоя соответствует количеству рассматриваемых влияющих факторов $x_1 - x_N$. Выходной слой содержит один нейрон, что соответствует одной выходной величине y (расход электрической энергии). Количество нейронов на скрытом слое для неперевозочных видов деятельности не превышает девяти, а для перевозочного процесса – 12.

В качестве активационных функций для перевозочного процесса приняты: на скрытом слое – тангенциальная, экспоненциальная и логистическая, на выход-

ном слое – тангенциальная, экспоненциальная, логистическая, линейная и синусоидальная, а для неперевоочных видов деятельности на скрытом и выходном слоях – тангенциальная, экспоненциальная и логистическая функции.

Для ННС выбрана структура с со следующими гиперпараметрами: пять слов, функция принадлежности на входе – треугольная или двойная гауссова, количество циклов обучения – один, с неодинаковым количеством функций принадлежности на входе.

Для SVM по итогам исследования предложено использовать SVM-регрессию типа 2 с радиально-базисной ядерной функцией.

По результатам верификации моделей установлено, что при моделировании процесса использования ТЭР методы машинного обучения демонстрируют существенно лучшие результаты, чем множественная регрессия (рисунок 3).

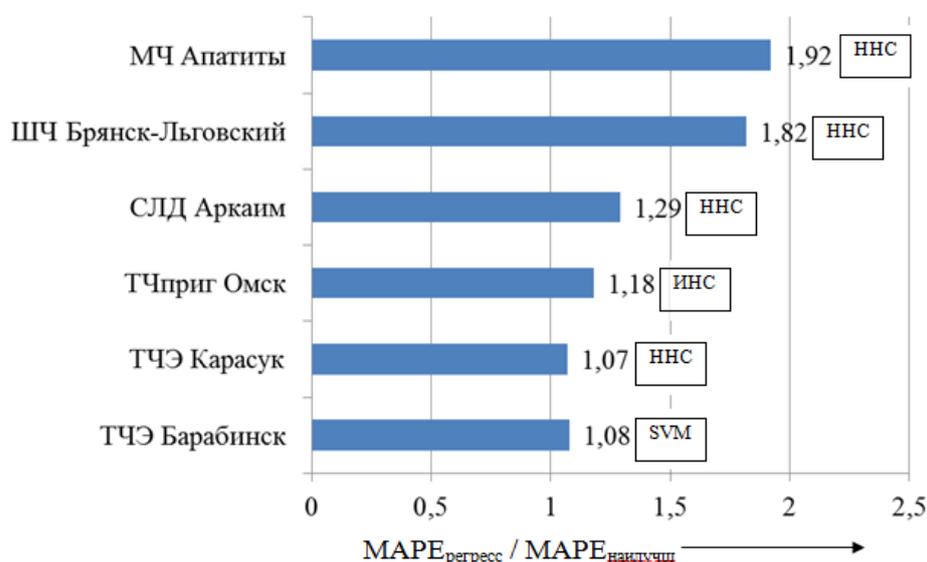


Рисунок 3 – Оценка увеличения точности в результате применения моделей на основе машинного обучения в сравнении с множественной регрессией

Особенно значительное повышение точности наблюдается для неперевоочных видов деятельности (отношение средних относительных погрешностей регрессионной модели и наилучшей из остальных моделей $MAPE_{регресс} / MAPE_{наилучш}$ для различных объектов находится в пределах 1,29–1,92). Анализ остатков моделей показывает, что они распределены по нормальному закону, а математическое ожидание близко к нулю. Таким образом, можно сделать вывод, что остатки модели носят случайный характер, а систематические погрешности моделей отсутствуют, что говорит об их удовлетворительном качестве.

Это позволяет рекомендовать предложенные подходы для дальнейшего применения при разработке методов и средств эффективного использования ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте, организации про-

гнозирования потребления ТЭР с применением новых информационных технологий, оценке эффективности организационных, технических и технологических решений, используемых в ресурсосберегающих производственных системах железнодорожного транспорта.

В четвертой главе приведены результаты разработки методов и средств эффективного использования ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте на основе применения новых информационных технологий. Разработан алгоритм процесса нормирования и прогнозирования расхода ТЭР на железнодорожном транспорте, который включает в себя четыре основных этапа (рисунок 4).

На первом этапе СП ОАО «РЖД» прогнозирует расход ТЭР на основе данных о расходе ТЭР за предыдущие периоды, производственных и климатических факторах, вводе или выводе из эксплуатации оборудования. Эти предложения согласуются на уровне региональных дирекций, дорожных топливно-энергетических центров (НТЭЦ), филиалов ОАО «РЖД» и Департамента экономики (ЦЭУ) и не включают задания по экономии ТЭР. На втором этапе Департаментом технической политики (ЦТех) и филиалами формируются предложения по экономии ТЭР в расчетном периоде за счет реализации ОТМ инвестиционных проектов филиалов (ИПФ) и инвестиционного проекта «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте» (ИПРС). На третьем этапе филиалами и СП рассчитываются задания по экономии ТЭР на основе ИПФ и ИПРС, а также определяется обоснованный потенциал экономии ТЭР за счет реализации организационных мероприятий (ОМ) на уровне СП. Затем формируется проект расчета потребности в ТЭР.

Планируемый расход ТЭР i -го вида определяется по выражению:

$$W_i^{\text{расч.план}} = W_i^{\text{план.СП}} - \mathcal{E}_i^{\text{ОТМ}}, \quad (2)$$

где $W_i^{\text{план.СП}}$ – планируемый расход ТЭР i -го вида, спрогнозированный СП и согласованный на уровне НТЭЦ, филиалов и ЦЭУ; $\mathcal{E}_i^{\text{ОТМ}}$ – обоснованный потенциал экономии ТЭР i -го вида за счет реализации ОТМ, внедряемых в рамках ИПРС, ИПФ, а также ОМ, реализуемых за счет эксплуатационных расходов СП ОАО «РЖД»:

$$\mathcal{E}_i^{\text{ОТМ}} = \mathcal{E}_i^{\text{ИПРС}} + \mathcal{E}_i^{\text{ИПФ}} + \mathcal{E}_i^{\text{ОМ}}, \quad (3)$$

где $\mathcal{E}_i^{\text{ИПРС}}$ – ожидаемая экономия ТЭР i -го вида за планируемый период, достигаемая в результате реализации мероприятий, внедряемых в рамках ИПРС; $\mathcal{E}_i^{\text{ИПФ}}$ – ожидаемая экономия ТЭР i -го вида за планируемый период, достигаемая в результате реализации мероприятий, внедряемых в рамках ИПФ; $\mathcal{E}_i^{\text{ОМ}}$ – потенциал эко-

номии ТЭР i -го вида в планируемом периоде за счет реализации ОМ, внедряемых за счет эксплуатационных расходов филиалов ОАО «РЖД».

