

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Омский государственный университет путей сообщения»
(ОмГУПС (ОмИИТ))

На правах рукописи

КОМЯКОВ Александр Анатольевич

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

05.02.22 – Организация производства (транспорт)

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Черемисин Василий Титович

Омск – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
Глава 1 СИСТЕМАТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ	19
1.1 Анализ состояния потребления топливно-энергетических ресурсов и структуры управления процессом их эффективного использования при организации производственных процессов на железнодорожном транспорте	19
1.2 Анализ методов нормирования и прогнозирования расхода ТЭР, применяемых в производственных системах	29
1.3 Анализ подходов к организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте.....	43
Глава 2 НАУЧНЫЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА.....	68
2.1 Анализ влияния факторов на использование электроэнергии в перевозочном процессе.....	70
2.2 Анализ влияния факторов на использование электроэнергии в неперевозочных видах деятельности	79
2.3 Разработка методологии отбора факторов, влияющих на использование топливно-энергетических ресурсов в производственных процессах железнодорожного транспорта (на примере электроэнергии)	103
2.4 Основные результаты и выводы	128

Глава 3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ	130
3.1 Порядок формирования математической модели использования электрической энергии в производственных процессах с применением искусственных нейронных сетей.....	130
3.2 Порядок формирования математической модели использования электрической энергии в производственных процессах с применением нечетких нейронных сетей.....	141
3.3 Порядок формирования математической модели использования электрической энергии в производственных процессах с применением метода опорных векторов.....	148
3.4 Сравнение точности математических моделей, основанных на множественной регрессии и методах машинного обучения	152
3.5 Основные результаты и выводы	158
Глава 4 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	160
4.1 Совершенствование организационной структуры процесса нормирования и прогнозирования расхода топливно-энергетических ресурсов в производственных процессах на железнодорожном транспорте.....	161
4.2 Разработка методики прогнозирования расхода электроэнергии на нетяговые нужды с применением искусственных нейронных сетей.....	174
4.3 Разработка методики определения обоснованного потенциала экономики топливно-энергетических ресурсов за счет реализации организационных мероприятий.....	187
4.4 Основные результаты и выводы	211

Глава 5 НАУЧНЫЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА	213
5.1 Анализ и классификация организационных, технических и технологических решений, применяемых при организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте, и методов оценки их энергетической эффективности.....	217
5.2 Разработка усовершенствованных методов оценки энергетической эффективности организационных, технических и технологических решений, применяемых при организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте	225
5.3 Апробация методов оценки энергетической эффективности организационных, технических и технологических решений, применяемых при организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте	244
5.4 Основные результаты и выводы	255
Глава 6 РАЗРАБОТКА СОСТАВЛЯЮЩИХ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА КАК РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ.....	257
6.1 Анализ и прогнозирование ключевых показателей эффективности развития железнодорожного транспорта как ресурсосберегающей производственной системы.....	259
6.2 Верификация ключевых показателей эффективности развития железнодорожного транспорта как ресурсосберегающей производственной системы.....	277
6.3 Основные результаты и выводы	286

Глава 7 РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ	288
7.1 Обоснование необходимости создания системы мониторинга и управления показателями энергетической эффективности производственных процессов на железнодорожном транспорте.....	289
7.2 Разработка автоматизированной системы контроля и управления электропотреблением в производственных процессах на железнодорожном транспорте.....	295
7.3 Апробация автоматизированной системы контроля и управления электропотреблением в производственных процессах на железнодорожном транспорте.....	317
7.4 Расчет технико-экономической эффективности мероприятий по повышению энергетической эффективности	326
7.5 Основные результаты и выводы	334
Заключение	336
Список основных сокращений и условных обозначений.....	341
Список литературы	344
Приложение А	385
Приложение Б.....	394
Приложение В.....	395
Приложение Г	396
Приложение Д	398
Приложение Е.....	400
Приложение Ж.....	401
Приложение З	403
Приложение И	405

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Железнодорожный транспорт в России является крупным потребителем топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Среднегодовое потребление превышает 21 млн т у. т., что составляет 305,4 млрд руб. согласно бюджету ОАО «Российские железные дороги» на 2019 г. Доля затрат на ТЭР в общих эксплуатационных расходах ОАО «РЖД» остается стабильно высокой и составляет 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 является актуальной.

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.

Тем не менее, в существующей системе управления процессами эффективного использования ТЭР на железнодорожном транспорте имеется ряд проблем и недостатков. Так, при прогнозировании потребления ТЭР в производственных процессах в основном используются методы «от достигнутого уровня» и эвристические методы, что практически не позволяет учесть влияние производственных и климатических факторов на расход ТЭР и приводит к значительной погрешности, в ряде случаев превышающей 15 %. Отсутствие единых научных и методологических принципов оценки фактической эффективности организационных, техниче-

ских и технологических решений, внедряемых при организации ресурсосберегающих производственных систем железнодорожного транспорта, не позволяет достоверно оценить их фактический вклад в снижение расхода ТЭР и подготовить предложение о целесообразности их дальнейшего применения на объектах железнодорожного транспорта. Также следует отметить недостаточную эффективность существующих методов и технических средств для мониторинга и управления показателями энергетической эффективности производственных процессов на уровне линейных структурных подразделений.

Это обуславливает необходимость совершенствования научных и методологических принципов организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте на основе современных научно обоснованных методов и алгоритмов, учитывающих влияние условий производства, уровня использования достижений научно-технического прогресса, степени внедрения мероприятий по энергосбережению и иных производственных показателей. При этом должны учитываться современные требования, предъявляемые к методам оценки энергетических показателей, к которым относятся учет случайного характера энергопотребления, необходимость оценки влияния факторов, влияющих на расход ТЭР и др.

Задача повышения показателей энергетической эффективности основных бизнес-процессов холдинга «РЖД», в том числе за счет совершенствования научных и методологических принципов организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте отражена в Долгосрочной программе развития ОАО «РЖД», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 19.03.2019 г. №466-р, Энергетической стратегии Холдинга «РЖД» до 2020 года и на перспективу до 2030 года, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 г. №2537р и в других распорядительных документах железнодорожной отрасли.

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

ответствует приоритетному направлению развития науки, технологии и техники в РФ «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» в соответствии с указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. №899.

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. Левин, М. П. Бадер, А. Н. Лисенков, А. Т. Бурков, А. Б. Косарев, В. М. Сай, А. Г. Галкин, Н. В. Сирина, А. С. Мишарин, Б. А. Аржанников, Б. Е. Дынькин, Ю. И. Жарков, Э. А. Мамаев, М. Г. Шалимов, В. Т. Черемисин, В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, А. Н. Марикин, Л. А. Герман, А. А. Ковалев, М. В. Шевлюгин, С. В. Власьевский, В. Г. Сальников, А. Л. Манаков, А. Н. Митрофанов, В. З. Манусов, Б. И. Кудрин, В. В. Цыганов, Р. Н. Хамитов и др., а также их зарубежные коллеги D. Genethliou, E. Almeshaei, J. Wang, P. Bunnoon, A. Badri, W. Zhang, C. B. Park, G. Manuel, I. Sengor, H. Zhou, H. Schoonenberg, V. Yeres и др.

Вопрос совершенствования научных и методологических принципов организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте является широко проработанным, однако продолжающийся 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 на железнодорожном

транспорте путем создания и применения методов и средств мониторинга использования топливно-энергетических ресурсов, организационно-методических и технических решений с использованием новых информационных технологий.

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

1) выполнить систематизацию методов и средств эффективного использования топливно-энергетических ресурсов 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 топливно-энергетических ресурсов при организации производственных процессов, результатов внедрения организационных, технических и технологических ресурсосберегающих решений, и развития организационной структуры управления процессами использования топливно-энергетических ресурсов;

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

4) разработать методы и средства эффективного использования топливно-энергетических ресурсов 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 научное обоснование стратегии развития железнодорожного транспорта как ресурсосберегающей производственной системы за счет комплексной систематизации, анализа, прогнозирования и верификации ключевых

показателей эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в производственных процессах;

7) предложить усовершенствованные методы и средства мониторинга использования топливно-энергетических ресурсов в производственных процессах на железнодорожном транспорте.

Объектом исследования являются производственные процессы на железнодорожном транспорте как единая производственная система.

Областями исследования являются 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, которые основаны на переходе от методов управления процессом использования топливно-энергетических ресурсов 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 топливно-энергетических ресурсов 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 пере-

возочных и неперевозочных видах деятельности железнодорожного транспорта в части эффективного использования топливно-энергетических ресурсов, отличающиеся усовершенствованными алгоритмами выбора гиперпараметров, которые позволяют выполнять оценку энергетической эффективности производственного процесса, доказана эффективность применения методов машинного обучения для решения задачи моделирования процесса использования топливно-энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте.

3. Разработаны методы и средства эффективного использования топливно-энергетических ресурсов в производственных процессах на железнодорожном транспорте с использованием информационных технологий, основанные 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 научные основы стратегии развития железнодорожного транспорта как ресурсосберегающей производственной системы за счет комплексной разработки, анализа и прогнозирования ключевых показателей эффективности использования топливно-энергетических ресурсов 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 топливно-энергетических ресурсов 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.

1. Применение усовершенствованных научных и методологических принципов повышения эффективности функционирования ресурсосберегающих производственных систем и математических моделей эффективного использования топливно-энергетических ресурсов в производственных процессах на железнодорожном транспорте на основе методов машинного обучения позволяет повысить качество моделирования расхода энергоресурсов за счет обоснованного учета влияния производственных и климатических факторов, результатов внедрения ресурсосберегающих решений и делегирования полномочий по разработке проектов заданий по экономии энергоресурсов на уровень филиалов и линейных структурных подразделений.

2. Внедрение разработанных методов и средств эффективного использования топливно-энергетических ресурсов в производственных процессах на железнодорожном транспорте на основе применения новых информационных технологий, включающие анализ и управление расходом электроэнергии на нетяговые нужды и порядок формирования заданий по экономии топливно-энергетических ресурсов, позволяет усовершенствовать организацию процесса нормирования и прогнозирования потребления топливно-энергетических ресурсов и мониторинга показателей энергетической эффективности производственных систем ОАО «РЖД».

3. Применение разработанных научных и методологических принципов повышения эффективности организационных, технических и технологических решений, используемых при организации ресурсосберегающих производственных систем железнодорожного транспорта, позволило оценить их фактический вклад в снижение расхода ТЭР и сформировать предложения о целесообразности их дальнейшего внедрения в производственных процессах на железнодорожном транспорте, а также послужило основой для разработки унифицированной методики оценки технико-экономической эффективности энергосберегающих технических средств и технологий на объектах ОАО «РЖД», применение которой позволяет объективно оценить результаты выполнения заданий по экономии топливно-энергетических ресурсов в производственных системах.

4. Предложенные научные основы стратегии развития железнодорожного транспорта как ресурсосберегающей производственной системы использованы при разработке «Энергетической стратегии Холдинга «РЖД» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года», которая является одним из основных нормативных документов ОАО «РЖД» в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

5. Применение усовершенствованных методов и средств мониторинга использования топливно-энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте за счет внедрения автоматизированной системы контроля и управления энергопотреблением позволило снизить нерациональное использование электрической энергии в производственных процессах на железнодорожном транспорте и повысить эффективность их функционирования.

Методология и методы исследования. Для достижения поставленных целей проведены теоретические и экспериментальные исследования, в ходе которых нашли применение моделирование процессов использования топливно-энергетических ресурсов 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 стати-

стики; моделирование процессов энергопотребления с помощью разработанного программного 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 основаны на переходе от методов управления процессом использования топливно-энергетических ресурсов 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 топливно-энергетических ресурсов 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 топливно-энергетических ресурсов, отличающиеся усовершенствованными алгоритмами выбора гиперпараметров, которые позволяют выполнять оценку энергетической эффективности производственного процесса, доказана эффективность применения методов машинного обучения для решения задачи моделирования процесса использования топливно-энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте.

3. Методы и средства эффективного использования топливно-энергетических ресурсов в производственных процессах на железнодорожном транспорте с использованием информационных технологий, основанные на опре-

делении 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. Научное обоснование стратегии развития железнодорожного транспорта как ресурсосберегающей производственной системы в части комплексной систематизации, анализа, прогнозирования и верификации ключевых показателей эффективности использования топливно-энергетических ресурсов.

6. Усовершенствованные методы и средства мониторинга привлечения и использования топливно-энергетических ресурсов 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 топливно-энергетических ресурсов на нетяговые нужды, утвержденный распоряжением ОАО «РЖД» № 2754р от 24.12.2018;

3) унифицированная методика по расчету экономии топливно-энергетических ресурсов 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 (15.04.2015, Западно-Сибирская ж.д., 25.01.2016, Свердловская ж.д.; 10.04.2018, ООО «СТМ-Сервис»; 16.03.2020, Департамент технической политики ОАО «РЖД», 26.03.2020, Дорожный топливно-энергетический центр Западно-Сибирской ж.д.).

Основные научные результаты работы были 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 топливно-энергетических ресурсов 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); на научно-практической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте «ИСУЖТ-2012» (Москва, 2012); на научно-практической конференции «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» (Омск, 2013); на международной конференции International Conference on Environment and Electrical Engineering (Краков, Польша, 2014; Рим, Италия, 2015; Флоренция, Италия, 2016); на международной научно-практической конференции «Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем» (Омск, 2014, 2016); на международной научно-практической конференции «Транспорт-2014» (Ростов-на-Дону, 2014); на 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); на третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава» (Омск, 2015); на всероссийской научно-практической конференции «Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы» (Хабаровск, 2015); на всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» (Омск, 2016); на международной конференции International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (Челябинск, 2016; Санкт-Петербург, 2017; Москва, 2018); на третьей международной научно-практической конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов» (Москва, 2018); на международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям FarEastCon-2018 (Владивосток, 2018); на Сибирском транс-

портном форуме TransSiberia-2018 (Новосибирск, 2018); на третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Инновационные проекты и технологии машиностроительных производств» (Омск, 2019).

Предлагаемые в диссертационной работе научно-организационные и технические решения были представлены на сетевых школах ОАО «РЖД» «Нормирование и анализ расхода топливно-энергетических ресурсов» (Самара, 2010; Санкт-Петербург, 2011).

В целом диссертационная работа была представлена и получила одобрение 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), на 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 2 монографии, 18 научных статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 8 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 9 приложений. Работа изложена на 340 страницах основного текста, содержит 125 рисунков, 81 таблицу.

1 СИСТЕМАТИЗАЦИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

В настоящей главе выполнен анализ существующих подходов к организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте, рассмотрены основные проблемы применяемых методов и перспективы их развития.

1.1 Анализ состояния потребления топливно-энергетических ресурсов и структуры управления процессом их эффективного использования при организации производственных процессов на железнодорожном транспорте

ОАО «Российские железные дороги» является крупнейшим потребителем энергоресурсов в РФ. Так, потребление электрической энергии в ОАО «РЖД» составляет около 4,8 % от объема выработки в России, дизельного топлива – 3,4 % от объема производства в России, мазута – 0,5 % от объема производства в России, угля – 0,5 % от объема потребления в России, природного газа – 0,1 % от объема потребления в России.

За период с 2003 по 2018 гг. затраты на приобретение ТЭР в ОАО «РЖД» выросли в 4,4 раза (рисунок 1.1).

Коэффициент инфляции в России за указанный период составил 3,8, таким образом, расходы на закупку ТЭР в ОАО «РЖД» растут темпами, опережающими официальную инфляцию, что связано в основном с ежегодным увеличением стоимости ТЭР. Эксплуатационный грузооборот за рассматриваемый период вырос на 48 % до 2596,9 млрд т·км, а пассажирооборот снизился до 129,4 млрд пасс·км. Таким образом, в сопоставимых условиях доля затрат на ТЭР в общих эксплуатационных расходах компании растет и составляет около 19 %.

В связи с ростом грузооборота наиболее значительно увеличились затраты на тягу поездов: по электроэнергии – в 4,5 раза, по дизельному топливу – в 4,8 раза). В

неперевозочных видах деятельности темпы роста расходов на закупку ТЭР существенно ниже: электроэнергия – в 2,8 раза, дизельное топливо – в 2 раза, мазут – в 1,7 раза, природный газ – в 3,1 раза, бензин автомобильный – в 1,6 раза (в сравнении с 2005 г.), тепловая энергия со стороны – в 1,4 раза. Расходы на уголь снизились на 4 %, а на дрова топливные – на 86 %. Исключением является сжиженный газ, расходы на который увеличились в 18 раз, что связано с эффектом «низкой базы». Удалось свести к минимуму расходы на закупку прочих видов топлива.

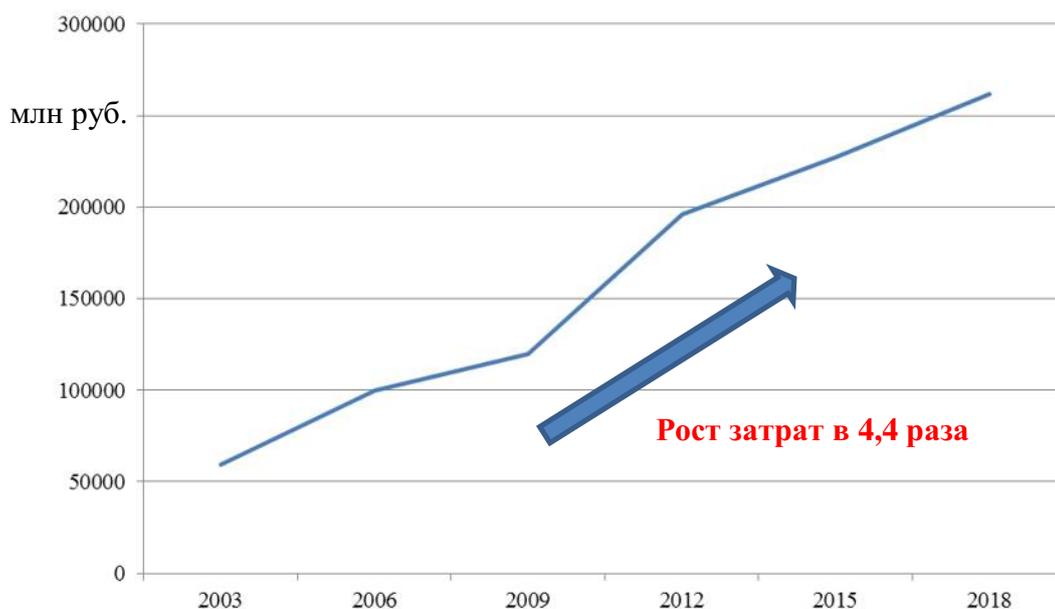
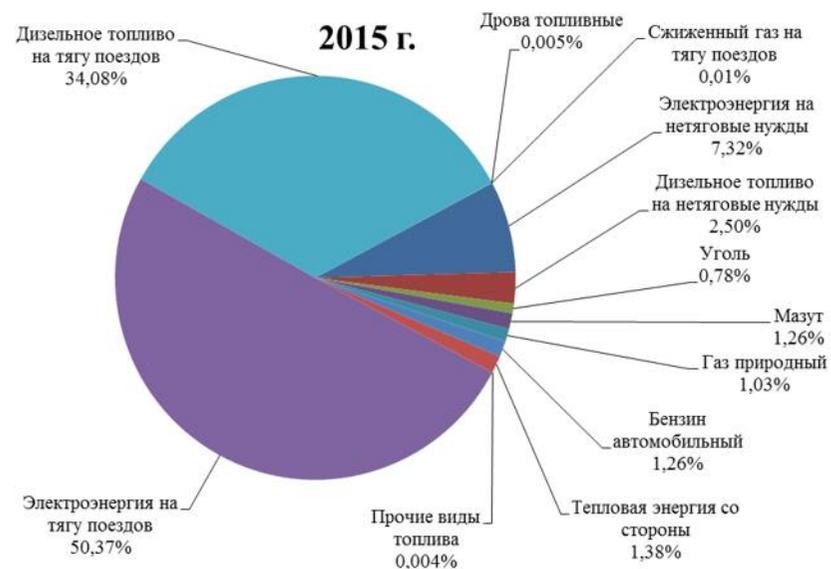
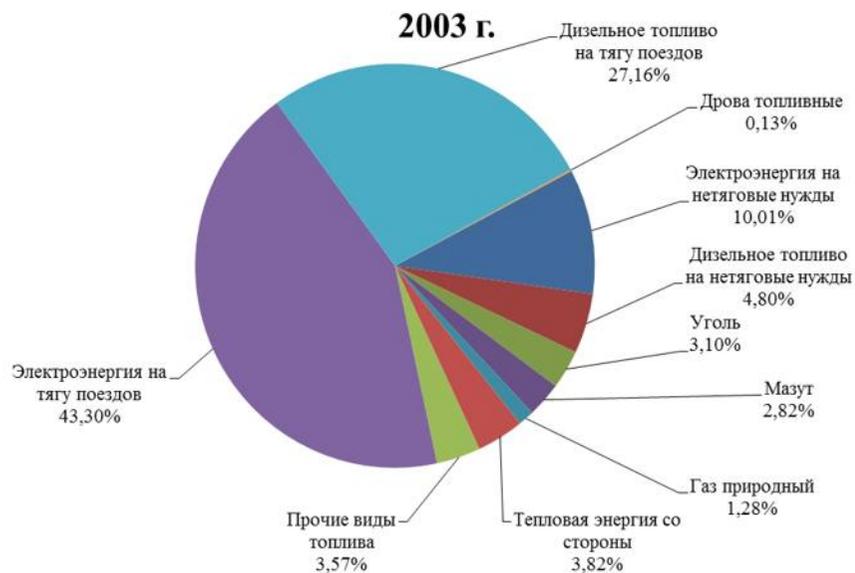


Рисунок 1.1 – Динамика затрат на приобретение ТЭР в ОАО «РЖД»

Следовательно, структура закупки ТЭР претерпела существенные изменения за указанный период.

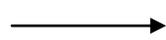
Из рисунка 1.2 видно, что существенно увеличилась доля затрат на тягу поездов (с 70,5 % до 84,5 %). Доля же затрат на нетяговую энергетику значительно сократилась. В целом затраты на 1 т у.т. энергоресурсов в ОАО «РЖД» выросли с 2362,5 руб./т у.т. до 10666,7 руб./т у.т., т. е. в 4,5 раза. Это подтверждает необходимость дальнейшего усиления мер по повышению энергетической эффективности железнодорожного транспорта.

В связи с тем, что ОАО «РЖД» является компанией, осуществляющей регулируемые виды деятельности, Федеральной антимонопольной службой России устанавливаются требования к программам энергосбережения и целевые показатели, которые должны быть достигнуты в результате их реализации.



Затраты на ТЭР

59,3 млрд руб.



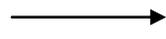
+283,1%



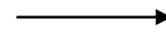
227,2 млрд руб.

Расход ТЭР

25,1 млн т у.т.



-15,2%



21,3 млн т у.т.

Рисунок 1.2 – Структура затрат на приобретение ТЭР в ОАО «РЖД»

К этим показателям относятся снижение энергоемкости и повышение энергоэффективности производственной деятельности.

Как видно из рисунка 1.3, на протяжении 5 лет данные показатели неизменно выполнялись.

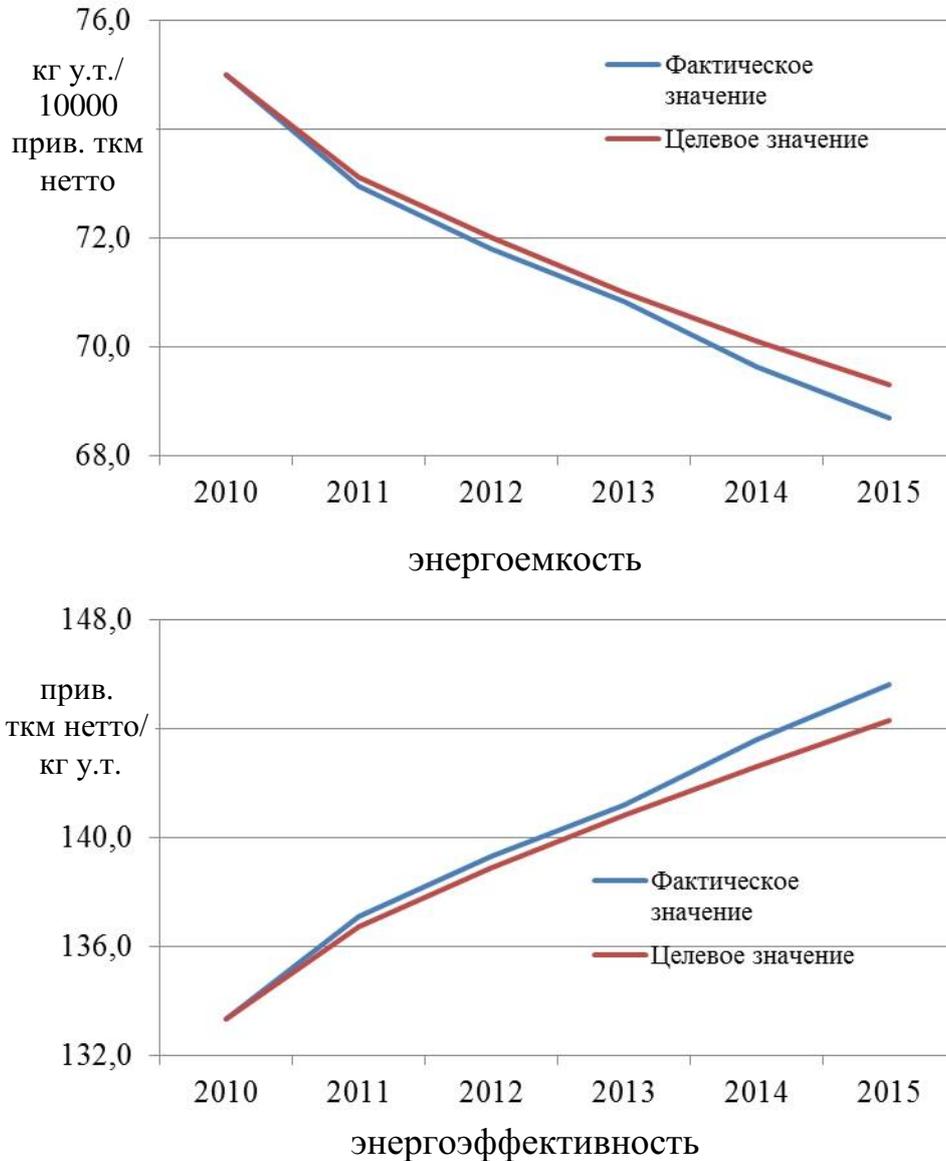


Рисунок 1.3 – Динамика показателей энергоемкости и энергоэффективности ОАО «РЖД»

Более детальными показателями, принятыми в ОАО «РЖД» в качестве индикаторов энергетической эффективности в зависимости от направления расхода ТЭР, являются:

в перевозочном процессе – удельный расход электрической энергии и дизельного топлива на тягу поездов;

в неперевозочных видах деятельности – расход ТЭР, выраженный в натуральном или условном топливе, а также в энергетическом эквиваленте (Дж).

Дополнительными показателями энергетической эффективности могут являться уровень небаланса электрической энергии на тягу поездов, объем энергии рекуперации, потери энергии в электрических и тепловых сетях и др.

С 2003 по 2018 гг. удельный расход электрической энергии (УРЭ) на тягу поездов снизился на 11 % до 106,5 кВт·ч/10⁴ т·км бр, а удельный расход дизельного топлива (УРД) – на 18,4 % до 56 кг у.т./10⁴ т·км бр (рисунок 1.4).

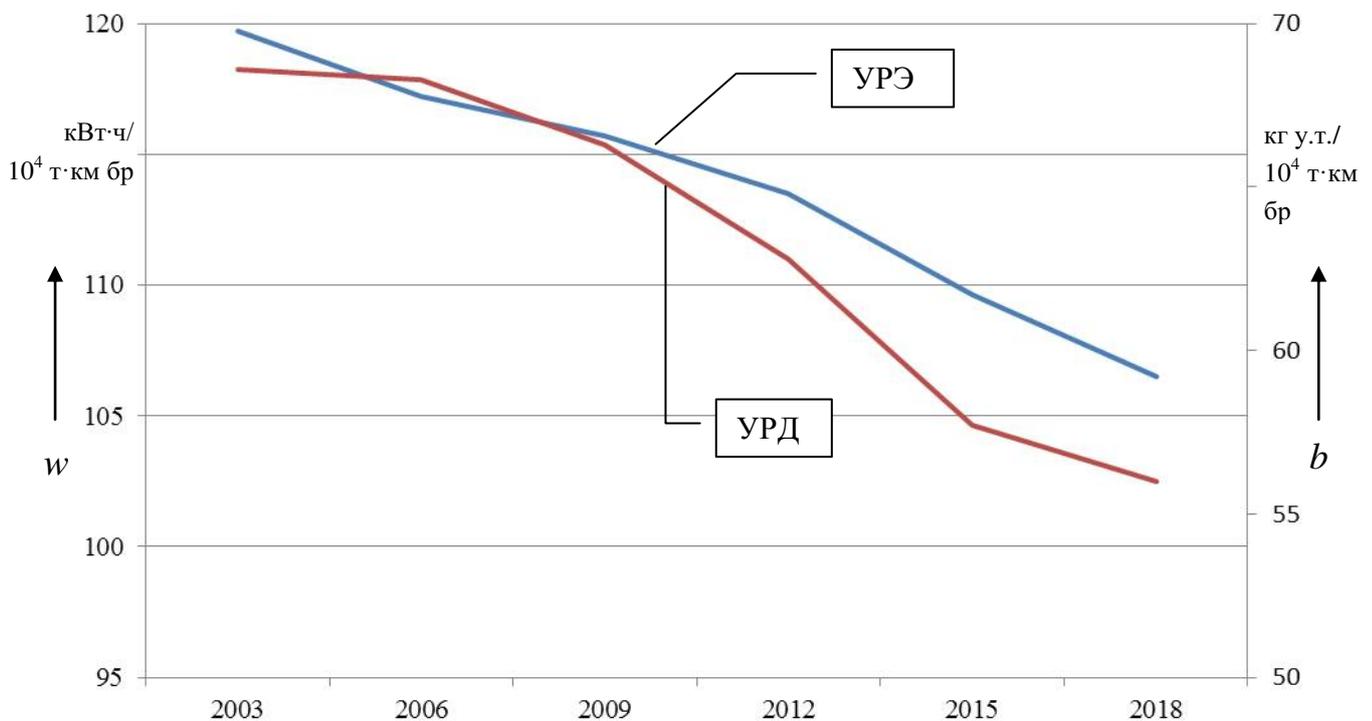


Рисунок 1.4 – Динамика расхода электрической энергии на тягу поездов в 2003 – 2018 гг.

Снижение достигнуто за счет увеличения грузооборота и пассажирооборота, перераспределения грузо- и пассажиропотоков, внедрения новых локомотивов, улучшения качественных показателей использования локомотивов, совершенствования системы тягового электроснабжения и других факторов. Это позволяет говорить о достаточно эффективной работе в области энергосбережения в перевозочном процессе.

Расход ТЭР в неперевоочных видах деятельности за период 2003 – 2015 гг. снизился на 23,4% до 5,75 млн т у.т. (рисунок 1.6). Значительное снижение произошло как за счет применения энергосберегающих мероприятий, так и выделения дочерних зависимых обществ (ДЗО), а также отдельных объектов из состава ОАО «РЖД» (продажа, консервация и др.) за рассматриваемый период.

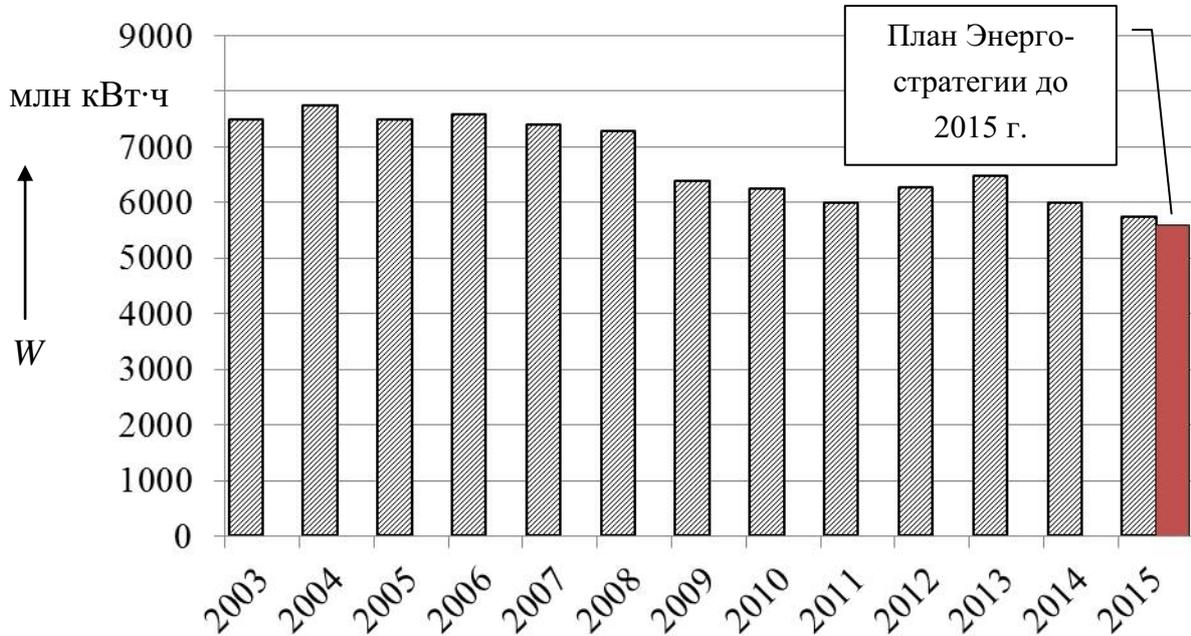


Рисунок 1.5 – Динамика расхода ТЭР в неперевоочных видах деятельности в 2003 – 2015 гг.