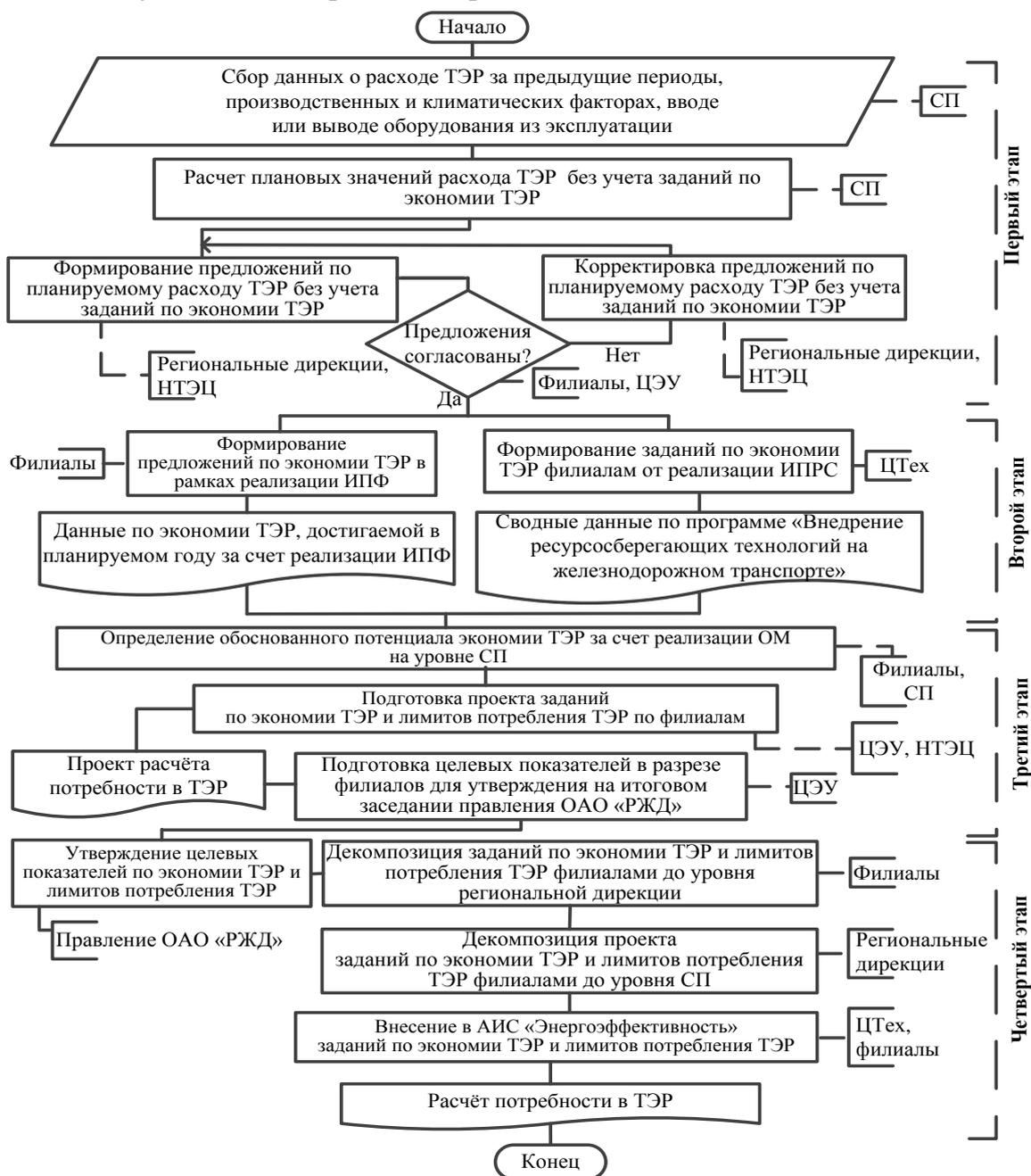


Рисунок 4 – Алгоритм нормирования и прогнозирования расхода ТЭР на железнодорожном транспорте

На основе полученных данных определяется значение целевых показателей по экономии ТЭР, которые подготавливаются к утверждению на заседании правления ОАО «РЖД».

На четвертом этапе утверждаются целевые показатели по экономии ТЭР на уровне правления ОАО «РЖД» и декомпозиция заданий по экономии ТЭР и лимитов потребления ТЭР до уровня региональных дирекций и СП, которые вносятся в АИС «Энергоэффективность».

Из представленных в алгоритме действий наибольшую сложность с научной и методологической точек зрения представляют расчет прогнозных значений расхода ТЭР в производственных процессах и определение обоснованного потенциала экономии ТЭР за счет реализации ОМ.

Для расчета прогнозных значений расхода ТЭР в производственных процессах на уровне СП целесообразно использовать математические модели расхода ТЭР, на основе которых разработана методика планирования расхода электроэнергии на нетяговые нужды с применением ИНС, включающей шесть основных этапов.

На первом этапе выполняется сбор исходных данных, представляющих собой выборку значений расхода электроэнергии и влияющих факторов за предшествующие расчетному периоды. С учетом коэффициента использования нагрузки определяется приведенная мощность электрооборудования (ЭО) в СП по следующим составляющим расхода электрической энергии: условно-постоянная составляющая, определенная наличием ЭО, режимы работы которого не зависят от объемов производственной деятельности и носят вспомогательный характер выполнения производственно-технологического процесса; переменная составляющая, обусловленная выполнением основного вида работ (зависит от его объема).

На втором этапе обрабатываются первичные исходные данные и формируется обучающая выборка, которая используется на третьем этапе для создания и обучения нейронной сети.

На четвертом этапе происходит сбор информации о плановых значениях влияющих факторов на расчетный период. На основе этих данных ИНС автоматически рассчитывает плановые значения расхода электрической энергии на расчетный период (квартал) и анализирует изменение расхода в сравнении с аналогичным периодом предыдущего года.

На пятом этапе рассчитываются плановые значения расхода электроэнергии с применением ИНС и оценивается достоверность результатов прогнозирования.

На шестом этапе выполняется дообучение нейросети (корректировка параметров ИНС на основании добавления в обучающую выборку последних данных о фактическом расходе электрической энергии и фактических значениях влияющих факторов).

Опытная эксплуатация методики показала, что основная проблема для пользователей заключается в сложности учета в обучающей или тестовой выборке ввода или вывода из эксплуатации ЭО, изменении режимов его работы. Предложено усовершенствовать данный процесс выведением его в отдельный этап прогнозирования. В соответствии с предлагаемыми решениями, дополнительный расход электроэнергии в результате ввода в эксплуатацию ЭО с установленной мощно-

стью P_n предлагается не учитывать в обучающей выборке, а определять по формуле:

$$W_{i\text{пр.доп.мощ}} = k_{\text{и}} k_{\text{м}} P_n T, \quad (4)$$

где T – продолжительность рабочего времени отчетного периода с учетом даты ввода в эксплуатацию ЭО, ч; P_n – номинальная активная мощность ЭО; $k_{\text{и}}$ – коэффициент использования нагрузки ЭО; $k_{\text{м}}$ – коэффициент использования установленной мощности.

По аналогичной формуле определяется снижение расхода электроэнергии в результате вывода из эксплуатации ЭО $W_{i\text{пр.вывод.мощ}}$.

В случае изменения режимов работы ЭО изменение расхода электроэнергии определяется по выражению:

$$\Delta W = P_n (k_{\text{и}}^{\text{отч}} k_{\text{м}}^{\text{отч}} T^{\text{отч}} - k_{\text{и}}^{\text{баз}} k_{\text{м}}^{\text{баз}} T^{\text{баз}}), \quad (5)$$

где $k_{\text{и}}^{\text{отч}}, k_{\text{м}}^{\text{отч}}, k_{\text{и}}^{\text{баз}}, k_{\text{м}}^{\text{баз}}$ – коэффициенты использования нагрузки и установленной мощности в отчетном и базовом периодах соответственно; $T^{\text{отч}}, T^{\text{баз}}$ – продолжительность рабочего времени отчетного и базового периодов с учетом даты изменения режимов работы ЭО, ч.

Представлены результаты апробации разработанной методики и электронного приложения к ней на примере производственных процессов потребителей распределительной подстанции (РП) Депо Свердловской ЖД и поста ЭЦ Сыропятское Западно-Сибирской ЖД (рисунок 5).