Значительные объемы потребления энергоресурсов обуславливают необходимость интенсификации энергосберегающей деятельности с целью развития ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте. С учетом в ОАО «РЖД» сформирована система управления процессом эффективного использования ТЭР (рисунок 1.6).

Деятельность по управлению, планированию и контролю за потреблением ТЭР, повышению энергетической эффективности в ОАО «РЖД» осуществляется на основе следующих нормативных документов федерального значения:

Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»;

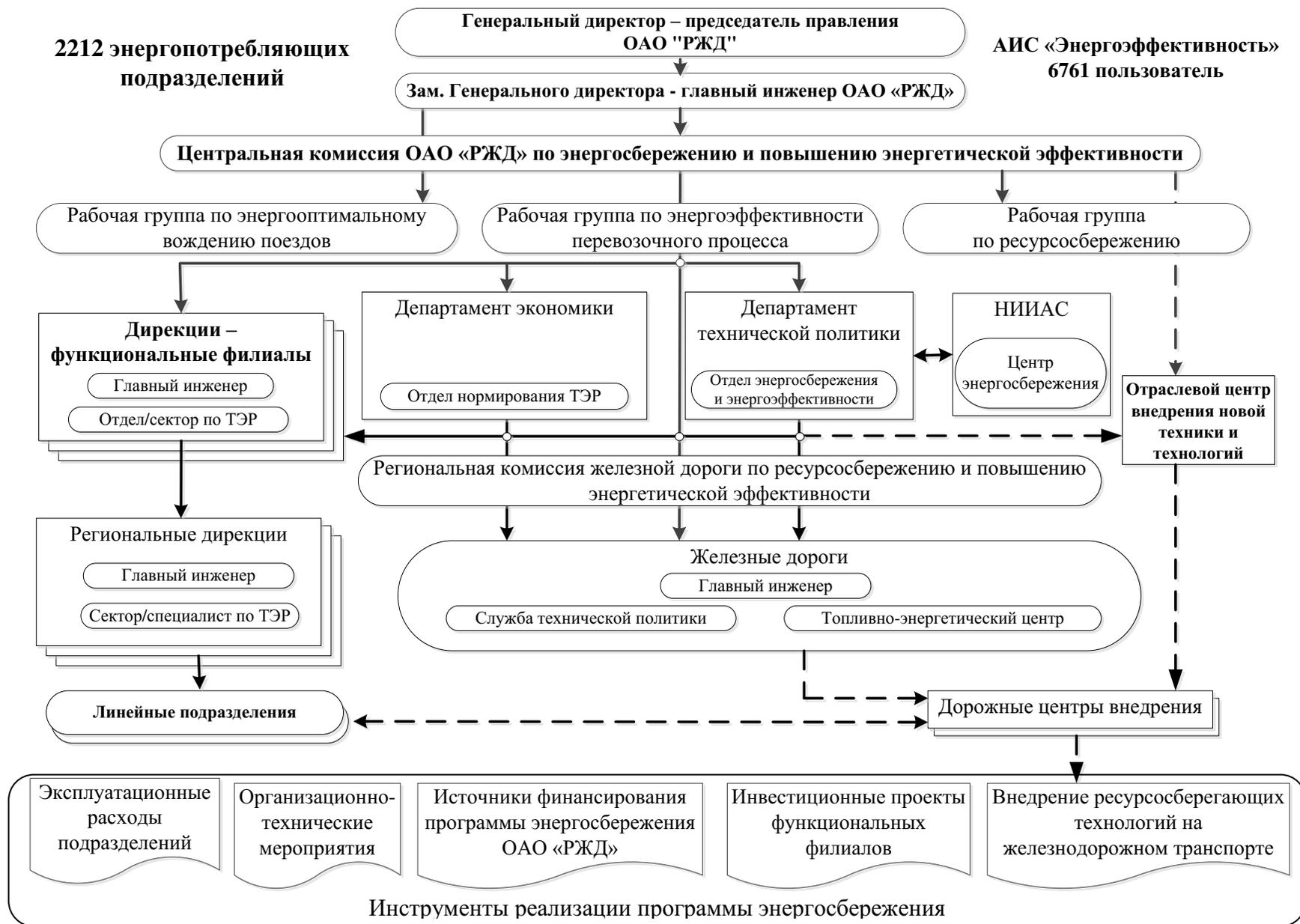


Рисунок 1.6 – Основные составляющие системы управления процессом эффективного использования ТЭР

Транспортная стратегия Российской Федерации, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 11 июня 2014 г. №1032-р;

Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. №1717-р;

Приказ Федеральной службы по тарифам (ФСТ России) от 31 марта 2015 г. № 586-т «Об установлении требований к программам в области энергосбережения организаций, осуществляющих регулируемые виды деятельности в сфере железнодорожных перевозок: ОАО «РЖД», ОАО АК «Железные дороги Якутии», ОАО «Федеральная пассажирская компания», на 2016 – 2018 годы».

Кроме того, за последнее время введено в действие значительное количество документов по стандартизации и отраслевым нормативным документам, связанных с повышением эффективности использования ТЭР на железнодорожном транспорте, из числа которых следует отметить следующие:

Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД»;

Сводная программа повышения инвестиционной и операционной эффективности ОАО «РЖД»;

Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года;

Стратегия научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года («Белая книга»);

Энергетическая стратегия Холдинга «РЖД» до 2020 года и на перспективу до 2030 года;

Порядок формирования и реализации инвестиционного проекта ОАО «РЖД» «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте»;

СТО РЖД 1.21.002-2008 «Политика управления топливно-энергетическими ресурсами»;

СТО РЖД 08.017-2012 «Система управления энергоэффективностью производственных процессов. Основные положения»

ИТС 48-2017 «Повышение энергетической эффективности при осуществлении хозяйственной и (или) иной деятельности».

Указанные документы являются основой для формирования в ОАО «РЖД» ресурсосберегающих производственных систем на различных уровнях управления, которые реализуются силами следующих подразделений и (или) руководителей:

на уровне центрального аппарата ОАО «РЖД» – департаментами и филиалами, в том числе Департаментом технической политики (ЦТех), Департаментом экономики (ЦЭУ) и Центральной комиссией ОАО «РЖД» по энергосбережению и повышению энергетической эффективности (ЦКЭР), главными инженерами филиалов, руководителями отделов или секторов по использованию ТЭР;

на уровне региональных дирекций и региональных центров корпоративного управления (железных дорог) – главными инженерами, причастными службами, в том числе Дорожными топливно-энергетическими центрами (НТЭЦ) и службами технической политики (НТП);

на уровне линейных структурных подразделений (СП) – главными инженерами.

Для оценки эффективности реализации программы энергосбережения, внедрения ресурсосберегающих организационных и технических решений разработан и успешно функционирует АИС «Энергоэффективность», которая включает в себя более 2200 СП и 6700 пользователей.

Таким образом, сложившаяся система должна обеспечивать эффективное использование всех видов ТЭР на железнодорожном транспорте за счет контроля, планирования и управления потреблением энергоресурсов, внедрения энергосберегающих ОТМ.

Тем не менее, имеется ряд направлений, в рамках которых целесообразно дальнейшее развитие методологии организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте, к числу которых можно отнести:

- 1) совершенствование научных и методологических основ организации процесса нормирования и прогнозирования потребления ТЭР;

2) разработка усовершенствованных методов оценки энергетической эффективности организационных, технических и технологических решений, внедряемых в производственных процессах;

3) разработка и внедрение методов и средств мониторинга использования ТЭР в производственных процессах.

В дальнейших исследованиях ключевое внимание в сравнении с другими видами ТЭР было уделено повышению эффективности использования электрической энергии в производственных процессах на железнодорожном транспорте по следующим причинам:

1) доля электрической энергии в энергетическом балансе ОАО «РЖД» составляет более 70 %;

2) электрическая энергия используется практически во всех филиалах ОАО «РЖД» (рисунок 1.7), что позволяет говорить об ее широком применении в производственных процессах;

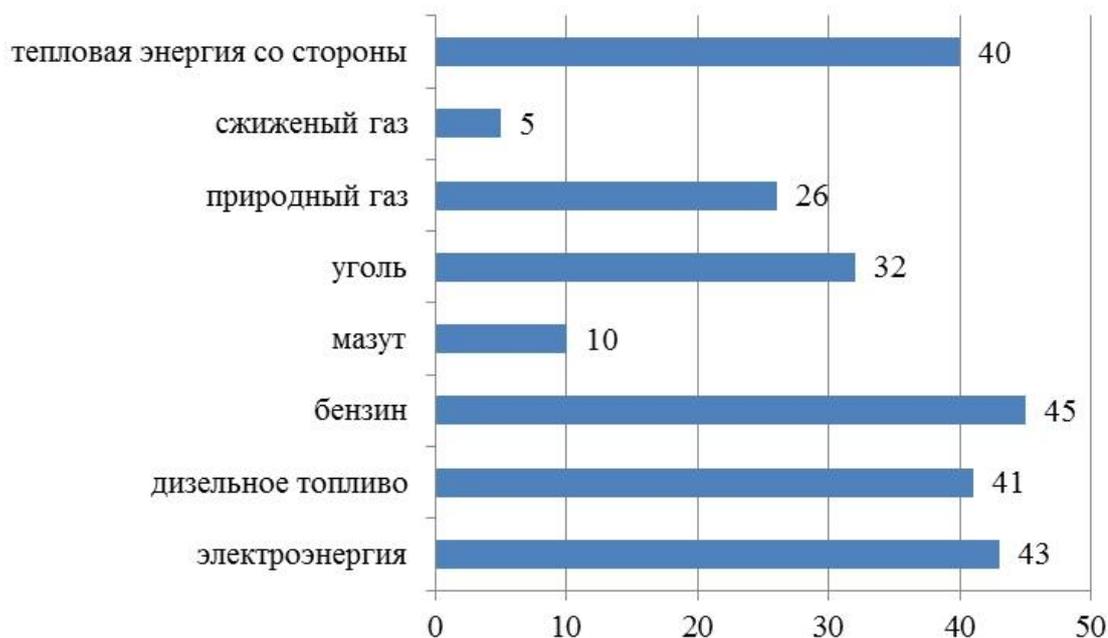


Рисунок 1.7 – Количество филиалов ОАО «РЖД», использующих соответствующие виды ТЭР в 2018 г.

3) электрическая энергия наиболее универсальна с точки зрения организации систем мониторинга и управления процессом ее потребления.

1.2 Анализ методов нормирования и прогнозирования расхода ТЭР, применяемых в производственных системах

Разработка точных математических моделей для нормирования и прогнозирования расхода ТЭР имеет большое значение для повышения эффективности работы производителей и потребителей энергоресурсов в различных производственных системах. Прогнозирование электрических и тепловых нагрузок, расхода других видов ТЭР помогает решать сложные производственные задачи, принимать важные решения, включая решения о покупке и (или) генерации энергии, изменении режимов работы энергопотребляющего оборудования и развитии инфраструктуры энергетического хозяйства.

Процесс прогнозирования расхода ТЭР является одним из ключевых для поставщиков энергоресурсов, независимых системных операторов в электроэнергетике, потребителей энергоресурсов и других участников процессов производства, передачи, распределения и потребления ТЭР.

В настоящем разделе рассмотрены и систематизированы основные подходы, применяемые для нормирования и прогнозирования расхода ТЭР в производственных процессах в различных отраслях.

1.2.1 Классификация методов нормирования и прогнозирования расхода ТЭР в зависимости от горизонта прогнозирования

В зависимости от горизонта прогнозирования различают следующие виды прогнозирования расхода ТЭР [53], [72]:

- 1) краткосрочное (от одного часа до одной недели);
- 2) среднесрочное (от одной недели до одного года);
- 3) долгосрочное (свыше одного года).

В электроэнергетических системах (ЭЭС) при решении задач прогнозирования нагрузки и электропотребления возможно применение иной классификации в зависимости от горизонта прогнозирования [54], [55]:

- 1) долгосрочное (более 15 лет);

- 2) среднесрочное (до 5 лет);
- 3) краткосрочное (от одного часа, суток, недели, месяца до года вперед);
- 4) оперативное (до одного часа).

В зарубежной литературе часто приводится следующая классификация [40, 56]:

- 1) сверхкраткосрочные прогнозы (very short-term load forecasts, VSTLF) – прогнозы на несколько минут вперед. Эти прогнозы являются относительно новой разновидностью методов планирования нагрузки, которые имеют особое значение для процессов оперативного диспетчерского управления в электроэнергетике. Особенность таких прогнозов заключается в сложности учета влияния производственных и климатических факторов за минимальный промежуток времени;
- 2) краткосрочные прогнозы (short-term load forecasts, STLF) – прогнозы на промежуток времени от одного часа до одной недели. Краткосрочные прогнозы позволяют оперативно принимать решения о покупке или продаже энергии, изменении режимов работы оборудования. Они также могут помочь оценить перетоки мощности и принимать решения, которые могут предотвратить перегрузки. Своевременная реализация таких решений приводит к повышению надежности сети и к снижению количества аварий и отключений оборудования. Для получения точных краткосрочных прогнозов должны быть учтены данные о погоде и суточной нагрузке;
- 3) среднесрочные прогнозы (medium-term load forecasts, MTLF) – прогнозы на промежуток времени от одного месяца до трех лет. Этот прогноз в основном требуется для оценки процессов ценообразования на рынке энергоресурсов, а также для планирования затрат на приобретение ТЭР. В этих моделях входные параметры должны включать исторические данные о нагрузке, информацию о погоде, экономические и демографические факторы;
- 4) долгосрочные прогнозы (long-term load forecasts, LTLF) – прогнозы на период свыше пяти лет. Этот прогноз является важным для развития инфраструктуры энергохозяйства, планирования капитальных расходов. Входные параметры для таких моделей аналогичны параметрам для среднесрочных прогнозов. Дополнительным параметром является прогноз тарифов на энергоресурсы.

На железнодорожном транспорте практически не применяется краткосрочное и сверхкраткосрочное прогнозирование расхода ТЭР. В эксплуатационной деятельности используют среднесрочное прогнозирование на один год с разделением расхода энергоресурсов по кварталам. Долгосрочные прогнозы составляют при формировании основополагающих документов в области энергосбережения и энергоэффективности, например, «Энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года» [57].

1.2.2 Классификация методов нормирования и прогнозирования расхода ТЭР в зависимости от применяемого подхода

Основные методы нормирования и прогнозирования расхода ТЭР, применяющиеся в настоящее время, представлены на рисунке 1.8.

Эвристические методы прогнозирования.

Эвристические подходы являются одними из первых методов планирования различных процессов. Основой для эвристических методов является выбор значимых факторов, определяющих процесс, на основе опыта, знаний и интуиции эксперта [58]. Для повышения эффективности эвристических методов осуществляется подбор необходимого количества экспертов соответствующей квалификации, совершенствование алгоритмов обработки результатов исследования экспертных мнений. Как указано в [59, 60], в ходе реализации эвристических методов «...возможны индивидуальные экспертные оценки, например, интервью и аналитические оценки; основные методы коллективных экспертных оценок включают в свой состав методы комиссий, коллективной генерации идей, матричный метод, метод Делфи и другие...».

Однако, как показано в [61], применение эвристических методов требует привлечения экспертов высокой квалификации. Кроме того, методы эвристического прогнозирования становятся весьма сложными и трудоемкими при использовании их в технически сложных процессах, например, на железнодорожном транспорте.



Рисунок 1.8 – Классификация методов нормирования и прогнозирования расхода ТЭР
в зависимости от применяемого подхода

Методы, рассматривающие энергопотребление как детерминированный процесс.

К числу этих методов можно отнести следующие подходы.

1. Расчетно-аналитические методы.

Они основаны на использовании математического описания физики протекания процесса потребления ТЭР. Например, в [62] приведена методика определения расхода электрической энергии для предприятий транспорта нефти в зависимости от характеристик нефтепровода.

Другим примером является определение расчетного расхода электроэнергии на основании данных об установленных мощностях электроприемников, известных коэффициентах использования, спроса и расчетной мощности [63 – 65].