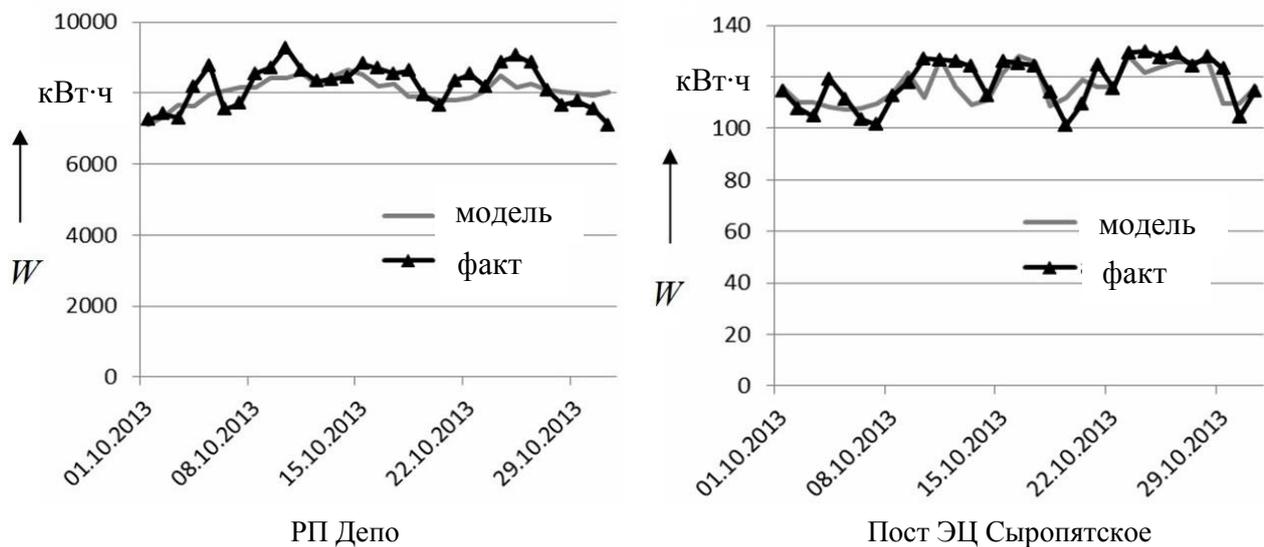


Рисунок 5 – Динамика фактического и прогнозного расхода электроэнергии для производственных процессов на железнодорожном транспорте

Результаты испытаний показывают, что средняя относительная погрешность для посуточного планирования расхода электроэнергии составила для РП Депо

6,58 %, а для поста ЭЦ Сыропятское – 4,51 %, а в целом за месяц расхождение между планируемым и фактическим электропотреблением составило для указанных объектов 1,83 и 1,29 % соответственно, что является удовлетворительным результатом и позволяет рекомендовать предложенные методы для внедрения на сети железных дорог.

Обоснованный потенциал экономии ТЭР в планируемом периоде за счет реализации ОМ оценивается анализом следующих составляющих: временные тенденции изменения заданий по экономии ТЭР для филиала, потенциал экономии ТЭР, достигаемый в результате реализации ОТМ, разработанных по итогам последнего энергетического обследования филиала.

Для анализа временных тенденций изменения заданий по экономии ТЭР i -го вида для филиала формируется выборка из значений $\mathcal{E}_i^{\text{OM}}$ за предшествующие планируемому периоды. Затем проверяется корректность полученной выборки для выявления наличия грубых погрешностей (промахов) с применением метода Боллинджера. Для этого рассчитываются среднее арифметическое значение $\overline{\mathcal{E}_i^{\text{OM}}}$ и среднее квадратическое отклонение (СКО) выборки σ_i .

Вычисляется расхождение между фактическим значением выборки и трендовым значением для каждого второго и последующих значений $\mathcal{E}_{it}^{\text{OM}}$:

$$\Delta_{it} = \left| \mathcal{E}_{it}^{\text{OM}} - \mathcal{E}_{i1}^{\text{OM}} T_{\text{icp}[1;n]}^{t-1} \right|, \quad (6)$$

где $\mathcal{E}_{i1}^{\text{OM}}$ – первое значение выборки; $T_{\text{icp}[1;n]}$ – среднегодовой темп изменения заданий по экономии ТЭР i -го вида за период $t = [1; n]$:

$$T_{\text{icp}[1;n]} = \sqrt[n-1]{\frac{\mathcal{E}_{in}^{\text{OM}}}{\mathcal{E}_{i1}^{\text{OM}}}}. \quad (7)$$

Если выполняется неравенство:

$$\Delta_{it} > 2\sigma_i, \quad (8)$$

то значение $\mathcal{E}_{it}^{\text{OM}}$ является промахом.

В этом случае его заменяют трендовым значением:

$$\mathcal{E}_{it}^{\text{OM}} = \mathcal{E}_{i1}^{\text{OM}} T_{\text{icp}[1;n]}^{t-1}. \quad (9)$$

Последнее значение, соответствующее базовому периоду, не проверяется на промахи и корректировки.

По внешнему виду временной тенденции изменения заданий по экономии ТЭР определяется возможная аппроксимирующая функция $\mathcal{E}_i^{\text{OM}} = f(t)$: степенная, логарифмическая или экспоненциальная. Выбор аппроксимирующего выражения определяется наибольшим значением индекса детерминации.

Основным исходным параметром для анализа потенциала экономии ТЭР, определяемого по результатам энергетического обследования, является показатель $\mathcal{E}_i^{\text{ЭО}}$, который определяется как суммарное значение экономии ТЭР i -го вида, достигаемой в результате внедрения организационных и малозатратных мероприятий, разработанных организацией-энергоаудитором, за предшествующие планируемому временные периоды.

Расчетное значение потенциала экономии ТЭР i -го вида, определяемого по результатам энергетического обследования, за первый год базового периода ($t = 1$) определяется по выражению:

$$\mathcal{E}_{i1}^{\text{ЭО}} = \frac{\mathcal{E}_i^{\text{ЭО}}}{\sum_{j=0}^{n-1} (T_{\text{icp}[1;n]})^j}. \quad (10)$$

Расчетное значение потенциала экономии ТЭР i -го вида, определяемого по результатам энергетического обследования, за периоды $t = 2, 3 \dots n$ определяется по выражению:

$$\mathcal{E}_{it}^{\text{ЭО}} = T_{\text{icp}[1;n]} \cdot \mathcal{E}_{i(t-1)}^{\text{ЭО}}, \quad (11)$$

где $\mathcal{E}_{i(t-1)}^{\text{ЭО}}$ – расчетное значение потенциала экономии ТЭР i -го вида, определяемого по результатам энергетического обследования, за период $t-1$.

На основе выборки из значений $\mathcal{E}_i^{\text{ЭО}}$ определяется аппроксимирующая функция $\mathcal{E}_i^{\text{ЭО}} = f(t)$, тип которой должен совпадать с функцией $\mathcal{E}_i^{\text{ОМ}} = f(t)$.

Определяются плановые значения $\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ОМ}}$ и $\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}}$ подстановкой в аппроксимирующие функции $\mathcal{E}_i^{\text{ОМ}} = f(t)$ и $\mathcal{E}_i^{\text{ЭО}} = f(t)$ значения t , соответствующего планируемому периоду ($t = n + 1$).

Плановое значение потенциала экономии ТЭР $\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ОМ потенциал}}$ на расчетный период следует выбирать из диапазона $[\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}}; \mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ОМ}}]$. Наиболее целесообразно определять его как среднее арифметическое границ указанного диапазона с учетом корректирующего коэффициента $k_{\text{корр}}$:

$$\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ОМ.потенциал}} = k_{\text{корр}} \cdot \frac{\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}} + \mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ОМ}}}{2}. \quad (12)$$

$$\frac{2 \cdot \min(\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}}, \mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ОМ}})}{\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}} + \mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ОМ}}} \leq k_{\text{корр}} \leq \frac{2 \cdot \max(\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}}, \mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ОМ}})}{\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}} + \mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ОМ}}}. \quad (13)$$

В случае ожидаемого ввода в эксплуатации дополнительных мощностей или вывода мощностей из эксплуатации, а также при наличии документально под-

твержденного дополнительного потенциала экономии ТЭР $\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{пров.}}$, рассчитывается скорректированный потенциал экономии ТЭР на расчетный период:

$$\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ОМ.потенциал.к.к.рр}} = \mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ОМ.потенциал}} \cdot \left(1 + \frac{W_i^{\text{доп.мощн'}} - W_i^{\text{вывод.мощн'}}}{W_i^{9\text{мес. текущ.факт}} + W_i^{4\text{кв. текущ.план}}} \right) + \mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{пров.}} \quad (14)$$

Для автоматизации расчетов обоснованного потенциала экономии ТЭР за счет реализации ОМ разработано электронное приложение, с применением которого на основе выражений (6)–(14) определены расчетные значения потенциала экономии ТЭР в производственных процессах Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом (ЦМ) на 2018 г. Результаты анализа сходимости расчетных и фактических значений экономии приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты анализа сходимости расчетных значений потенциала экономии ТЭР с фактически достигнутыми значениями для ЦМ на 2018 г.

Вид ТЭР	Расчетное значение потенциала экономии ТЭР согласно предлагаемому методу			Фактически достигнутая экономия	± расчет к факту, %
	по тренду ОМ	по тренду ЭО	итого		
Электроэнергия, млн кВт·ч	2,591	0,907	1,799	1,880	–4,29
Дизельное топливо, тыс. т	0,272	0,066	0,221	0,222	–0,17
Бензин, тыс. т	0,008	0,008	0,008	0,008	4,49
Мазут, тыс. т	0,002	0,002	0,002	0,002	–4,81
Природный газ, тыс. м ³	51,851	8,583	20,850	20,000	4,25
Тепловая энергия, тыс. Гкал	1,052	0,583	0,589	0,580	1,57
Уголь, тыс. т	0,119	0,144	0,125	0,128	–2,31

Расхождение между расчетными значениями потенциала экономии ТЭР и фактически достигнутыми значениями не превышают 5 %.

В пятой главе приведены результаты исследования научных и методологических принципов оценки эффективности организационных, технических и технологических решений, используемых при организации ресурсосберегающих производственных систем железнодорожного транспорта.

Наибольшая проблема, снижающая эффективность функционирования действующей системы, – отсутствие единого подхода к оценке энергетической эффективности внедряемых на железнодорожном транспорте ресурсосберегающих ОТМ.

Как правило, расчеты выполнялись без приведения условий базового периода (до внедрения мероприятия) к отчетному (после внедрения мероприятия), что приводило к значительным погрешностям из-за неучета изменений климатических и производственных факторов, не позволяло объективно оценивать результатив-

ность внедрения организационных, технических и технологических решений и давать обоснованные рекомендации по их дальнейшему тиражированию.

Принципы предлагаемого методологического подхода при оценке энергетической эффективности мероприятий основаны на сравнении фактического расхода ТЭР за отчетный период (после внедрения ресурсосберегающего мероприятия) и базового расхода ТЭР (до внедрения мероприятия), приведенного к условиям отчетного периода за счет корректировки. Для оценки энергетической эффективности внедряемых ресурсосберегающих ОТМ разработан алгоритм (рисунок 6).

Выполнена классификация энергосберегающих решений в зависимости от метода оценки энергоэффективности, которая позволила разделить внедряемые мероприятия на четыре группы.

К первой группе относятся ОТМ, для которых фактическая экономия энергоресурсов определяется как разница между энергопотреблением в базовом и отчетном периодах. Этот способ не учитывает влияние производственных факторов на объем электропотребления. Поэтому он может применяться только для мероприятий, для которых выполняются следующие условия: 1) возможна изоляция производственного процесса, в котором внедряется мероприятие, и установка индивидуального прибора учета ТЭР, позволяющего достоверно определить расход энергоресурсов в базовом и отчетном периодах; 2) расход ТЭР в рассматриваемом производственном процессе не зависит от влияющих производственных факторов.

Ко второй группе относятся ОТМ, для которых сопоставляются удельные расходы ТЭР в расчете на единицу производственной деятельности до и после внедрения ресурсосберегающего устройства. В этом случае корректировка производится за счет оценки объема производственной деятельности. Как и для предыдущей группы мероприятий необходимы изоляция производственного процесса и наличие индивидуального прибора учета ТЭР. Также принимается допущение о линейном характере зависимости расхода ТЭР от объема производственной деятельности и отсутствии условно-постоянной составляющей расхода ТЭР.

К третьей группе относятся ОТМ, энергетическая эффективность которых зависит от множества факторов, связанных как с характеристиками производственного процесса, так и с климатическими показателями. При этом нельзя изолировать зону внедрения ресурсосберегающего мероприятия. Особенность заключается в том, что ожидаемый эффект от реализации мероприятия должен быть выше случайных колебаний расхода ТЭР. Поэтому в алгоритм вводится блок сравнения ожидаемого эффекта со средним квадратическим отклонением выборки.

Данный метод предполагает разработку математических моделей процесса использования ТЭР за базовый период.

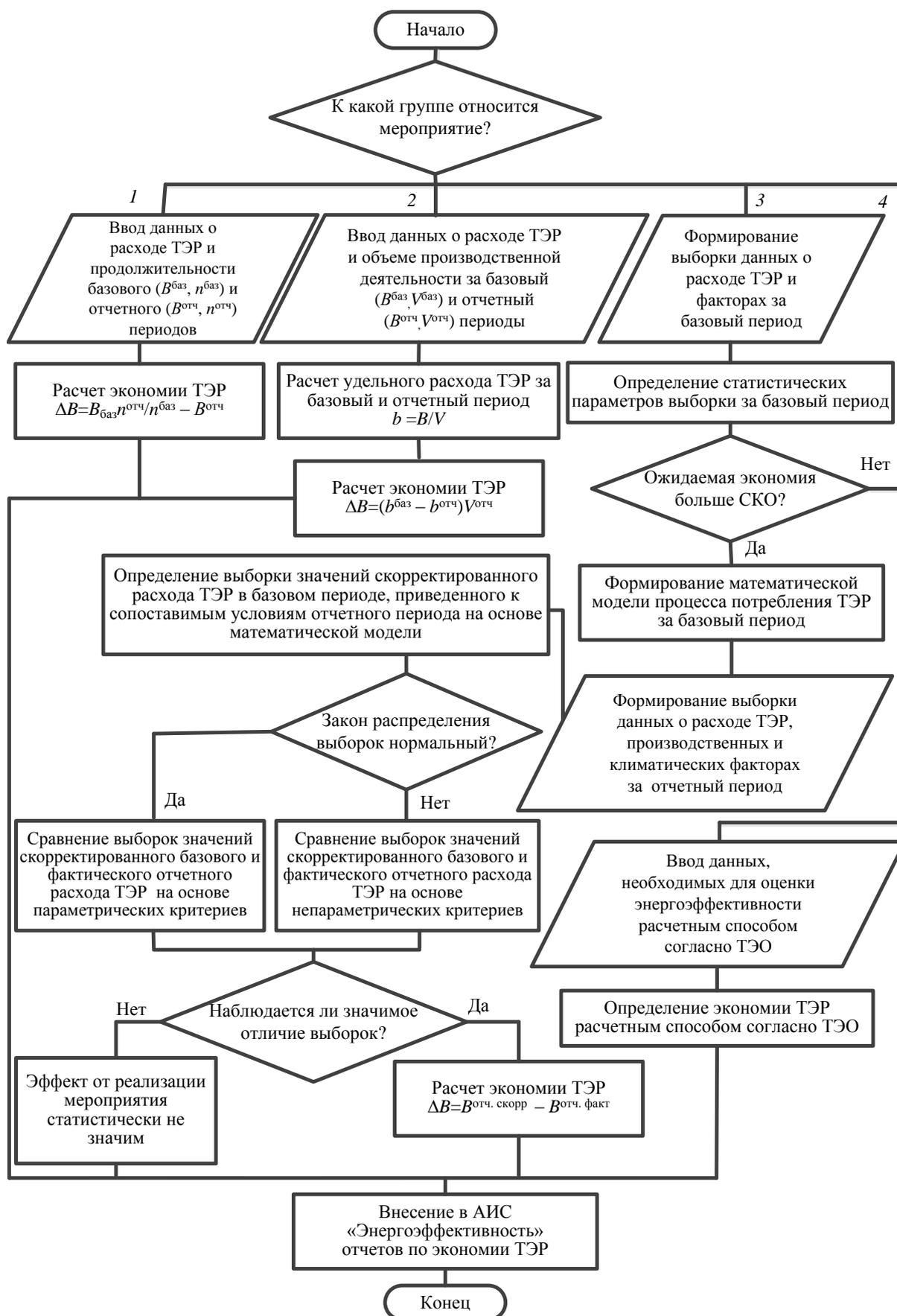


Рисунок 6 – Алгоритм оценки энергетической эффективности ресурсосберегающих ОТМ, внедряемых на железнодорожном транспорте

В ходе реализации этого метода происходит сбор данных за базовый период о расходе ТЭР и влияющих факторах, выполняется анализ влияния принятых к рассмотрению факторов на объем потребления ТЭР и формирование математической модели использования ТЭР в производственных процессах, данные о расходе ТЭР за базовый период приводятся к сопоставимым условиям отчетного периода с использованием математической модели.