Недостатком этих подходов является невозможность учета реальных характеристик энергопотребляющего оборудования и режимов энергопотребления, в результате чего расход ТЭР, определяемый данным способом, как правило, оказывается завышенным [66].

2. Нормирование в расчете на измеритель работы.

Расчет удельного расхода ТЭР согласно данной методике определяется делением объема потребления ТЭР за определенный временной период на объем выполненной работы [67]. В качестве измерителя работы могут быть приняты производительность энергопотребляющего оборудования, объем выпуска продукции, нормо-часы выполненной работы, пробег автотранспорта, площадь отапливаемых зданий, производственная площадь предприятия и др. [68 – 71].

3. Методы, основанные на анализе динамики потребления ТЭР или на экстраполяции данных о расходе ТЭР.

Данные методы нашли применение в энергетической системе России [72].

Они достаточно наглядны и могут использоваться для сравнительного анализа расхода ТЭР, однако точность их невысока, так как они не учитывают влияние различных факторов на процесс потребления ТЭР.

Методы, основанные на предположении о вероятностном характере энергопотребления.

Представленные методы основаны на применении математического аппарата теории вероятностей.

1. Аппроксимация графиков нагрузки.

В этом методе суточный график нагрузки аппроксимируют рядом Фурье [73], коэффициенты которого находят исходя из информации за предшествующие расчетному периоды.

Данная модель может быть использована при краткосрочном планировании в электроэнергетике, однако не предусматривает возможности коррекции прогнозных значений в оперативном режиме.

Разновидностью данного метода является гибридный метод прогнозирования электропотребления, предложенный Р. Н. Хамитовым, который основан на спектральном анализе графика нагрузки и его аппроксимации синусоидальной функцией с учетом ветро-холодового индекса [5, 6, 74, 75]. Как показано в [74, 75], погрешность данного метода при краткосрочном планировании составляет около 1,5 %.

2. Авторегрессионные модели.

В данных моделях расход ТЭР за рассматриваемый период определяется исходя из анализа временных тенденций его изменения за предшествующие периоды, при этом дополнительно рассматриваются случайные составляющие энергопотребления [76, 77].

3. Метод экспоненциального сглаживания.

Данные методы предусматривают обеспечение наибольшей значимости более поздним данным [78, 79]. Модель расхода ТЭР реализуется при этом в виде полинома.

4. Метод, основанный на R/S-анализе.

Этот метод позволяет оценить наличие устойчивого тренда в графике расхода ТЭР [80].

5. Фильтр Калмана.

Метод позволяет представить изменения нагрузки в виде модели

[81, 82]:

$$\bar{P}(t) = P(t) + \zeta_n, \quad (1.1)$$

где $P(t)$ – измеренное значение;

$\bar{P}(t)$ – истинное значение;

ζ_n – погрешность измерения.

6. Разложение графиков нагрузки с применением ортогональных координатных функций.

Данный метод позволяет разложить реальный график нагрузки на составляющие, которые затем аппроксимируются той или иной функцией (например, синусоидальной, в случае цикличности процесса) [72].

Основным недостатком перечисленных в п. 1 – 6 методов является невозможность исследования причин изменения расхода ТЭР, т. е. на их основе невозможно установление зависимостей уровня энергопотребления предприятия от изменения основных технологических, климатических или иных показателей производства.

7. Прогнозирование с использованием методов корреляционного и регрессионного анализа.

В отличие от ранее представленных методов, данный способ позволяет учесть зависимость между расходом ТЭР и влияющими факторами, такими как суточная периодичность, ритм социальной деятельности, производственные показатели, метеофакторы и др. Этот метод является достаточно распространенным [41, 83 – 87]. В сравнении с другими методами данный подход позволяет устанавливать причину изменения расхода ТЭР в зависимости от влияющих признаков. В то же время его использование затруднено при наличии существенно нелинейных зависимостей энергопотребления от учитываемых факторов.

8. Ценологический подход.

Ценологический подход к прогнозированию расхода ТЭР предложен Б. И. Кудриным [1]. Основная идея данного метода заключается в том, что «...расход электрической энергии по отдельному предприятию рассматривается

не изолированно, а соотносится с другими. Учитывая, что величина электропотребления непрерывна, исследование проводится в ранговой форме: каждому предприятию присваивается ранг r – целое число в порядке убывания исследуемого параметра годового электропотребления особей A_i . Ранг $r = 1$ приписывается особи с наибольшим электропотреблением A_1 ; ранг, равный общему числу предприятий, – особи с наименьшим электропотреблением...» [1].

Применение ценологического подхода к прогнозированию электропотребления промышленных предприятий описано в работах [1 – 4, 88].

Подходы, основанные на методах искусственного интеллекта.

Искусственный интеллект (artificial intelligence) – это научное направление, в рамках которого ставятся и решаются задачи моделирования тех видов человеческой деятельности, которые традиционно считаются интеллектуальными (представление знаний, обучение, общение и др.). Применение методов, основанных на искусственном интеллекте, подразумевает статистический анализ данных и обучение. Подходы, основанные на методах искусственного интеллекта, нашли широкое применение в задачах прогнозирования электрической нагрузки.

К числу методов, основанных на теории искусственного интеллекта, можно отнести следующие: метод опорных векторов, нейронные сети, нечеткие нейронные сети, метод «ближайшего соседа», генетические алгоритмы, байесовская классификация и др. Как правило, данные методы относят к методам машинного обучения.

Рассмотрим основные подходы, нашедшие применение при планировании, нормировании и прогнозировании расхода ТЭР.

1. Метод опорных векторов.

Данный метод в англоязычной литературе носит название Support Vector Machine (SVM). Он представляет собой разновидность граничных методов [89] и используется как для классификации, так и для построения регрессионных моделей. Впервые SVM был рассмотрен в работе В.Н. Вапника в 1995 г. [90]. В отличие от традиционных регрессионных моделей, этот метод демонстрирует хорошие ре-

зультаты при моделировании нелинейных зависимостей между искомым значением и влияющими факторами [91 – 93].

Принцип минимизации цели в методе опорных векторов формируется в виде [94]:

$$\frac{1}{2}\|\omega\|^2 + \frac{1}{2}C\sum_{i=1}^l e_i^2 - \sum_{i=1}^l a_i(\omega^T \varphi(x_i) + b + e_i - y_i). \quad (1.2)$$

Нелинейное выражение для модели прогнозирования имеет вид:

$$y = \sum_{i=1}^l a_i K(x_i, x) + b. \quad (1.3)$$

В выражениях (1.2), (1.3) приняты следующие обозначения: a , b – линейные коэффициенты; $K(x_i, x)$ – ядро-функция, которая учитывает нелинейное отображение из входного пространства к высокой размерности пространства признаков; e_i – ошибка; ω – вектор весов зазоров между кластерами (вектор коэффициентов разделения кластеров); C – параметр регуляризации, который контролирует ошибки; y_i – ожидаемое значение прогнозируемой суммы; $\varphi(x)$ – нелинейное отображение входного пространства признаков в пространство более высокой размерности.

В качестве функции ядра наиболее часто применяются линейные, полиномиальные, радиально-базисные, сигмоидные и Фурье-функции.

К основным недостаткам метода SVM относятся следующие:

- во внимание принимаются только граничные данные;
- метод чувствителен к помехам и способу нормирования исходной информации;
- не существует общего подхода к автоматическому выбору функции ядра в случае линейной неразделимости классов.

Как показано в [42, 95, 96], применение метода SVM демонстрирует достаточно высокую точность прогнозирования расхода ТЭР.

2. Искусственные нейронные сети.

Искусственная нейронная сеть (ИНС) – «...математическая модель, а также её программные или аппаратные реализации, которые имитируют структуру и свойства нервной системы живых организмов. Нейронная сеть получает на входе набор входных сигналов и выдает соответствующий им ответ в виде выходных сигналов, являющийся решением определенной задачи...» [108].

Формирование теории искусственных нейронных сетей связано с именами Хебба, Минского, Розенблатта, Уидроу, Кохонена, Гроссберга, Андерсона, Хопфилда и др. [97 – 102].

В России проблемы развития нейросетевых технологий связаны с работами А. И. Галушкина, В. Л. Дунина-Барковского, А. Н. Горбаня, В. Г. Царегородцева и других ученых [103 – 106].

В настоящее время нейронные сети – популярный инструмент машинного обучения и объект множества исследований. ИНС применяются для моделирования производственных процессов в различных областях (техника и телекоммуникации, информационные технологии, экономика и финансы, реклама и маркетинг, медицина и пр.).

Основу каждой ИНС составляют элементы (ячейки), имитирующие работу нейронов мозга (рисунок 1.9) [107].

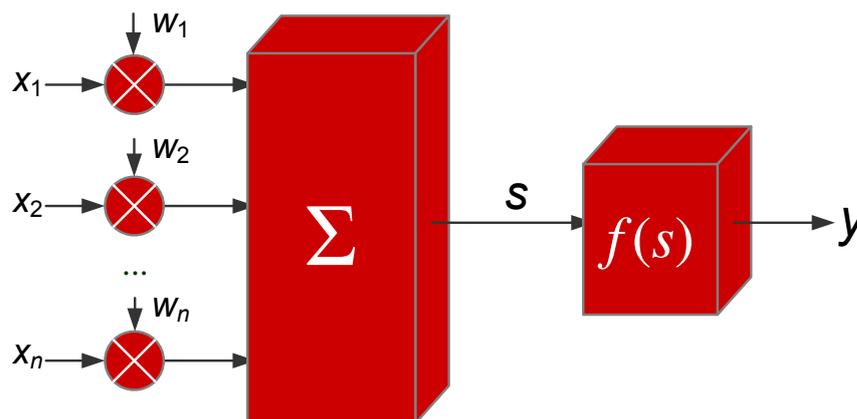


Рисунок 1.9 – Общий вид искусственного нейрона

Текущее состояние нейрона определяется по выражению [107].:

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i, \quad (1.4)$$

где n – количество входов нейрона; w_i – вес синаптической связи; x_i – входной сигнал.

Как правило, нейроны объединяются в группы или слои для обеспечения параллельной работы. Получаемая в результате нейронная сеть будет являться многослойной (рисунок 1.10).

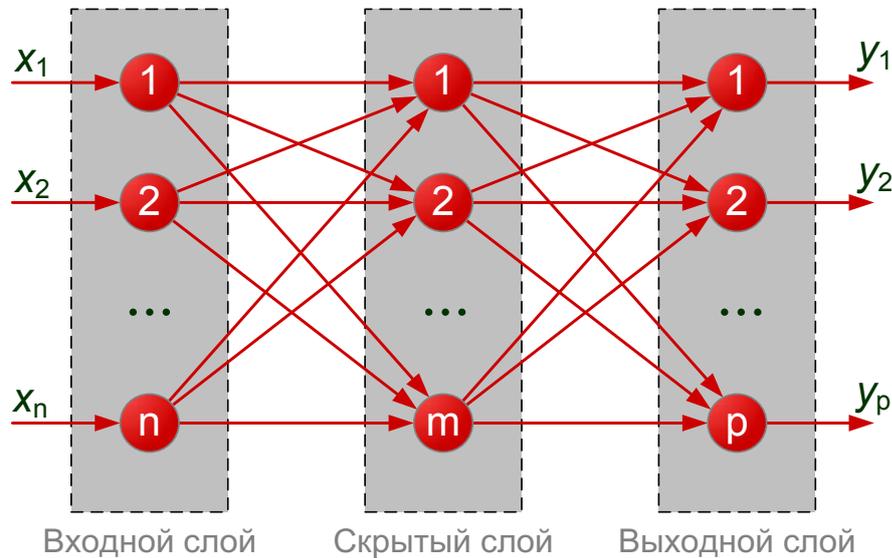


Рисунок 1.10 – Примерная структура многослойной ИНС

Выходной сигнал i -го нейрона y_i определяется как активационная (передаточная) функция от значения S , рассчитанного по формуле (1.4):

$$y = f(S). \quad (1.5)$$

Перечень основных активационных функций приведен в таблице 1.1.

Классификация ИНС возможна по нескольким признаками, наиболее распространенными являются [108]:

- по характеру обучения – сети, обучаемые с учителем, без учителя, с подкреплением;

- по типу входной информации – аналоговые и бинарные;

- по характеру связей – сети прямого распространения, обратного распространения, радиально-базисные функции, сети Кохонена.

Таблица 1.1 – Основные активационные функции, применяемые в ИНС

Наименование	Определяющее выражение
линейная	$f(S) = aS$
пороговая	$f(S) = \begin{cases} 1, S \geq T \\ 0, S < T \end{cases}$
сигмоидная (логистическая)	$f(S) = \frac{1}{1 + e^{-aS}}$
радиально-базисная	$f(S) = e^{-\left(\frac{S}{a}\right)^2}$
тангенциальная (гиперболическая)	$f(S) = \frac{e^S - e^{-S}}{e^S + e^{-S}}$
синусоидальная	$f(S) = \sin(S)$
экспоненциальная	$f(S) = e^{-aS}$

Примечание. В таблице 1 используются обозначения a , T , которые являются параметрами активационных функций, задаваемыми оператором.

Нейросетевое моделирование широко применяется в целях планирования расхода ТЭР промышленных предприятий и энергетических систем и демонстрирует хорошие результаты [7, 8, 43, 44, 109 – 124]. В большинстве случаев применяются аналоговые сети прямого распространения, обучаемые с учителем.

3. Нечеткие нейронные сети.

Теоретически системы с нечеткой логикой и ИНС эквивалентны друг другу, однако на практике у них имеются свои собственные достоинства и недостатки. Нечеткие системы позволяют анализировать сам процесс получения результата, в то время как анализ обученной ИНС достаточно сложен. ИНС могут автоматически приобретать знания, а нечеткие системы – нет. Данные соображения легли в основу аппарата гибридных (нечетких) сетей (ННС), где выводы делаются на основе аппарата нечеткой логики, но соответствующие параметры подстраиваются с использованием алгоритмов обучения ИНС [125]. Исследования в данной области выполняли отечественные и зарубежные ученые [45, 125 – 138].

Как показано в [126, 224], «...при использовании нечетких систем в исследованиях процессов потребления ТЭР появляется возможность делать четкие выводы в условиях нечеткости, что позволяет их использовать при решении конкретных задач. Нечеткие системы можно применять для анализов процессов потребления ТЭР с различным количеством влияющих факторов...».

Обучение ННС осуществляется по методам, аналогичным ИНС [127 - 129].

Примерная структура ННС представлена на рисунке 1.11 [224].

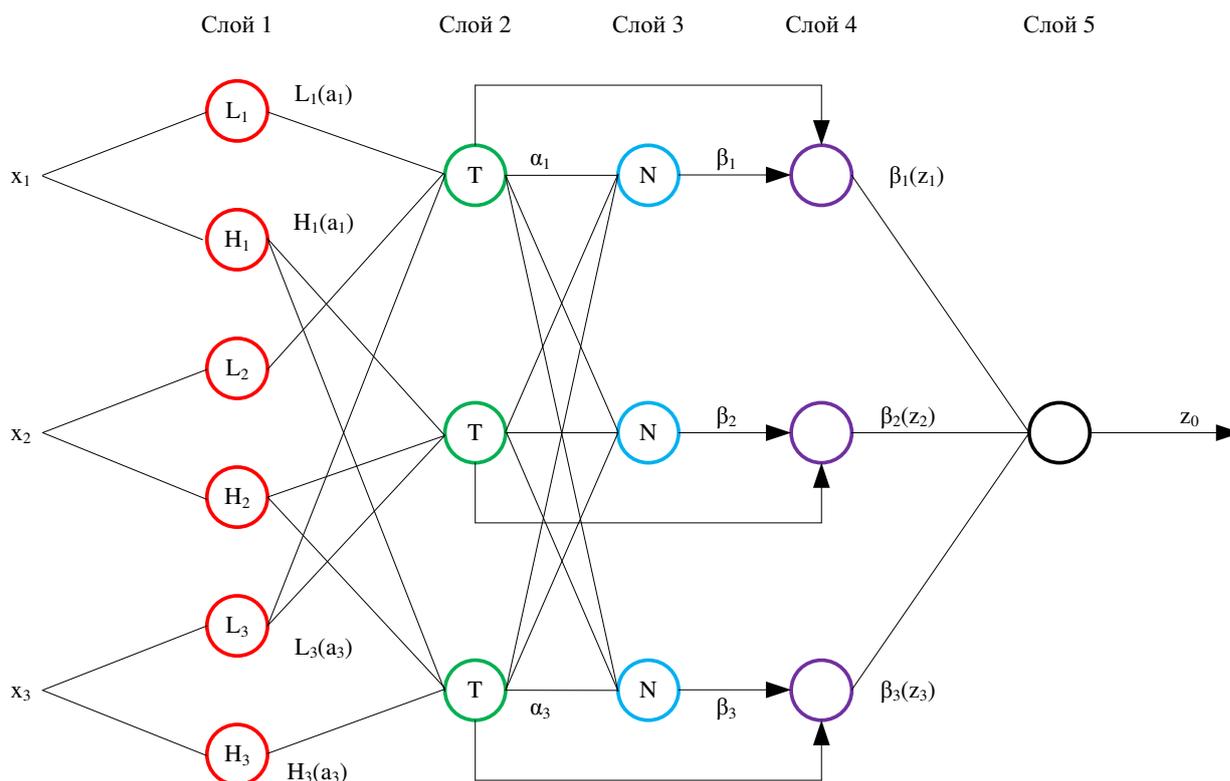


Рисунок 1.11 – Примерная структура ННС

В [224] автором совместно с соавторами представлено описание работы ННС, приведенной на рисунке 1.11, которая состоит из 5 слоев и имеет три влияющих фактора x_1, x_2, x_3 .