Отличительная особенность метода: статистическая значимость достигнутой в производственных процессах экономии энергоресурсов оценивается с учетом законов распределения выборок энергопотребления.

Результаты исследования показали, что для перевозочного процесса закон распределения расхода ТЭР близок к нормальному, однако для неперевозочных видов деятельности возможны иные варианты, в частности, равномерный и лог-нормальный законы.

В случае, если гипотеза о нормальном законе распределения не подтверждается, для сравнения выборок значений скорректированного и фактического расходов ТЭР целесообразно применять непараметрические методы математической статистики: критерии Крамера – Уэлча, Вилкоксона и Лемана – Розенблатта. В случае, если закон распределения выборок является нормальным, то целесообразно применять критерий Стьюдента для сравнения выборочных средних и критерий Фишера.

Если наблюдаемые значения оказываются больше критических, то принимается гипотеза о различии рассматриваемых выборок, следовательно, внедрение ресурсосберегающего решения привело к экономии ТЭР. В противоположном случае эффект от реализации мероприятия статистически не значим.

К четвертой группе относятся ОТМ, для которых отсутствует возможность изоляции зоны внедрения, нет достоверных данных о расходе ТЭР за базовый период или их затруднительно получить, или ожидаемый эффект от реализации мероприятия сопоставим со случайными колебаниями расхода ТЭР. В этом случае эффект определяется расчетным способом исходя из физического принципа действия данного ОТМ или согласно ТЭО на данное мероприятие.

Представлены результаты проверки оценки эффективности организационных, технических и технологических решений, используемых при организации ресурсосберегающих производственных систем железнодорожного транспорта, на примере производственного процесса потребителей РП Депо Свердловской ЖД. По предложенной классификации внедряемое энергосберегающее мероприятие относится к третьей группе.

Выполнена декомпозиция объекта внедрения на пять составляющих, для которых сформированы математические модели на основе ИНС. Результаты сравне-

ния фактического и смоделированного расхода электроэнергии показали наличие экономии электроэнергии (3,9 %), однако сравнение выборок по критерию Стьюдента показало, что наблюдаемое значение (2,57) оказалось меньше критического (2,71), следовательно, эффект от реализации мероприятия статистически незначим.

Результаты оценки энергетической эффективности позволили подготовить заключение о дальнейшей нецелесообразности внедрения рассматриваемого энергосберегающего мероприятия.

Положительные результаты использования предлагаемых методов подтверждены актами об использовании результатов научных исследований и разработок в производстве.

В шестой главе разработаны составляющие стратегии развития железнодорожного транспорта как ресурсосберегающей производственной системы. Предложено формирование системы ключевых показателей эффективности (КПЭ) холдинга «РЖД» для трех сценариев (консервативный, базовый, оптимистичный) по шести основным направлениям развития холдинга: повышение энергоэффективности перевозочного процесса, развитие комплекса тепловодоснабжения и водоотведения, развитие электросетевого комплекса, развитие инфраструктурного комплекса, зданий и сооружений, нетяговой энергетики, развитие энергохозяйства дочерних и зависимых обществ, общее направление развития холдинга. Прогнозирование значений КПЭ₁, КПЭ₂, КПЭ₁₉ – КПЭ₂₄ выполнено с применением разработанных математических моделей.

Представлен порядок расчета прогнозных значений ключевых показателей на примере КПЭ₁ «Удельный расход электрической энергии на тягу поездов, кВт·ч/10⁴ т·км брутто» на период до 2030 года.

На первом этапе на основе имеющейся информации о прогнозных значениях грузо- и пассажирооборота для базового, консервативного и оптимистичного сценариев разработана регрессионная модель (коэффициент корреляции 0,98), позволяющая определить плановое значение перевозочной работы на электротяге:

$$A_{эл} = -441768 + 1611 \sum PL_{прив}, \quad (15)$$

где $\sum PL_{прив}$ – приведенная работа ОАО «РЖД».

На втором этапе из 17-ти принятых к рассмотрению влияющих факторов отобраны факторы, оказывающие наибольшее влияние на удельные энергозатраты на тягу поездов и подлежащие прогнозу на долгосрочный период: объем перевозочной работы на электротяге (X_1), эксплуатационная длина электрифицированных линий (X_2), средняя масса поезда (X_3), среднесуточная производительность локомотива (X_4), средняя участковая скорость (X_5), доля грузооборота в общей приведенной работе (X_6).

На третьем этапе сформированы модели электропотребления. Для прогнозирования удельного расхода электроэнергии на тягу поездов на период до 2030 г. использованы плановые значения объема перевозочной работы и иных принятых к рассмотрению факторов в соответствии с основными стратегическими документами в области железнодорожного транспорта. В результате получены значения прогнозные значения для КПЭ₁. Аналогичные подходы применялись для прогнозирования КПЭ₂, КПЭ₁₉ – КПЭ₂₄.

Выполнена верификация основных производственных показателей и связанных с ними ключевых показателей энергоэффективности ОАО «РЖД» по итогам 2016–2018 гг., результаты которой показывают, что расхождение «права» к факту для удельного расхода электроэнергии на тягу поездов не превысило 0,28 %, для удельного расхода дизельного топлива на тягу поездов – 1,29 %.

Погрешность прогнозирования основного показателя энергоэффективности ОАО «РЖД» – энергоемкости производственной деятельности не превысила 0,45 %. Полученные результаты позволяют говорить о достаточной эффективности применяемых математических моделей.

В седьмой главе приведены результаты разработки усовершенствованных методов и средств мониторинга использования ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте.

Разработана принципиальная схема автоматизированной системы контроля и управления электропотреблением в производственных процессах на железнодорожном транспорте (рисунок 7).

Выборка данных о расходе электроэнергии формируется автоматически путем синхронизации блока 2 с прибором учета электроэнергии, о климатических факторах и объеме производственной деятельности формируется оператором. Информация о режимах работы электрооборудования формируется за счет применения разработанного устройства учета времени наработки электрооборудования (рисунок 8), ключевым элементом которого служит датчик переменного магнитного поля 8. По итогам исследования датчиков различных типов (датчики Холла аналоговые и цифровые, биполярные и униполярные, индуктивные датчики) на лабораторной станции NI ELVIS II для дальнейшего применения в качестве датчика переменного магнитного поля выбран индуктивный аналоговый.

Разработан алгоритм функционирования предлагаемой системы, реализованный в виде «Программного комплекса для контроля энергетической эффективности потребителей электрической энергии» (свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2017660179).