Нейроны слоя 1 рассчитывают значения функций принадлежности $L_1, L_2, L_3, H_1, H_2, H_3$ при определенных значениях входов $x_1 = a_1, x_2 = a_2, x = a_3$.

На слое 2 сравниваются значения функций принадлежности для каждого правила и находится минимальное из них по формулам:

$$\begin{aligned}
\alpha_1 &= L_1(a_1) \wedge L_2(a_2) \wedge L_3(a_3) = \min(L_1(a_1), L_2(a_2), L_3(a_3)); \\
\alpha_2 &= H_1(a_1) \wedge H_2(a_2) \wedge L_3(a_3) = \min(H_1(a_1), H_2(a_2), L_3(a_3)); \\
\alpha_3 &= H_1(a_1) \wedge H_2(a_2) \wedge H_3(a_3) = \min(H_1(a_1), H_2(a_2), H_3(a_3)).
\end{aligned}
\tag{1.6}$$

Выходами нейронов данного слоя (обозначены на рисунке 1.11 буквами T) являются значения степени истинности предпосылок каждого правила.

Нейроны слоя 3 (обозначены на рисунке 1.11 буквами N) выполняют расчет величин:

$$\begin{aligned}
\beta_1 &= \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}; \\
\beta_2 &= \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}; \\
\beta_3 &= \frac{\alpha_3}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}.
\end{aligned}
\tag{1.7}$$

Нейроны слоя 4 определяют частные выходы:

$$\begin{aligned}
\beta_1 z_1 &= \beta_1 H^{-1}(a_1); \\
\beta_2 z_2 &= \beta_2 M^{-1}(a_2); \\
\beta_3 z_3 &= \beta_3 S^{-1}(a_3).
\end{aligned}
\tag{1.8}$$

где H , M , S – функции принадлежности на выходе, z – частный выход системы.

Единственный нейрон слоя 5 вычисляет выход сети по формуле:

$$z_0 = \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \beta_3 z_3. \tag{1.9}$$

Таким образом, в структуре ННС выводы делаются на основе нечетких систем, а для нахождения параметров функций принадлежности используются алгоритмы обучения искусственной нейронной сети [130].

Известен пример сравнения математических моделей, реализующих суточное прогнозирование величины нагрузки в электрической системе на основе таких факторов, как ежедневная вырабатываемая электроэнергия, перетоки активной мощности и температура окружающей среды, являющихся входными переменными [131]. При этом наименьшую среднюю относительную погрешность

имела модель, основанная на ННС. В целом модели, основанные на ННС, демонстрируют хорошие результаты при планировании и нормировании расхода ТЭР [45, 132 – 138].

1.3 Анализ подходов к организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте

В настоящем разделе рассмотрена существующая методология организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте; при этом под методологией понимаются принципы и способы организации теоретической и практической деятельности [318] в области повышения энергоэффективности железнодорожного транспорта.

В связи с тем, что основной функцией железнодорожного транспорта является осуществление грузовых и пассажирских перевозок, наибольшее внимание как в практической деятельности ОАО «РЖД», так и в отраслевых научных школах уделяется методам организации ресурсосберегающих производственных систем в перевозочном процессе, связанном с тягой поездов.

Вопросами анализа, прогнозирования и нормирования расхода ТЭР на тягу поездов занимались А. А. Бакланов, В. Н. Игин, А. Н. Митрофанов, В. С. Молярчук, Л. А. Мугинштейн, Е. А. Сидорова, В. Т. Черемисин, а также другие отечественные и зарубежные ученые [9 – 11, 46 – 48, 139 – 147].

В перевозочном процессе широкое распространение получил метод анализа и прогнозирования расхода ТЭР, основанный на уравнении тягово-энергетического баланса, а также на общих формулах и положениях тяговых расчетов [148]. Согласно этому уравнению техническая норма удельного расхода электроэнергии b , кВт·ч/10 тыс. т·км брутто, определяется по формуле [150]:

для локомотива –

$$b = \frac{10000}{Q\eta} \left(K_x K_{b_x} \frac{N_{KH}}{V_{mex}} + \frac{K_{TC} - K_x K_{b_x}}{367,2} (P + Q)(w_0 + i) \right), \quad (1.10)$$

для секции МВПС –

$$b = \frac{10000}{\eta} \left(K_x K_{b_x} \frac{N_{KH}}{Q_c V_{mex}} + \frac{K_{TC} - K_x K_{b_x}}{367,2} (w_0 + i) \right), \quad (1.11)$$

где Q – средняя масса поезда, т;

Q_c – средняя масса секции моторвагонного подвижного состава (МВПС), т;

η – номинальный коэффициент полезного действия электроподвижного состава (ЭПС);

K_x – коэффициент использования мощности вспомогательного оборудования ЭПС на холостом ходу;

K_{TC} – коэффициент технического состояния ЭПС;

K_{b_x} – коэффициент, характеризующий относительный расход электроэнергии на холостом ходу;

N_{KH} – номинальная касательная мощность ЭПС, кВт;

V_{mex} – средняя техническая скорость движения, км/ч;

P – сцепной вес локомотива, т;

w_0 – основное удельное сопротивление движению поезда, кгс/т;

i – дополнительное удельное сопротивление движению поезда от уклона, ‰.

Отдельно могут нормироваться расход электроэнергии на отопление пассажирских вагонов в пути следования, удельный возврат электроэнергии при рекуперативном торможении. В ряде случаев рассчитываются непроизводительные потери энергии, связанные с горячим простоем ЭПС, задержками у запрещающих сигналов, неграфиковыми остановками, нагоном опоздания пассажирских поездов и другими факторами [151].

Такой подход не учитывает ретроспективные данные о расходе электроэнергии и соответствующих ему показателях работы ЭПС. Поэтому в настоящее время он находит применение при решении задач построения энергооптимальных графиков движения поездов, анализа расхода электроэнергии и определения степени влияния нормообразующих факторов на уровень удельного расхода ТЭР на

тягу поездов [142, 149, 150].

Для решения задачи прогнозирования расхода энергии на тягу поездов в действующей методике [150] применяется метод экстраполяции временных рядов, который заключается в распространении тенденций, установленных в прошлом, на будущий период. Построение временного тренда выполняется на основе исходных данных об изменении прогнозируемого показателя за базовый период. В качестве базового выбирается аналогичный прогнозному прошлый календарный период. При этом в базовый период обязательно включаются соответствующие данные за год, предшествующий прогнозному.

При анализе показателей энергетической эффективности тяги поездов (УРЭ, УРД и др.) ЦЭУ ОАО «РЖД» оцениваются следующие факторы: объем перевозочной работы; объем энергии рекуперации; изменение расхода ТЭР за счет эксплуатационных показателей; изменение парка локомотивов; иные факторы, оказывающие влияние на показатели энергоэффективности.

Данная работа проводится ЦЭУ ежемесячно в оперативном режиме по видам движения (грузовое, пассажирское, хозяйственное, маневровое). При этом оценивается соответствие достигнутых показателей не только норме, но и праву расхода ТЭР. Под термином «право расхода ТЭР» понимается норма расхода ТЭР, определенная для фактически достигнутых за рассматриваемый период значений влияющих факторов.

В таблице 1.2 приведен анализ выполнения заданий по расходу электрической энергии и дизельного топлива на тягу поездов в сравнении с правом расхода за 2017 г.

В целом сложившаяся система нормирования и планирования расхода ТЭР на тягу поездов является достаточно эффективной. Как видно из рисунка 1.12, расхождение между правом расхода ТЭР и фактическим значением в большинстве случаев не превышает 5 %. Средняя относительная погрешность составила 1,29 % и 1,24 % для электрической и дизельной тяги соответственно.

Таблица 1.2 – Анализ выполнения заданий по расходу электрической энергии и дизельного топлива на тягу поездов за 2017 г. (в процентах к праву расхода)

Полигон железной дороги	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Электрическая энергия												
ОЖД	-1,9	0,3	-0,3	-0,4	-0,5	-1,4	-1,3	-1,3	-1,1	-1,2	-1,8	0,0
КлгЖД	-5,8	-0,8	-6,4	-1,8	-4,5	-5,2	-1,1	-3,3	1,4	-8,5	-6,8	-2,1
МЖД	-4,2	-2,9	-0,6	-1,8	-3,4	-2,5	-1,7	-0,2	-0,1	-0,3	-0,5	-2,0
ГЖД	0,4	-2,4	0,54	-0,1	0,2	-2	1	-1,4	0,4	1,3	-1,6	-1,7
СЖД	-0,9	-0,1	-0,2	1,7	2,3	-4,1	1,1	0,6	-1,7	0	0	-0,2
СКЖД	-1,956	2	-0,2	0,7	-1,9	0,8	-0,7	-1,9	-2,27	-1,3	-2	-2,3
ЮВЖД	0	2,9	0,6	0,4	0,4	0,4	-0,7	0,9	0,7	0,8	-1,4	-4,4
ПривЖД	-1,7	0,1	-0,4	0	-1,9	0,3	0,4	-1,5	-1,7	-0,2	-3,8	-0,2
КбшЖД	-1	3,8	-1,4	1,5	-0,2	-0,8	0,6	-1,3	-1,1	1	-1,5	-1,3
СвЖД	-1,4	1,7	-0,6	3,4	-0,5	-2,6	0,9	-1,4	-0,02	1,6	-1,8	-1,5
ЮУЖД	-2,4	3,9	-1,4	0	0,2	-0,4	1,4	-0,6	-1,3	2,4	-2,1	-2,9
ЗСЖД	-0,16	0,8	-1,83	1,3	-1,6	-0,5	0,5	-0,6	-0,1	-0,2	-0,9	-2,2
КярЖД	-1	-2,3	-0,1	0	-1,5	-0,7	3	-0,1	-3,1	0,5	-0,1	-2,2
ВСЖД	-0,6	-0,5	-0,1	-0,2	-0,2	-1	1,2	-0,7	-0,2	-0,4	0,011	0,2
ЗабЖД	-1,4	-2,5	-0,45	0,7	-1,3	-0,1	0,34	-0,19	-0,2	-0,02	-0,06	-1,5
ДВЖД	-0,21	-0,8	-1,6	-0,4	-1,1	-1,8	-0,51	1,51	-1,7	0	2,8	-3,0
ОАО «РЖД» в целом	-1,2	0	-0,5	0,5	0,0	-1,1	0,5	-0,5	-0,6	0,2	-0,8	-1,6
Дизельное топливо												
ОЖД	-1,3	0,9	-2,4	-0,3	0,6	-0,9	-0,23	-0,47	-1,2	-0,6	-0,4	-0,3
КлгЖД	-2,8	-1,1	1	2,4	-0,6	-4,9	-0,1	-0,7	-0,7	-2,7	-0,6	-0,4
МЖД	-1,4	-4,5	-1,5	0	-0,1	-3,4	-1,2	-0,8	-1,9	-0,4	-3,1	-1,7
ГЖД	-0,7	-0,7	-0,5	3,4	-0,2	-3	-0,9	-0,4	0,2	-0,6	-0,1	-1
СЖД	-0,2	0	-2,7	-0,3	0,6	-2,7	0	0,1	-0,6	-0,2	-1,1	-1,1
СКЖД	-0,9	-2,6	-0,9	-1,2	-1,6	1	1,4	-1,4	-3,3	-2,3	-0,8	-2,1
ЮВЖД	-0,4	-2,9	1	-1,7	0,2	-1,7	-1	1,3	-0,6	2,4	-2,5	-1,5
ПривЖД	-0,1	0,8	-2,4	-0,8	-0,8	0,4	1,9	-1,2	-1,4	-1,7	-1,4	0,4
КбшЖД	0,1	-2,2	-2,9	-1,6	-0,2	-0,6	0,2	-0,2	0,8	-3,4	-0,8	-1
СвЖД	-2,1	-1,8	-0,2	1,1	-0,1	-1	-0,9	-0,5	-0,5	0,7	-1,2	-2,5
ЮУЖД	-7,2	0,1	0,2	1,4	-0,1	1	1,3	-0,4	-2,4	0,3	-1,1	0
ЗСЖД	-1,6	-2	-1,1	-0,02	-1,3	-0,8	-1,5	-0,9	-1,6	-0,1	-0,5	-2,4
КярЖД	-2,5	-4,7	0,4	2	-1,8	-0,5	-1,2	-1,6	-1,9	-1,3	-1,6	-2,7
ВСЖД	-1,4	-0,8	-0,91	-0,1	0,7	-2,1	0,4	-0,9	-0,7	-0,7	-0,6	-3
ЗабЖД	-1,0	-1,1	-3,5	0,2	0,2	-2,3	-3,3	0,5	2,1	-0,8	-3,05	-0,3
ДВЖД	-0,7	0,2	-1,1	-1,1	1,8	-1,3	-0,1	0	-0,4	2	-1,7	-1,3
ОАО «РЖД» в целом	-1,0	-0,8	-1,4	-0,3	0,4	-1,2	-0,1	-0,3	-0,6	0,5	-0,9	-1

Необходимо отметить, что использование указанного метода для прогнозирования основных укрупненных показателей использования ТЭР на тягу поездов на долгосрочную перспективу и для оценки энергоэффективности внедряемых ресурсосберегающих решений в производственном процессе не всегда оправдано, так как формулы (1.10), (1.11) целесообразно применять для отдельной поездки.

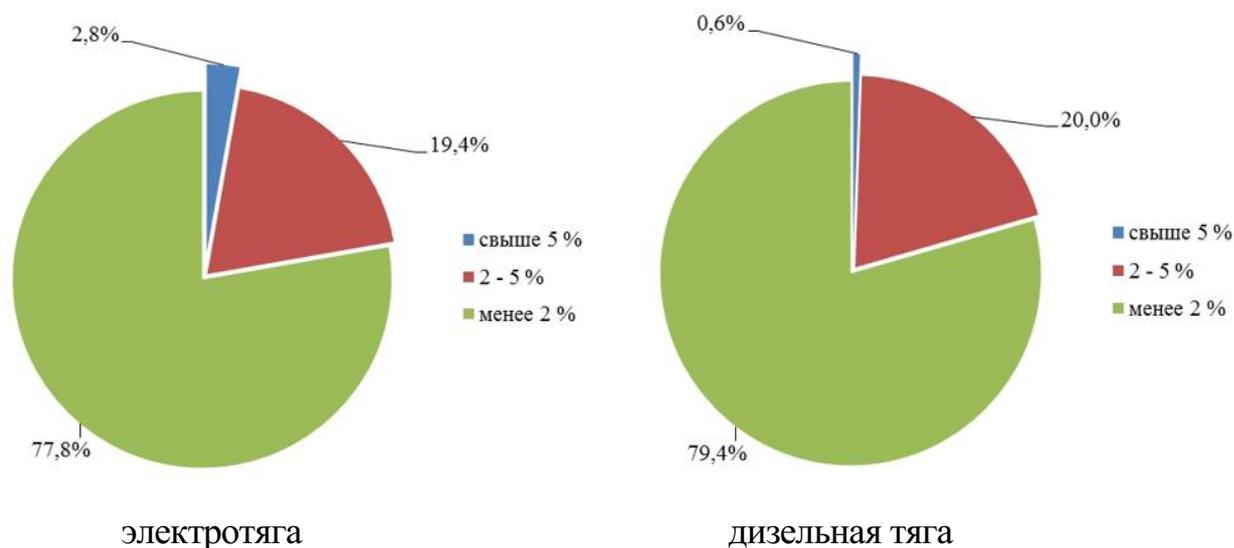


Рисунок 1.12 – Расхождение между правом и фактом расхода ТЭР на тягу поездов за 2017 г.

Таким образом, проблема организации ресурсосберегающих производственных систем в перевозочном процессе является достаточно проработанной.

В то же время процессам использования ТЭР в неперевозочных видах деятельности (так называемый расход ТЭР на «нетяговые нужды») как в отечественных, так и зарубежных исследованиях уделяется значительно меньше внимания.

В разное время на железнодорожном транспорте находили применение следующие методы и принципы анализа, нормирования и прогнозирования расхода ТЭР в неперевозочных видах деятельности.

Метод, основанный на нормировании по укрупненным показателям.

Данный метод предусматривает нормирование расхода электрической энергии в неперевозочных видах деятельности по укрупненным показателям. Данные методики разработаны Всероссийским научно-исследовательским институтом

железнодорожного транспорта для различных видов хозяйственной деятельности железнодорожного транспорта [152 – 160].

В качестве укрупненных показателей производственной деятельности принимались объем перевозочной работы в 10000 т·км бр. или условная единица производства (кВт·ч/усл. локомотив, кВт·ч/условный вагон, кВт·ч/МВт·ч и т.п.). Данные подходы коррелируют с методами, изложенными в [161].

В указанных методиках представлены эмпирические зависимости расхода электрической энергии от значений укрупненных показателей с учетом коэффициента сезонности, полученные в результате анализа процесса электропотребления стационарных объектах по сети железных дорог.

В [72, 162] автором выполнен анализ возможности применения указанных методик для нормирования расхода ТЭР.

Например, удельный расход электрической энергии для пассажирских вагонных депо определяется по выражению [155]:

$$w_{лв} = k_г \cdot \left(690 + \frac{240000}{n_{лв}} \right), \quad (1.12)$$

где $k_г$ – коэффициент, учитывающий влияние объема ремонтных работ и технического обслуживания вагонов на электропотребление;

$n_{лв}$ – число условных (приведенных) вагонов, обслуживаемых депо, участком или пунктом технического обслуживания за планируемый период.

Расход электрической энергии определяется по формуле:

$$W_{лв} = w_{лв} \cdot n_{лв}. \quad (1.13)$$

Удельный расход электроэнергии $w_т$ для локомотивного депо [153] определяют из выражения:

$$w_m = k_c \cdot \left(5170 + \frac{784000}{n_{mг}} \right), \quad (1.14)$$

где k_c – коэффициент сезонности, значение которого определяется согласно [120];

$n_{mг}$ – объем работы локомотивного депо, условных локомотивов.

Расход электроэнергии на нетяговые нужды локомотивного депо определяется по формуле:

$$W_{cm} = w_m \cdot n_{mz}. \quad (1.15)$$

Преимуществом указанных методик является их относительная простота.

Недостатком их является невозможность учета влияния большого количества производственных и климатических факторов на расход ТЭР. Кроме того, как показано автором в [162], использование данных методик приводит к существенному расхождению результатов месячного, квартального и годового прогнозирования. Особенностью методик является то, что они опираются на эмпирические зависимости, полученные в целом по сети дорог, и не учитывают специфику конкретного СП. Также следует отметить, что методики не позволяют учесть влияние нового современного энергосберегающего оборудования, которое в последнее время внедряется на железнодорожном транспорте, на расход ТЭР.

Поэтому метод нормирования расхода электроэнергии по укрупненным показателям в настоящее время в ОАО «РЖД» не применяется.

При планировании расхода других видов ТЭР используется методика [163]. Определение планового расхода ТЭР осуществляется расчетно-аналитическим методом на основе технических характеристик используемого энергопотребляющего или генерирующего оборудования [164]. Аналогичный подход изложен в работах [165, 166]. В целом указанные методы демонстрирует хорошие результаты при планировании расхода ТЭР в рамках отдельного СП, однако обладает теми же недостатками, что и все методы, рассматривающие энергопотребление как детерминированный процесс.

Метод, основанный на нормировании по бюджетным статьям доходов и расходов.

Идея данного метода состоит в организации постоянного достоверного планирования затрат на ТЭР в рамках системы бюджетного управления в ОАО «РЖД» [167, 168]. В рамках реализации этого подхода ОмГУПСом в 2008 г. осуществлена энергоэкономическая паспортизация структурных подразделений

ОАО «РЖД».

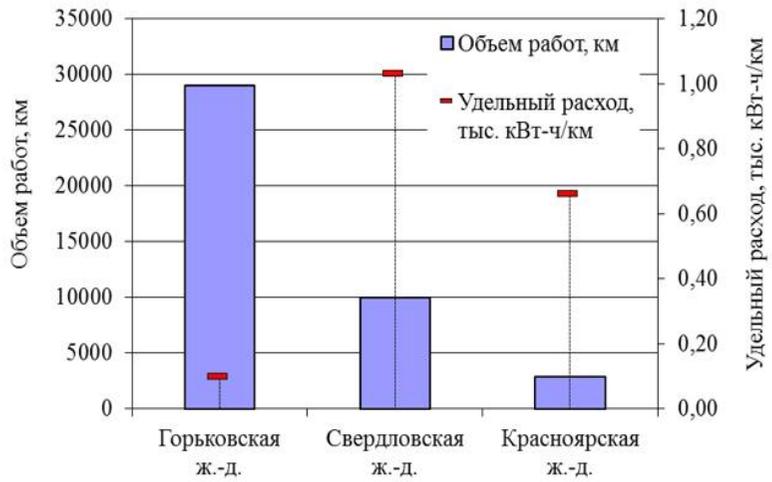
Основной акцент в энергоэкономическом паспорте сделан на представление показателей деятельности структурного подразделения в разрезе статей действующей номенклатуры доходов и расходов. Например, при анализе расхода электрической энергии по СП хозяйства пути в границах Горьковской, Свердловской и Красноярской ж.д. выявлено 28 статей бюджетных расходов, на которые относятся затраты на электрическую энергию. Среди них можно выделить четыре наиболее энергоемкие, на которые приходится 74 % от общего электропотребления (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Наиболее энергоемкие статьи, на которые относится расход электрической энергии по хозяйству пути в границах Горьковской, Свердловской и Красноярской железных дорог

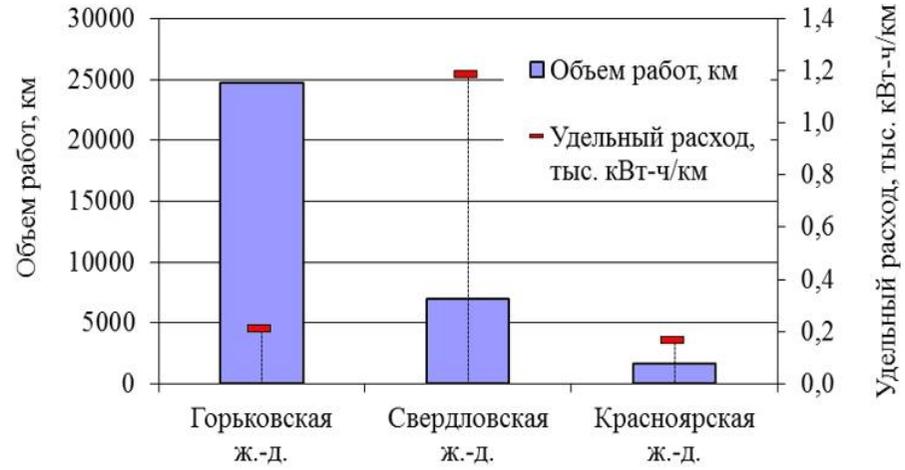
№ п/п	Номер статьи	Наименование статьи	Измеритель	Доля расхода электроэнергии, %
1	2101	Текущее содержание пути и постоянных устройств	1 км	18,6
2	2106	Работы по снего-; водо-; и пескоборьбе	1 км	16,9
3	765	Содержание и эксплуатация оборудования, кроме оборудования и объектов природоохранного назначения	% от стоимости материалов, израсходованных на основное производство	5,2
4	768	Обслуживание и текущий ремонт зданий, сооружений и инвентаря производственного назначения	1 м ²	33,3

На основе представленных данных рассчитывается удельный расход электрической энергии в расчете на измеритель (рисунок 1.13), который в дальнейшем устанавливается в качестве норматива для данного подразделения.

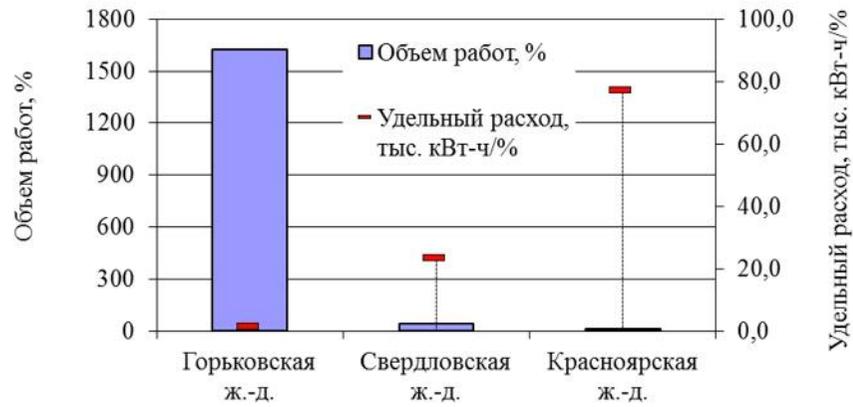
Такой подход дает возможность сравнительного анализа энергетической эффективности подразделений. Например, по статье 2101 «Текущее содержание пути и постоянных устройств» удельный расход по железным дорогам отличается более чем в 10 раз (0,09 кВт·ч/км – Горьковская ж.д., 1,03 кВт·ч/км – Свердловская ж.д., 0,66 кВт·ч/км – Красноярская ж.д.).



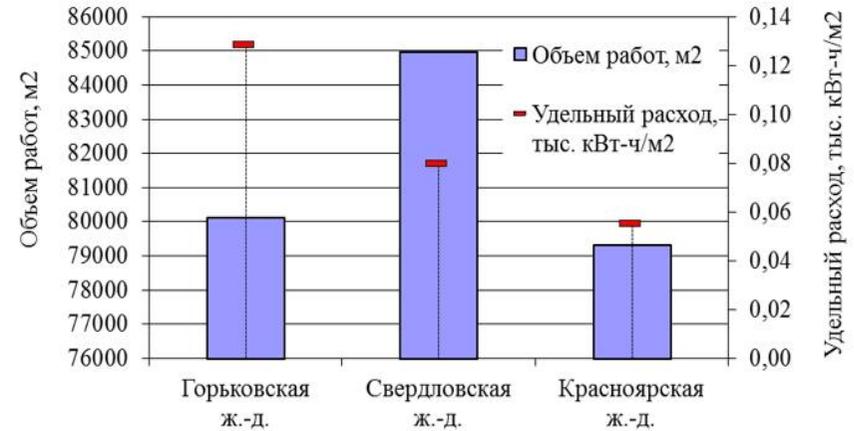
а



б



в



г

Рисунок 1.13 – Удельный расход электрической энергии по статьям расходов: а – 2101, б – 2106, в – 765, г – 768

Такое расхождение частично может быть объяснено различием климатических условий и объемов выполняемых работ. В то же время по статье 768 «Обслуживание и текущий ремонт зданий, сооружений и инвентаря производственного назначения» удельный расход Горьковской ж.д. оказывается в 1,5 – 2 раза выше, чем у Красноярской и Свердловской ж.д.

В целом применение такого подхода может быть оправдано для установления целевых показателей энергоэффективности по бюджетным статьям в рамках СП и для нахождения наиболее проблемных СП с точки зрения энергоэффективности, однако организация системы планирования и нормирования расхода ТЭР представляется затруднительной по следующим причинам:

1) в границах СП разделение расхода ТЭР по статьям затрат зачастую осуществляется достаточно вольно, без должного обоснования, что неизбежно может привести к искажению показателей энергопотребления;

2) метод не учитывает влияние климатических показателей, изменение состава энергопотребляющего оборудования, а также возможные нелинейные зависимости между расходом ТЭР и влияющими факторами.

Кроме того, данный метод отличается значительной трудоемкостью.

Метод, основанный на нормировании в расчете на единицу конечной продукции.

Известен опыт Свердловской ж.д. по планированию расхода ТЭР в расчете на единицу продукции. Правовой основой внедрения данной методики является распоряжение [319].

На основе указанной методики в 2009 – 2010 гг. Свердловской ж.д. совместно с ОмГУПСом проведены исследования, направленные на оценку возможности использования метода нормирования в расчете на единицу продукции на примере СП вагонного хозяйства железной дороги [169].

Для большей детализации и объективности предложено организовать систему нормирования расхода ТЭР по направлениям их использования.

Выбор измерителей работы для каждого направления использования ТЭР должен основываться на следующих принципах:

1) для каждого направления должен быть единый измеритель конечной продукции;

2) измеритель готовой продукции должен быть отражен в существующей статистической отчетности железной дороги;

3) объем работы по рассматриваемому направлению должен подлежать достоверному прогнозированию.

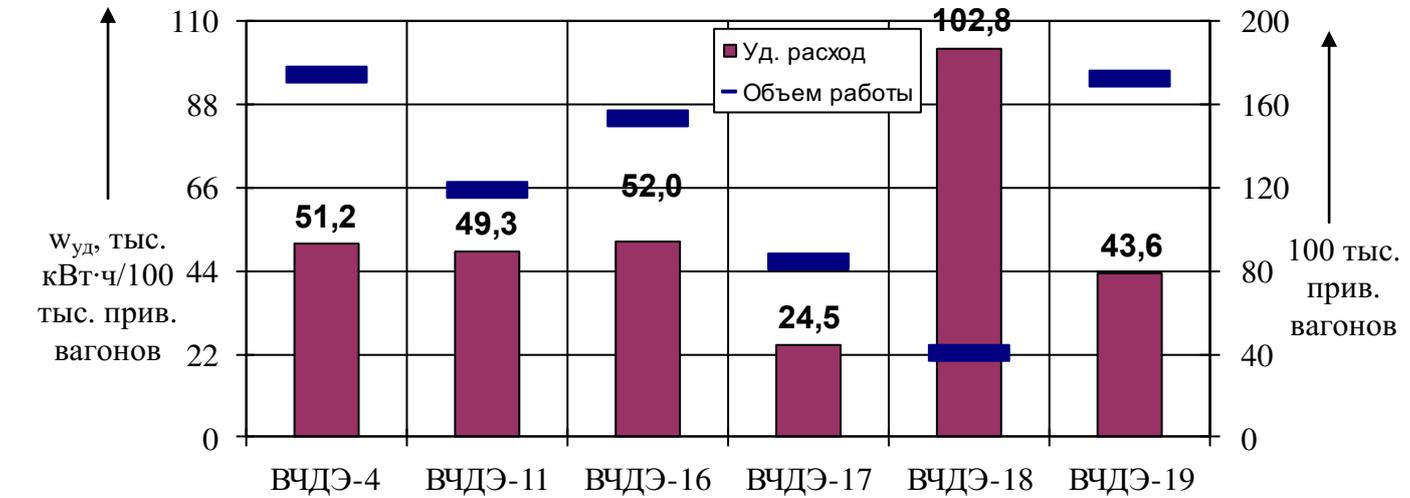
Количество направлений использования ТЭР в границах каждого СП должно быть достаточным для достоверного отражения особенностей производственного процесса энергопотребления.

Перечень выбранных направлений использования ТЭР и измерителей работы для СП вагонного хозяйства представлен в таблице 1.4.