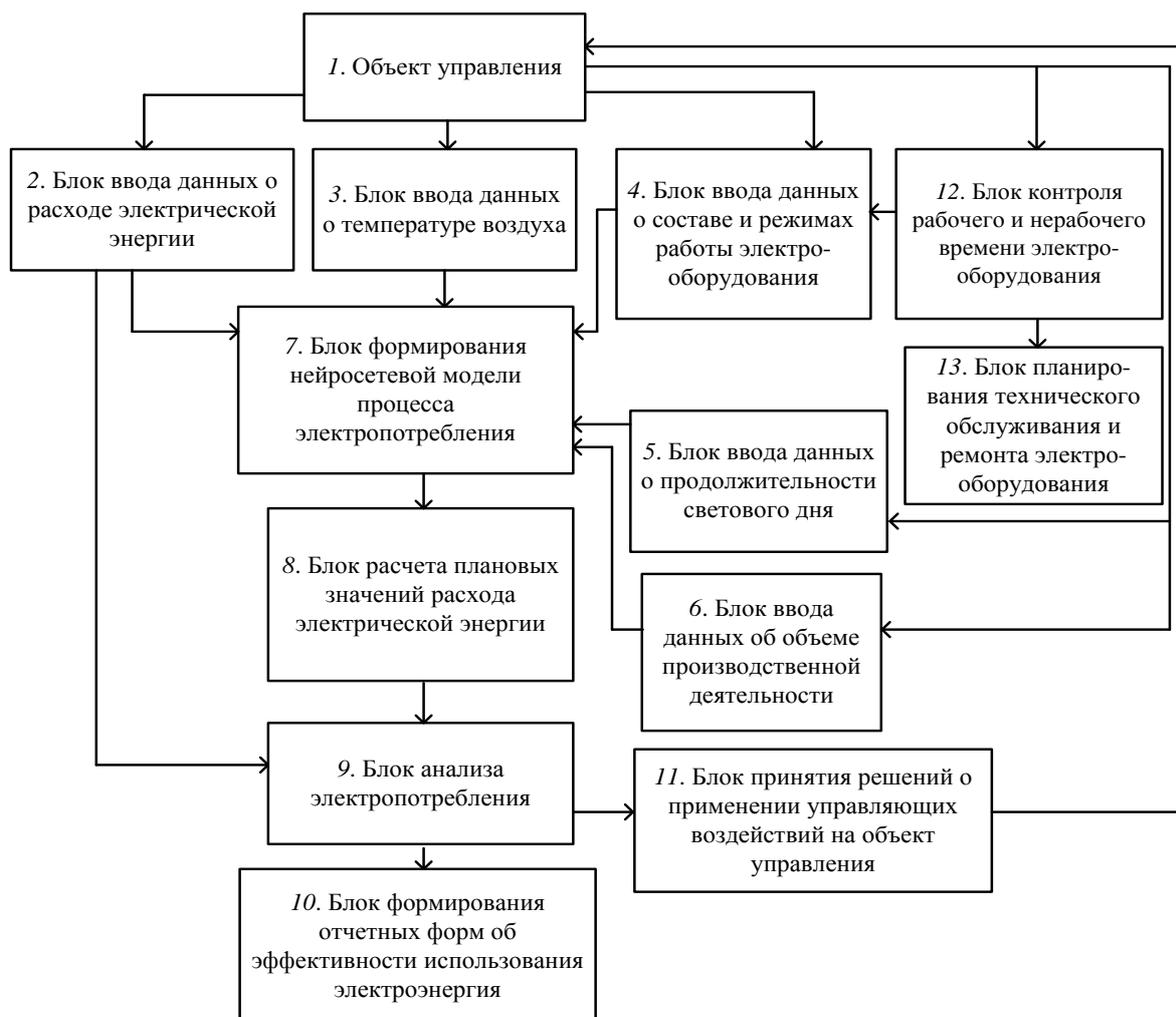


Рисунок 7 – Автоматизированная система контроля и управления электропотреблением в производственных процессах на железнодорожном транспорте (патент №183468)

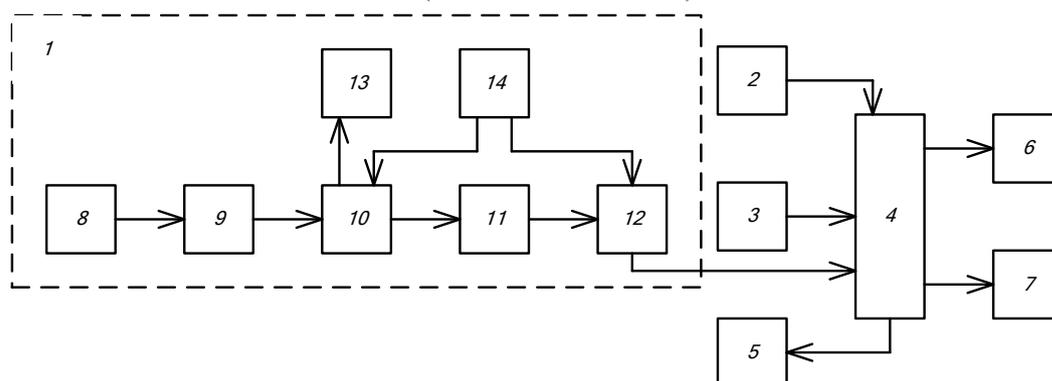


Рисунок 8 – Устройство учета времени наработки электрооборудования (патент № 179019)
 1 – блок измерений; 2 – часы реального времени; 3 – блок управления;
 4 – микроконтроллер; 5 – блок индикации; 6 – запоминающее устройство; 7 – блок вывода информации; 8 – датчик переменного магнитного поля; 9 – блок усиления и фильтрации; 10 – компаратор; 11 – детектор переменного напряжения; 12 – блок сравнения; 13 – световой индикатор; 14 – источник опорного напряжения

Возможны два варианта технической реализации разработанной системы: 1) стационарный вариант, предусматривающий монтаж устройства в наиболее энергоемких цехах и производственных участках СП с реализацией непрерывного мониторинга показателей энергоэффективности согласно представленному алгоритму; 2) переносной вариант, когда устройство применяют специалисты, ответственные за энергосбережение, или сторонняя организация-энергоаудитор для периодического контроля показателей энергоэффективности в наиболее проблемных (или энергоемких) цехах, производственных участках или зданиях в границах СП.

Опытное применение автоматизированной системы контроля и управления электропотреблением как устройства для мониторинга показателей энергетической эффективности выполнено для производственного процесса компрессорной станции СЛД Московка в ходе энергетического обследования. Экспериментальные исследования позволили получить график работы компрессоров в привязке к графику потребления мощности электрооборудования.

На основании зависимостей между этими показателями с применением предложенного программного комплекса разработана математическая модель процесса электропотребления оборудования компрессорной СЛД Московка. В качестве математического аппарата использовалась ННС с комбинацией функций принадлежности на входе 2-3-3-2. При такой структуре математической модели процесса электропотребления компрессорной средняя квадратическая ошибка $RMSE_{\Delta}$ составила 84 кВт·ч, средняя относительная погрешность $MAPE$ – 7,1 %. На основе этой модели выполнен анализ энергетической эффективности работы оборудования компрессорной СЛД с применением зарегистрированной программы для ЭВМ. Получено, что за рассматриваемый период снизилось потребление электроэнергии на $\Delta\mathcal{E} = 21$ кВт·ч. Так как $RMSE_{\Delta} > |\Delta\mathcal{E}|$, то нет основания говорить об изменении энергоэффективности производственного процесса.

Таким образом, опытная проверка доказала возможность использования предлагаемых запатентованных технических решений и компьютерной программы для мониторинга использования ТЭР, режимов работы электрооборудования и показателей энергоэффективности производственных процессов, что подтверждается актом об использовании результатов научных исследований и разработок в производстве.

Испытание переносного варианта предлагаемой системы для периодического контроля показателей энергоэффективности выполнено при исследовании показателей энергоэффективности производственного процесса в ПТОЛ Иртышское. По результатам проведенных исследований выявлены причины неэффективного режима работы компрессорной станции и предложены два варианта управляющих воздействий совместно с использованием предлагаемой системы: а) внедрение винтового компрессора с частотно-регулируемым приводом, что повысит энер-

гоэффективность ПТОЛ Иртышское на 23,8 % и б) монтаж двух устройств плавного пуска, что повысит энергоэффективность на 14 %.

По результатам технико-экономического сравнения максимально эффективным следует признать второй вариант, при котором ЧДД за 10 лет составит 4904,6 тыс. руб., а срок окупаемости – два года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационного исследования разработаны и усовершенствованы научные и методологические принципы организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте путем создания и применения методов и средств мониторинга, организационно-методологических и технических решений с использованием новых информационных технологий. В диссертации изложены новые научно обоснованные технические, организационные и методологические решения и разработки, направленные на повышение эффективности использования ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте. Их внедрение позволяет повысить эффективность функционирования и качество организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте.

1. По результатам анализа и систематизации действующих методов и средств эффективного использования ТЭР при организации производственных процессов сформулированы основные принципы предлагаемой методологии организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте: переход от методов управления процессом использования ТЭР от достигнутого уровня энергопотребления к методам, предполагающим разработку и применение математических моделей процесса энергопотребления, на следующих этапах: прогнозирование расхода ТЭР, оценка фактической эффективности ресурсосберегающих решений, разработка методов и средств мониторинга использования ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте, планирование заданий по экономии ТЭР, совершенствование организационной структуры управления процессами использования ТЭР на железнодорожном транспорте в части делегирования полномочий по разработке проектов заданий по экономии энергоресурсов с уровня центрального аппарата на уровень филиалов и линейных СП.