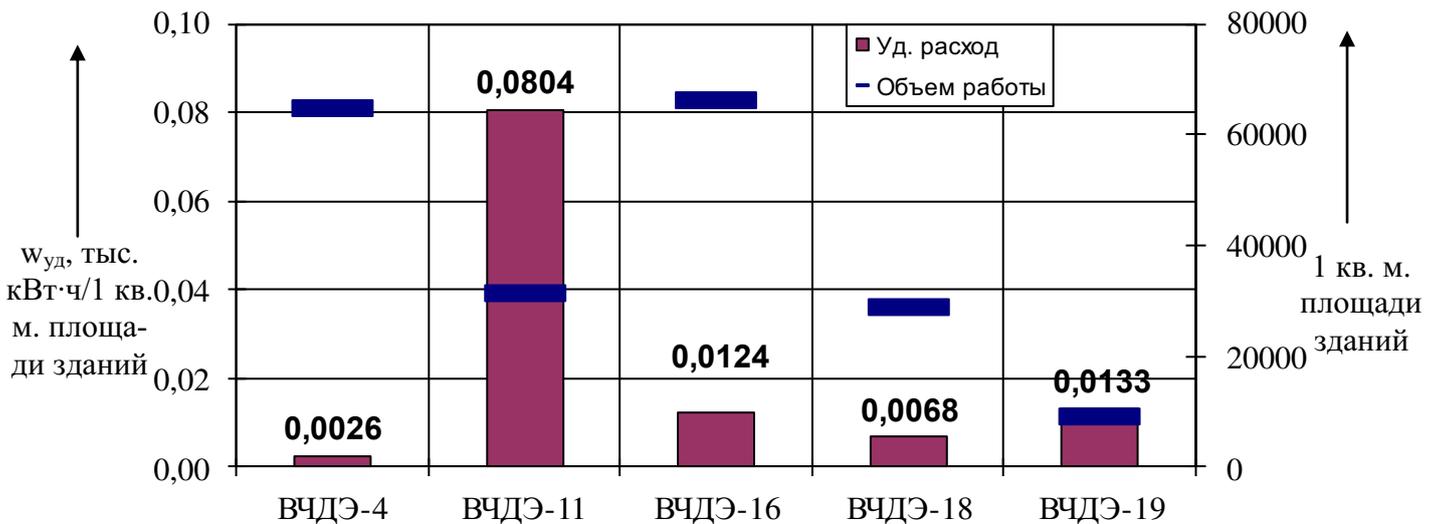
Таблица 1.4 – Перечень измерителей продукции для СП вагонного хозяйства Свердловской железной дороги

№ п/п	Вид ТЭР	Направления использования ТЭР	Измеритель работы
1	Электроэнергия	Пункты технического обслуживания (ПТО), текущего отцепочного ремонта (ТОР), специализированные пути ремонта вагонов (СПРВ)	100 тыс. прив. вагонов
2		Административные и служебно-технические здания	1 кв. м. площади зданий
3	Дизельное топливо, бензин	Расход на нужды автотранспорта	100 км пробега
4	Дизельное топливо	Расход на нужды автотракторной техники	1 мото-час
5	Тепловая энергия от сторонних источников	Административные и служебно-технические здания, отапливаемые от сторонних источников	1 кв. м. площади отапливаемых зданий
6	Уголь	Административные и служебно-технические здания с печным отоплением	1 кв. м. площади зданий
7		Экипировка пассажирских вагонов	1 пасс. вагон

На рисунке 1.14 приведен пример анализа удельного расхода электроэнергии вагонными эксплуатационными депо Свердловской ж. д.



а



б

Рисунок 1.14, лист 1 – Анализ удельного расхода ТЭР в расчете на единицу продукции вагонных эксплуатационных депо Свердловской ж.д:

а – расход электроэнергии в зданиях и на объектах ПТО, ТОР, СПРВ, которые непосредственно связаны с техобслуживанием и ремонтом вагонов, в расчете на 100 тыс. прив. вагонов; б – расход электроэнергии в зданиях и на объектах, не связанных с техобслуживанием и ремонтом вагонов, в расчете на 1 кв. м. площади указанных зданий; в – общий расход электроэнергии в расчете на укрупненный измеритель работы 100 тыс. прив. вагонов.

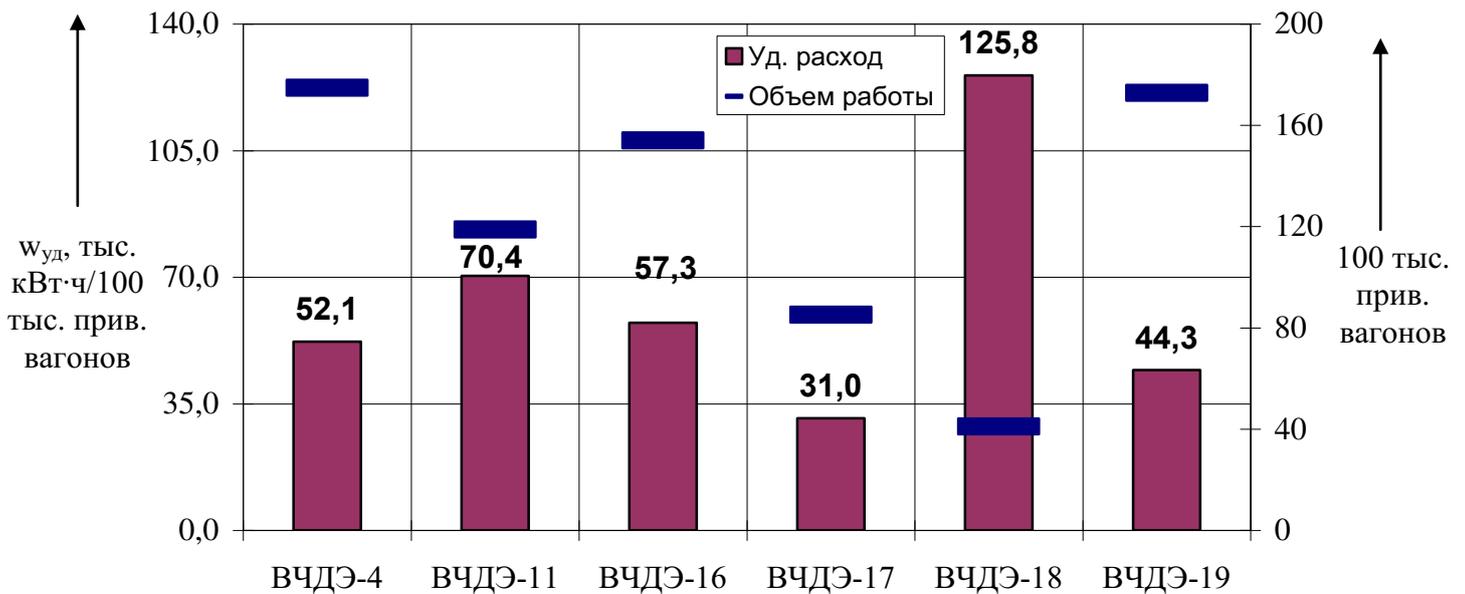


Рисунок 1.14, лист 2 – Анализ удельного расхода ТЭР в расчете на единицу продукции вагонных эксплуатационных депо Свердловской ж.д:

а – расход электроэнергии в зданиях и на объектах ПТО, ТОР, СПРВ, которые непосредственно связаны с техобслуживанием и ремонтом вагонов, в расчете на 100 тыс. прив. вагонов; б – расход электроэнергии в зданиях и на объектах, не связанных с техобслуживанием и ремонтом вагонов, в расчете на 1 кв. м. площади указанных зданий; в – общий расход электроэнергии в расчете на укрупненный измеритель работы 100 тыс. прив. вагонов.

Например, наибольший удельный расход электроэнергии в расчете на укрупненный измеритель работы наблюдается в ВЧДЭ-18 (125,8 тыс. кВт·ч/100 тыс. прив. вагонов), что в 4,1 раза больше, чем в ВЧДЭ-17. Следовательно, при дальнейших исследованиях показателей энергоэффективности следует уделить первоочередное внимание производственному процессу в этом СП.

Тем не менее, применение указанной методики для целей нормирования расхода ТЭР не всегда демонстрирует удовлетворительные результаты. Так, в первом квартале 2010 г. по СП службы пути Свердловской ж.д. наблюдается значительное расхождение нормируемого и фактического удельного расхода электрической энергии (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Результаты нормирования расхода электрической энергии по СП службы пути Свердловской ж.д. в первом квартале 2010 г.

Наименование СП	Объем выполненных работ, 100 приведенных км пути	Удельный расход электроэнергии условном исчислении, т у.т./изм.		Расхождение, %
		план	факт	
1	2	3	4	5
ПЧ-1	3,9	35,5	43,6	22,8
ПЧ-2	4,5	58,2	75,7	30,0
ПЧ-3	3,4	24,7	26,5	7,1
ПЧ-4	4,0	47,9	54,4	13,6
ПЧ-14	5,0	28,7	29,5	2,7
ПЧ-16	4,9	30,5	32,2	5,6
ПЧ-5	3,6	59,0	65,8	11,6
ПЧ-6	4,0	41,4	41,0	-0,8
ПЧ-7	4,3	43,8	51,0	16,4
ПЧ-8	3,7	54,4	59,6	9,6
ПЧ-9	2,5	41,3	45,8	11,1
ПЧ-10	3,2	39,2	43,5	11,0
ПЧ-25	5,3	42,0	43,8	4,2
ПЧ-26	4,3	12,8	10,6	-17,1
ПЧ-11	3,9	61,1	61,6	0,7
ПЧ-12	5,1	81,3	109,8	35,1
ПЧ-13	5,5	28,1	29,0	3,4
ПЧ-28	4,3	49,4	49,0	-0,9
ПЧ-17	5,8	93,0	104,1	11,9
ПЧ-19	3,4	13,9	17,1	22,8
ПЧ-20	6,6	22,9	22,3	-2,6
ПЧ-22	5,6	12,9	15,8	22,9
ПЧ-29	4,5	13,7	16,1	17,0
ПЧ-31	2,7	45,6	56,4	23,6
ПЧ-32	2,9	21,7	25,3	16,9
ПЧ-33	3,9	18,6	23,1	24,2
ПЧ-34	2,7	22,2	20,2	-8,9
Итого	113,5	39,2	44,1	12,4

Относительная погрешность планирования по отдельным СП (например, ПЧ-2, ПЧ-12) превышает 25 %, а в целом по службе пути составила 12,4 %. Основной причиной такого расхождения является применение в качестве влияющего фактора только одного производственного показателя, а природно-климатические

факторы, изменение состава электрооборудования не учитываются.

Метод нормирования «от достигнутого уровня».

Вследствие перечисленных выше причин (сложность, трудоемкость, невысокая точность существующих методик планирования) актуальным для железнодорожного транспорта остается метод нормирования и прогнозирования расхода ТЭР на нетяговые нужды от уровня расхода ТЭР за базовый, предшествующий расчетному период (так называемый метод «от достигнутого уровня»).

Основным недостатком данного метода является недостаточно точный учет влияния производственных и климатических факторов на расход ТЭР. Кроме того, в рассмотрение принимается только расход ТЭР за базовый период, а динамика его изменения за предшествующие временные периоды не учитывается. В результате установление норм (лимитов) расхода ТЭР с использованием данного метода может приводить к значительным погрешностям.

Например, в 2009 и 2010 гг. Омским государственным университетом путей сообщения проводились исследования точности прогнозирования расхода электрической энергии локомотивными ремонтными депо Дирекции по ремонту тягового подвижного состава (ТР) Южно-Уральской ж.д.

Результаты показывают, что в 2009 г. в двух СП наблюдалась значительная погрешность планирования (ТЧР-23 и ТЧР-26 – (-21,1) % и (-14,8) % соответственно). В 2010 г. практически для всех СП имело место неэффективное планирование с погрешностями, превышающими в отдельных случаях 40 %.

В целом за рассматриваемый период (2009 – 2010 г.) СП ТР потребили 53 млн кВт·ч, что меньше лимита расхода ТЭР на 25,2 %.

Аналогичные исследования, проведенные на Западно-Сибирской железной дороге в 2015 г., также продемонстрировали сравнительно невысокую точность планирования расхода электрической энергии методом «от достигнутого уровня» (таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Результаты нормирования расхода электрической энергии структурных подразделений в границах Западно-Сибирской ж.д. на 2015 г.

Наименование СП	Расход электроэнергии, тыс. кВт·ч		Расхождение, %
	план	факт	
1	2	3	4
ДЦС-1 Омск	8043,0	7443,8	7,4
ДС Московка	1797,0	1578,6	12,2
ДС Входная	1637,0	1524,7	6,9
ДЦС-2 Новосибирск	11235,0	10978,0	2,3
ДС Новосибирск-Главный	644,0	571,7	11,2
ДС Инская	3414,0	3120,3	8,6
ДЦС-3 Тайга	8304,0	8109,1	2,3
ДЦС-4 Алтай	10012,0	9988,9	0,2
ДС Алтайская	2663,0	2397,5	10,0
ДЦС-5 Белово	8565,0	8339,8	2,6
ДЦС-6 Новокузнецк	9436,0	9065,4	3,9
ИТОГО: Д	65750,0	63117,8	4,0
Моторвагонное депо Омск	463,0	406,8	12,1
Моторвагонное депо Новосибирск	2099,0	1764,5	15,9
Моторвагонное депо Новокузнецк	991,0	964,9	2,6
Моторвагонное депо Алтайская	2210,0	2156,2	2,4
ИТОГО: ДМВ	5763,0	5292,4	8,2
МЧ-1 Омск	1549,0	1479,0	4,5
МЧ-2 Новосибирск	1670,0	1576,3	5,6
МЧ-3 Кемерово	2648,0	2515,3	5,0
МЧ-4 Барнаул	1420,0	1375,2	3,2
ИТОГО: ДМ	7287,0	6945,8	4,7
ГМС	564,2	519,4	7,9
ОМТО-1	532,1	506,2	4,9
ОМТО-2	510,8	452,3	11,5
ОМТО-3	1294,6	1110,5	14,2
ОМТО-4	319,4	306,9	3,9
ИТОГО: ДМТО	3221,0	2895,2	10,1
ПМС-2	773,0	722,1	6,6
ОПМС-19	1587,0	1503,6	5,3
ПМС-20	2578,0	2341,7	9,2
ПМС-22	1189,0	1144,4	3,8
ПМС-177	1524,0	1428,6	6,3
ПМС-216	513,0	437,8	14,7
ПМС-239	595,0	516,8	13,1

Продолжение таблицы 1.6

1	2	3	4
ВЧД-4	1133,0	1050,4	7,3
ИТОГО: ДРП	9892,0	9145,4	7,5
ДТВу-1	5296,8	5173,0	2,3
ДТВу-2	7788,8	6980,8	10,4
ДТВу-3	10018,8	9835,5	1,8
ДТВу-4	6113,8	6011,2	1,7
ИТОГО: ДТВ	29218,3	28000,5	4,2
ИВЦ	2491,0	2307,3	7,4
ИТОГО: ИВЦ	2491,0	2307,3	7,4
РЦС-1	2232,0	2215,7	0,7
РЦС-2	1998,2	1997,5	0,0
РЦС-3	3370,2	3213,2	4,7
РЦС-4	2781,3	2704,5	2,8
РЦС-5	583,7	575,6	1,4
ИТОГО: НС	10965,4	10706,5	2,4
РДЖВ	13873,0	13375,2	3,6
ИТОГО: РДЖВ	13873,0	13375,2	3,6
ТЧЭ-2 Омск	365,1	307,8	15,7
ТЧЭ-3 Барабинск	304,7	225,1	26,1
ТЧЭ-4 Новосибирск	993,0	987,6	0,5
ТЧЭ-7 Барнаул	752,5	739,5	1,7
ТЧЭ-10 Карасук	198,3	149,6	24,6
ТЧЭ-12 Тайга	336,0	300,5	10,6
ТЧЭ- 14 Белово	933,2	893,6	4,2
ТЧЭ- 15 Новокузнецк	880,7	833,0	5,4
ТЧЭ-19 Топки	141,5	124,8	11,8
ИТОГО: Т	4905,0	4561,6	7,0
АФТО - Омск	74,8	81,0	-8,3
АФТО - Новосибирск	56,5	57,1	-0,9
АФТО - Алтай	256,6	252,5	1,6
ИТОГО: ТЦФТО	388,0	390,637	-0,7
Энергосбыт	106,6	106,3	0,2
ИТОГО: Трансэнерго	106,6	106,3	0,2
ДПО Омск	1744,0	1639,1	6,0
ДПО Новосибирск	3358,6	3198,9	4,8
ДПО Новокузнецк	2995,1	2907,7	2,9
ДПО Алтайская	2018,2	1988,2	1,5
ИТОГО: ДПО	10116,0	9733,8	3,8
ЭЧ-1 Входная	13022,0	12774,0	1,9
ЭЧ-2 Омск	8470,0	9135,2	-7,9

Продолжение таблицы 1.6

1	2	3	4
ЭЧ-5 Барабинск	11550,0	12806,4	-10,9
ЭЧ-6 Новосибирск	11775,0	13489,0	-14,6
ЭЧ-7 Тайга	12139,0	12049,1	0,7
ЭЧ-8 Инская	12807,0	14459,5	-12,9
ЭЧ-9 Алтайская	10269,0	9802,2	4,5
ЭЧ-10 Барнаул	2583,0	2355,0	8,8
ЭЧ-13 Камень на Оби	8594,0	8539,6	0,6
ЭЧ-14 Карасук	5072,0	5592,1	-10,3
ЭЧ-16 Кемерово	6905,0	6717,6	2,7
ЭЧ-17 Белово	7755,0	7229,7	6,8
ЭЧ-18 Новокузнецк	8452,0	8014,9	5,2
ИТОГО: ДКРЭ	930,0	927,8	0,2
ИТОГО: Э	119393,0	122964,3	-3,0
ВЧД-12 Входная	5183,0	4561,5	12,0
ВЧД-6 Инская	3124,0	2766,7	11,4
ВЧД-23 Белово	7038,0	6705,5	4,7
ВЧД-25 Новокузнецк	5990,0	5889,8	1,7
ВЧД-27 Тайга	2089,0	1974,1	5,5
ВЧД-11 Алтайская	3658,0	3561,0	2,7
ИТОГО: В	27082,0	25458,6	6,0
ШЧ-1 Входная	5600,0	5548,1	0,9
ШЧ-2 Омск	11468,0	11414,1	0,5
ШЧ-14 Карасук	1498,0	1477,3	1,4
ШЧ-5 Барабинск	2550,0	2446,1	4,1
ШЧ-6 Новосибирск	3894,0	3814,1	2,1
ШЧ-8 Инская	9946,0	9756,3	1,9
ШЧ-10 Алтайская	5211,0	5288,0	-1,5
ШЧ-11 Барнаул	3853,0	3851,4	0,0
ШЧ-15 Камень-на-Оби	2986,0	3013,8	-0,9
ШЧ-17 Тайга	3256,0	3084,8	5,3
ШЧ-18 Кемерово	2666,0	2498,4	6,3
ШЧ-20 Белово	2222,0	2181,7	1,8
ШЧ-21 Новокузнецк	4511,0	4341,6	3,8
ССМП-653	317,0	258,2	18,6
ИТОГО: Ш	59978,0	58973,9	1,7
ПЧ-2 Входная	1293,0	1121,4	13,3
ПЧ-3 Омск	3066,0	3056,2	0,3
ПЧ-4 Калачинская	960,0	881,2	8,2
ПЧ-5 Называевская	1737,0	1652,0	4,9
ПЧ-6 Иртышская	1208,0	839,1	30,5