2. Выполнены классификация и корреляционный анализ факторов, влияющих на использование ТЭР при организации производственных процессов, предложена методология отбора факторов, влияющих на расход ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте, по результатам проверки которой на действующих объектах железнодорожного транспорта для перевозочного процесса рекомендовано использовать метод «последовательный с исключением», а

для неперевозочных видов деятельности – «последовательный с включением», «последовательный с исключением» и метод главных компонент.

3. Теоретически обоснована и разработана методология повышения эффективности функционирования производственных систем на железнодорожном транспорте на основе статистических подходов с применением теории машинного обучения. Установлено, что модели использования ТЭР, основанные на применении искусственных нейронных сетей, нечетких нейронных сетей, метода опорных векторов, демонстрируют существенно лучшие показатели точности, чем множественная регрессия, особенно для неперевозочных видов деятельности, при этом средняя относительная погрешность уменьшается в 1,29–1,92 раза, что позволяет рекомендовать эти модели для использования при организации ресурсосберегающих производственных систем.

4. Предложены методы и средства эффективного нормирования и прогнозирования ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте на основе применения новых информационных технологий. Для расчета прогнозных значений расхода ТЭР разработаны «Методика планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды с использованием искусственных нейронных сетей» и программный комплекс. Определение обоснованного потенциала экономии ТЭР за счет реализации организационных мероприятий осуществляется в соответствии с разработанным и утвержденным в ОАО «РЖД» «Порядком формирования заданий филиалам ОАО «РЖД» по экономии топливно-энергетических ресурсов на нетяговые нужды». Проверка предложенных организационных решений на объектах Свердловской и Западно-Сибирской ЖД, а также Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом показывает, что расхождение между планируемым и фактическим значением расхода ТЭР не превысило 5 %, что позволяет говорить об их достаточной эффективности.

5. Предложены научные и методологические принципы оценки эффективности организационных, технических и технологических решений, используемых при организации ресурсосберегающих производственных систем железнодорожного транспорта. Разработаны уточненная классификация ресурсосберегающих мероприятий и усовершенствованный алгоритм оценки энергоэффективности, предполагающие приведение расхода энергоресурсов в базовом периоде к отчетному за счет корректировок и оценку статистической значимости достигнутой в производственных процессах экономии энергоресурсов с учетом законов распределения выборок энергопотребления. На основе предлагаемых подходов разработана и внедрена «Унифицированная методика по расчету экономии топливно-энергетических ресурсов от реализации мероприятий программ энергосбережения

и повышения энергетической эффективности структурных подразделений ОАО «РЖД».

6. Предложены составляющие стратегии развития железнодорожного транспорта как ресурсосберегающей производственной системы, которые использованы при разработке действующей «Энергетической стратегии холдинга «РЖД» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года». Верификация прогнозируемых показателей за 2016–2018 гг. показала, что их значения находятся в пределах прогнозного диапазона с погрешностями, не превышающими 1,29 %, что позволяет говорить о достаточной эффективности применяемых методов.

7. Разработаны усовершенствованные методы и средства мониторинга использования ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте, которые включают в себя автоматизированную систему контроля и управления электропотреблением производственных процессов на железнодорожном транспорте, устройство учета времени наработки электрооборудования и программный комплекс для контроля энергетической эффективности потребителей электрической энергии. Испытание предложенных запатентованных технических решений и программы для ЭВМ при исследовании производственных процессов на действующих объектах железнодорожного транспорта доказало возможность их использования для мониторинга расхода электроэнергии, режимов работы электрооборудования и показателей энергоэффективности, выявления нерационального использования энергоресурсов. Выполнена оценка экономического эффекта от применения предлагаемых решений на примере ПТОЛ Иртышское, в соответствии с которой ЧДД за десять лет составит 4904,6 тыс. руб., срок окупаемости – два года, что позволило повысить энергетическую эффективность производственного процесса в ПТОЛ Иртышское на 14 %.

В качестве рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации можно отметить следующие направления: развитие и интеграция предложенных научно-организационных и технических решений для анализа, планирования, мониторинга и управления процессами энергопотребления с существующими информационно-измерительными системами учета расхода ТЭР на железнодорожном транспорте, развитие методов и средств информатизации и компьютеризации производственных процессов; научные исследования в области развития систем управления производственными процессами использования ТЭР на железнодорожном транспорте на основе концепции «умных сетей» и «умных предприятий»; совершенствование методов идентификации работы энергопотребляющего оборудования в производственных процессах на основе теории информации и анализа переходных процессов в электрических сетях; разработка и реализация принципов производственного менеджмента в области организации ре-

сурсосберегающих производственных систем, в том числе проблемы кадрового обеспечения для реализации программ энергосбережения и повышения эффективности существующих форм организации труда.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

Монографии

1. Черемисин, В. Т. Совершенствование системы контроля и анализа расхода электрической энергии нетяговыми железнодорожными потребителями [Текст] : монография / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, Д. В. Пашков, **А. А. Комяков**. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 94 с.

2. Черемисин, В. Т. Моделирование процессов электропотребления в системе нетягового электроснабжения железнодорожного транспорта [Текст] : Научная монография / В. Т. Черемисин, **А. А. Комяков**. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2017. – 161 с.

Статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК:

3. **Комяков, А. А.** Применение искусственных нейронных сетей для планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды структурных подразделений железных дорог [Текст] / **А. А. Комяков**, А. В. Пономарев, О. А. Комякова // Известия Транссиба. – 2011. – № 1(5). – С. 63–67.

4. **Комяков, А. А.** Разработка программного алгоритма прогнозирования расхода электрической энергии нетяговых железнодорожных потребителей на основе искусственных нейронных сетей [Текст] / **А. А. Комяков**, О. А. Коломоец, А. В. Пономарев // Известия Транссиба. – 2013. – № 3(15). – С. 96–103.

5. Черемисин, В. Т. Планирование расхода электрической энергии с применением ИНС [Текст] / В. Т. Черемисин, **А. А. Комяков**, О. А. Коломоец // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 11. – С. 56–58.

6. **Комяков, А. А.** Математические методы анализа и контроля расхода электрической энергии предприятиями железнодорожного транспорта на основе нейросетевых моделей [Текст] / В. Т. Черемисин, **А. А. Комяков**, О. А. Коломоец // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 2. – С. 268–271.

7. **Комяков, А. А.** О подходах к оценке фактической экономии энергетических ресурсов, достигаемой при реализации энергосервисных договоров [Текст] / **А. А. Комяков**, М. М. Никифоров, В. В. Эрбес // Известия Транссиба. – 2014. – № 2(18). – С. 106–114.

8. Гателюк, О. В. Апробация алгоритма оценки эффективности энергосберегающих устройств и технологий в системе тягового электроснабжения [Текст] / О. В. Гателюк, **А. А. Комяков**, В. В. Эрбес // Известия Транссиба. – 2014.

– № 4(20). – С. 79–85.

9. Гателюк, О. В. Сравнительный анализ структур нечеткой нейронной сети для формирования модели электропотребления в системе тягового электроснабжения [Текст] / О. В. Гателюк, **А. А. Комяков**, В. В. Эрбес // Известия Транссиба. – 2015. – № 2(22). – С. 64–71.

10. Каштанов, А. Л. Современные подходы к оценке фактической экономии электроэнергии в системе тягового электроснабжения на основе искусственных нейронных сетей и нечетких нейронных сетей [Текст] / А. Л. Каштанов, **А. А. Комяков**, Д. О. Силуянов, В. В. Эрбес // Вестник РГУПС. – 2015. – № 2. – С. 63–67.

11. Черемисин, В. Т. О комплексном подходе к анализу и контролю энергетической эффективности структурных подразделений железнодорожного транспорта [Текст] / В. Т. Черемисин, **А. А. Комяков**, В. И. Иванченко // Известия Транссиба. – 2016. – № 2 (26). – С. 134–142.

12. Черемисин, В. Т. Математическое моделирование процесса электропотребления на тягу поездов с применением метода опорных векторов [Текст] / В. Т. Черемисин, **А. А. Комяков**, В. И. Иванченко // Омский научный вестник. – 2016. – № 6 (150). – С. 77–81.

13. **Комяков, А. А.** Разработка интеллектуальной системы контроля энергетической эффективности эксплуатации электрооборудования предприятий [Текст] / **А. А. Комяков**, В. В. Эрбес, В. И. Иванченко, Ю. В. Плотников // Омский научный вестник. – 2018. – № 157. – С. 54–58.

14. **Комяков, А. А.** Разработка программного комплекса для определения эффективности энергосберегающих устройств и технологий в производственном процессе предприятия [Текст] / **А. А. Комяков**, А. В. Пономарев, В. В. Эрбес // Омский научный вестник. – 2018. – № 3 (159). – С. 31–36.

15. **Комяков, А. А.** Разработка технологии повышения энергетической эффективности производственных процессов в сервисных локомотивных депо [Текст] / **А. А. Комяков**, А. В. Пономарев, В. В. Эрбес // Известия Транссиба. – 2018. – № 2(34). – С. 76 – 85.

16. Каштанов, А. Л. Совершенствование порядка формирования заданий по экономии топливно-энергетических ресурсов на нетяговые нужды [Текст] / А. Л. Каштанов, **А. А. Комяков**, М. М. Никифоров // Вестник УрГУПС. – 2018. – № 4(40). – С. 77 – 84.

17. Каштанов, А. Л. Планирование заданий по экономии энергоресурсов на нетяговые нужды железнодорожного транспорта на основе аппроксимации временных рядов [Текст] / А. Л. Каштанов, **А. А. Комяков**, М. М. Никифоров // Вестник РГУПС. – 2019. – № 1(73). – С. 106 – 111.

18. **Комяков, А. А.** Разработка методов оценки эффективности мероприятий по организации ресурсосберегающих производственных систем железнодорожного транспорта [Текст] / **А. А. Комяков** // Вестник РГУПС. – 2020. – № 2. – С. 8–14.

19. **Комяков, А. А.** Методология организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте [Текст] / **А. А. Комяков** // Известия Самарского научного центра РАН. – 2020. – Т. 22. – № 2. – С. 16–24.

20. **Комяков, А. А.** Нормирование и прогнозирование расхода топливно-энергетических ресурсов в производственных процессах на железнодорожном транспорте с использованием информационных технологий [Текст] / **А. А. Комяков** // Вестник УрГУПС. – 2020. – № 2(46). – С. 35–44.

Статьи в изданиях, включенных в международные системы цитирования Web of Science и SCOPUS

21. Cheremisin, V. T. Nonparametric statistical approach to evaluating the effectiveness of energy-saving devices [Text] / V. T. Cheremisin, V. V. Erbes, **А. А. Кomyakov** // Environment and Electrical Engineering (EEEIC) : 14th International Conference, Krakow, 10-12 May 2014. – Pp. 5–60.

22. **Кomyakov, А. А.** Application of artificial neural networks for electric load forecasting on railway transport [Text] / **А. А. Кomyakov**, V. V. Erbes, V. I. Ivanchenko // Environment and Electrical Engineering (EEEIC) : 15th International Conference, Rome, 10-13 June 2015. – Pp. 43–46.

23. **Кomyakov, А. А.** Construction of electricity consumption mathematical models on railway transport used artificial neural network and fuzzy neural network [Text] / **А. А. Кomyakov**, M. M. Nikiforov, V. V. Erbes etc. // Environment and Electrical Engineering (EEEIC) : 16th International Conference, Florence, 7-10 June 2016. – Pp. 1–4.

24. Cheremisin, V. T. Evaluation of the Actual Effectiveness of Energy-Saving Devices based on Artificial Intelligence [Text] / V. T. Cheremisin, V. V. Erbes, **А. А. Кomyakov** // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) : 2nd International Conference, Chelyabinsk, 19-20 May 2016. – Pp. 1–4.

25. Cheremisin, V. T. Simulation of power consumption in railway power supply systems with of artificial intelligence aids [Text] / V. T. Cheremisin, V. V. Erbes, **А. А. Кomyakov** // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) : 3rd International Conference, St. Petersburg, 16-19 May 2017. – Pp. 1–5.

26. Cheremisin, V. T. Development of Device for Monitoring of Energy Efficiency of Production Processes at Enterprises [Text] / V. T. Cheremisin, V. V. Erbes, **А. А. Кomyakov** // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) : 4th International Conference, Moscow, 15-18 May 2018. – Pp. 1–5.

27. **Кomyakov, А. А.** Application of an Intelligent System for the Monitoring of

Energy Efficiency Indicators at Service Locomotive Depots [Text] / **A. A. Комяков**, A. V. Ponomarev, V. V. Erbes / Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) : International Multi-Conference, Vladivostok, 3-4 Oct 2018. – Pp. 1–7.

28. Cheremisin, V. T. Technology for reducing the consumption and losses of electrical energy in the power supply systems of railway consumers [Text] / V. T. Cheremisin, Yu. V. Demin, **A. A. Комяков**, etc. // МАТЕС Web of Conferences, Vol. 239. – 2018. – Siberian Transport Forum – TransSiberia 2018. – Pp. 1–7.

Патенты и программы для ЭВМ

29. Программа для ЭВМ № 2012617381. Нейросетевое планирование расхода электрической энергии на железнодорожном транспорте / **A. A. Комяков**, A. В. Пономарев, О. А. Комякова. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16.08.2012.

30. Программа для ЭВМ № 2017660179. Программный комплекс для контроля энергетической эффективности потребителей электрической энергии / В. Т. Черемисин, **A. A. Комяков**, В. В. Эрбес, А. В. Пономарев, М. М. Никифоров. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.09.2017.

31. Пат. на полезную модель 151431 РФ. МПК G06Q10/06. Автоматизированная система контроля и управления электропотреблением предприятий / **A. A. Комяков**, А. В. Пономарев (РФ). – № 2014112917/08 ; Заявлено 02.04.2014 ; Оpubл. 10.04.2015. Бюл. №10.

32. Пат. на полезную модель 179019 РФ. МПК G01R 29/08, G01R 19/00, G07C 3/02. Устройство учета времени наработки электрооборудования / В. Т. Черемисин, **A. A. Комяков**, В. В. Эрбес, Ю. В. Плотников (РФ). – № 2017138802 ; Заявлено 07.11.2017 ; Оpubл. 25.04.2018. Бюл. №10.

33. Пат. на полезную модель 183468 РФ. МПК G06Q10/06. Автоматизированная система контроля и управления электропотреблением предприятий / В. Т. Черемисин, **A. A. Комяков**, А. В. Пономарев, В. В. Эрбес, Ю. В. Плотников, А. С. Окишев (РФ). – № 2017138800 ; Заявлено 07.11.2017 ; Оpubл. 24.09.2018.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в журналах из перечня ВАК в соавторстве, заключается в следующем: [3] – систематизация методов и средств эффективного использования ТЭР на железнодорожном транспорте, обоснование необходимости применения системы анализа, нормирования и прогнозирования расхода ТЭР на основе ИНС; [4] – разработка математического аппарата и формирование алгоритмов прогнозирования расхода ТЭР; [5] – разработка концепции формирования системы анализа и прогнозирования расхода ТЭР на основе

ИНС; [6] – построение эмпирических зависимостей расхода ТЭР от влияющих факторов, анализ влияния гиперпараметров ИНС на коэффициенты корреляции; [7] – анализ существующих подходов к оценке энергоэффективности ресурсосберегающих решений, формирование математических моделей и их апробация; [8] – разработка алгоритма оценки энергоэффективности ресурсосберегающих решений; [9] – разработка алгоритма выбора гиперпараметров ННС; [10] – сравнительный анализ моделей ННС и ИНС на примере действующего производственного процесса; [11] – формирование концепции оценки энергоэффективности производственных процессов, сбор исходных данных; [12] – формирование выборки исходных данных, оценка точности моделей SVM; [13] – разработка принципов предлагаемой системы контроля энергоэффективности производственных процессов, описание основных блоков; [14] – разработка алгоритма программы для мониторинга энергоэффективности производственного процесса; [15] – организация и проведение эксперимента по оценке энергоэффективности производственного процесса, анализ полученных результатов; [16] – разработка организационной структуры и математического аппарата для формирования заданий по экономии ТЭР в неперевозочных видах деятельности; [17] – анализ методов устранения промахов в выборках заданий по экономии ТЭР на железнодорожном транспорте.