Продолжение таблицы 1.6

1	2	3	4
ПЧ-24 Карасук	1082,0	936,5	13,4
ПЧ-7 Татарская	1319,0	1298,2	1,6
ПЧ-8 Барабинск	946,0	905,6	4,3
ПЧ-10 Чулым	985,0	959,0	2,6
ПЧ-11 Новосибирск	3036,0	2786,2	8,2
ПЧ-12 Болотное	1304,0	1302,1	0,1
ПЧ-13 Инская	3606,0	3310,6	8,2
ПЧ-14 Тогучин	643,0	593,6	7,7
ПЧ-27 Тайга	2400,0	2239,7	6,7
ПЧ-28 Анжерская	1735,0	1515,4	12,7
ПЧ-29 Томск	774,0	715,8	7,5
ПЧ-31 Белово	2077,0	1869,3	10,0
ПЧ-32 Прокопьевск	2777,0	2759,4	0,6
ПЧ-33 Новокузнецк	2488,0	2136,3	14,1
ПЧ-35 Полосухино	3489,0	3146,5	9,8
ПЧ-38 Кемерово	4940,0	5105,6	-3,4
ПЧ-16 Алтай	1884,0	2016,8	-7,0
ПЧ-17 Барнаул	2378,0	2427,3	-2,1
ПЧ-18 Рубцовск	989,0	960,2	2,9
ПЧ-19 Заринская	800,0	761,9	4,8
ПЧ-22 Кулунда	1260,0	1224,8	2,8
ПЧ-25 Камень	833,0	779,7	6,4
ПЧ-26 Сузун	754,0	714,3	5,3
ПЧ ИССО	3791,0	3283,4	13,4
ДИЦДМ	814,0	699,0	14,1
ИТОГО: П	55368,0	51997,0	6,1
ПРММ Чулымская	437,0	378,4	13,4
ПМС - 315 Топки	452,0	327,4	27,6
ПРММ Черепаново	768,0	667,2	13,1
ПРММ Рубцовск	1256,0	1195,5	4,8
ИТОГО: ДПМ	2913,0	2568,5	11,8
НГЧ-1 Омск	15544,0	15075,2	3,0
НГЧ-2 Новосибирск	14827,0	14350,8	3,2
НГЧ-3 Кемерово	27146,0	26003,2	4,2
НГЧ-4 Барнаул	8455,0	8166,4	3,4
ИТОГО: НГС	65972,0	63595,6	3,6
ИТОГО: ДИ	264734,0	261962,3	1,0
ВП Омский регион	1347,0	1275,5	5,3
ВП Новосибирский регион	1874,0	1802,0	3,8
ВП Алтайский регион	1998,0	1921,7	3,8

Окончание таблицы 1.6

1	2	3	4
ВП Кузбасский регион	1900,0	1811,2	4,7
ИТОГО: ДАВС	7119,0	6810,4	4,3
Санаторий-профилакторий "Восток"	1175,0	974,8	17,0
Центр социальной поддержки молодежи и юношества им. К.С. Заслонова	701,0	658,5	6,1
Санаторий-профилакторий «Алтай»	630,0	519,4	17,5
Санаторий-профилакторий «Магистраль»	939,0	908,5	3,3
Новосибирский Дом культуры железнодорожника	608,0	565,4	7,0
Санаторий-профилакторий «Новокузнецк»	607,0	521,1	14,1
Санаторий-профилакторий «Железнодорожник» на ст. Тайга	161,0	130,8	18,7
Санаторий-профилакторий «Железнодорожник» на ст. Омск	742,0	622,7	16,1
Дом спорта на ст. Омск	57,0	29,9	47,6
Стадион «Локомотив» на ст. Инская	94,0	85,7	8,8
Физкультурно-оздоровительный комплекс «Локомотив» на ст. Кемерово	157,0	139,7	11,0
Санаторий-профилакторий «Карасук»	268,0	231,3	13,7
Лыжная база на ст. Барнаул	174,0	140,6	19,2
ИТОГО: ДСС	6313,0	5528,5	12,4
ТШ Омск	211,0	142,8	32,3
ТШ Тайга	98,0	65,7	32,9
ТШ Новокузнецк	283,0	216,2	23,6
ТШ Кулунда	200,0	162,6	18,7
НА	8680,0	7955,0	8,4
ЗСЦМ	140,0	130,0	7,1
База 45	651,0	562,1	13,7
База 58	696,0	604,1	13,2
Турсиб	2370,0	2394,5	-1,0
ИТОГО: РЦКУ	92733,0	88167,5	4,9
ИТОГО: Полигон	523072,1	507636,0	3,0

Наблюдаются существенные расхождения как в сторону превышения лимита (Дом спорта на ст. Омск – 47,6 %, ТЧЭ-3 Барабинск – 26,1 %, ТШ Тайга – 32,9 %, ПЧ-6 Иртышское – 30,5 %, ПМС-315 Топки – 27,6 %), так и в противоположную сторону (ЭЧ-6 Новосибирск – (-14,6) %, ЭЧ-8 Инская – (-12,9) %). В целом по дороге расхождение составило 3 %.

Как видно из рисунка 1.15, а, погрешность прогнозирования расхода электроэнергии в линейных структурных подразделениях Западно-Сибирской ж.д. менее чем в 50 % случаев имеет удовлетворительное значение ($\delta = 5$ %), а в 9 % случаев – превышает 15 %.

Схожая ситуация наблюдается при планировании расхода ТЭР по отдельным филиалам в границах железной дороги. Например, при планировании расхода дизельного топлива на нетяговые нужды филиалов в границах Западно-Сибирской ж.д. на 2017 г. (таблица 1.7) результирующая погрешность составила (-5,3 %).

При этом меньше чем в 25 % случаев она имеет удовлетворительное значение ($\delta = 5$ %), а в 15 % случаев – превышает 15 % (рисунок 1.15, б).

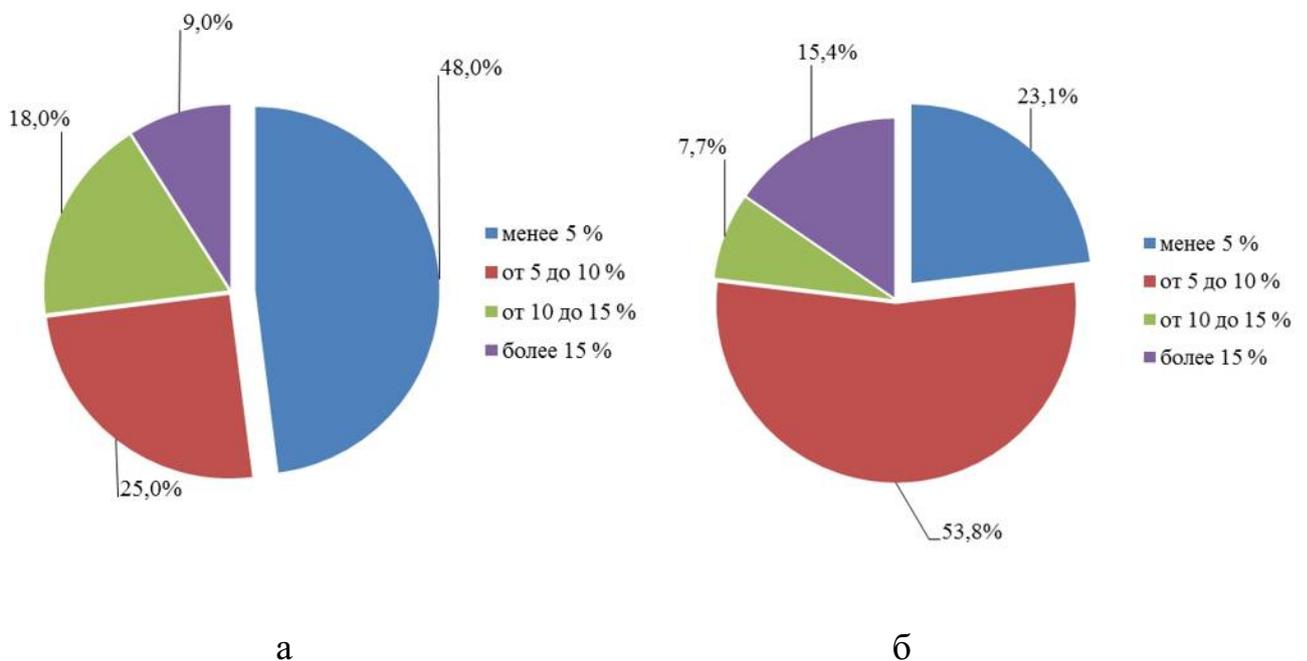


Рисунок 1.15 – Расхождение планируемого и фактического расхода ТЭР на нетяговые нужды Западно-Сибирской ж.д. при нормировании методом «от достигнутого уровня»:

а – электрическая энергия, уровень СП; б – дизельное топливо, уровень филиалов

Таблица 1.7 – Результаты нормирования расхода дизельного топлива на нетяговые нужды филиалов в границах Западно-Сибирской железной дороги на 2017 г.

Наименование филиала	Расход дизельного топлива, т		Расхождение, %
	план	факт	
РЦКУ	546,628	515,657	-5,7
ДИ	3766,000	3685,230	-2,1
ТР	4,409	4,122	-6,5
Т	24,459	22,185	-9,3
ДТВ	89,791	82,350	-8,3
ДМ	1008,112	921,205	-8,6
ДМТО	145,538	144,627	-0,6
НС	33,327	33,275	-0,2
ДРП	2419,020	2261,937	-6,5
ДМВ	45,492	29,889	-34,3
ДКРЭ	78,693	72,835	-7,4
ИВЦ	0,561	0,364	-35,1
НТЭ	747,642	662,773	-11,4
Полигон	8909,672	8436,449	-5,3

В 2012 г. в ОАО «РЖД» при участии консалтинговой группы «ФИНЭКС» разработана и применяется система энергетического менеджмента (СЭНМ ОАО «РЖД») (рисунок 1.16). В связи с этим подходы к организации ресурсосберегающих производственных систем в ОАО «РЖД» в основном соответствует стандарту ISO 50001 – «Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению». Согласно циклу PDCA [323], [324] предусматриваются следующие аспекты действующей системы управления использованием ТЭР:

Plan: планирование расхода и заданий по экономии ТЭР; формирование планов энергосберегающих организационных и технических мероприятий (ОТМ), в том числе за счет инвестиционных проектов, с учетом технико-экономических обоснований (ТЭО);

До: реализация ОТМ по экономии ТЭР;

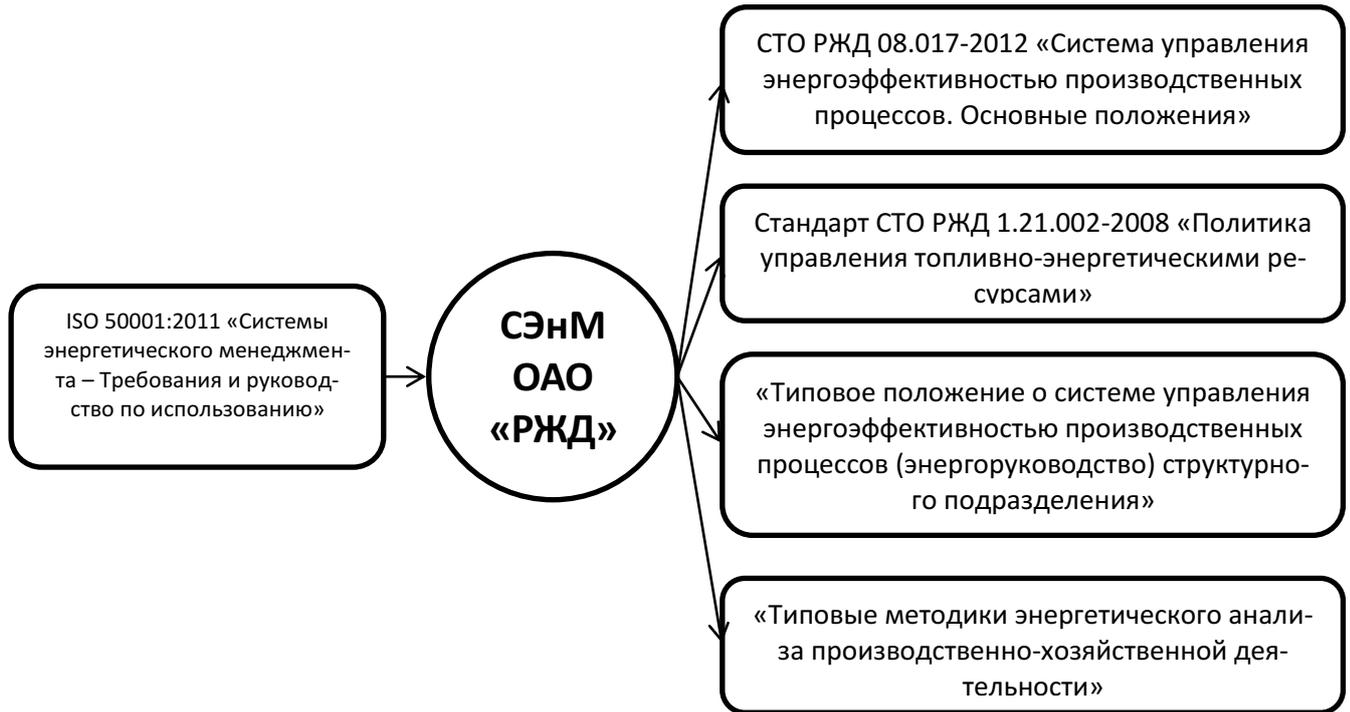


Рисунок 1.16 – Система энергетического менеджмента ОАО «РЖД»

Check: контроль достижения целевых показателей по расходу и экономии ТЭР; контроль реализации внедряемых энергосберегающих ОТМ и оценка фактически достигнутого эффекта от их применения;

Act: корректировка заданий по расходу и экономии ТЭР; корректировка плана ОТМ; разработка управляющих воздействий по снижению нерационального расхода ТЭР.

В сложившейся системе можно отметить ряд недостатков, в том числе следующие:

1. Планирование расхода ТЭР осуществляется в основном методом «от достигнутого уровня», а планирование заданий по экономии ТЭР – на уровне Центрального аппарата ОАО «РЖД» эвристическим методом, что практически не позволяет учесть влияние на расход энергоресурсов климатических показателей (например, температуры воздуха) и производственных характеристик.

2. При планировании расхода ТЭР, особенно в неперевозочных видах деятельности, практически не используются современные хорошо зарекомендовавшие себя статистические методы.

3. Значительная погрешность планирования ТЭР, в ряде случаев превышающая 15 %.

4. Отсутствие единой нормативной базы по расчету фактической экономии ТЭР от реализации ОТМ.

5. Недостаточная эффективность существующих методов оценки фактической энергетической эффективности ОТМ

6. Неэффективное использование существующих автоматизированных систем учета ТЭР.

7. Недостаточная эффективность существующих методов и технических средств для мониторинга и управления показателями энергетической эффективности производственных процессов на уровне линейных структурных подразделений (СП).

Таким образом, задача совершенствования методологии организации ресурсосберегающих производственных систем является актуальной. На основе анализа состояния потребления ТЭР и структуры управления потреблением ТЭР на железнодорожном транспорте, систематизации методов и средств эффективного привлечения и использования ТЭР при организации производственных процессов сформулирована **цель диссертационной работы** – повышение эффективности функционирования и совершенствование производственных процессов на железнодорожном транспорте путем создания и применения методов и средств мониторинга использования топливно-энергетических ресурсов, организационно-методических и технических решений с использованием новых информационных технологий.

Для достижения поставленной цели предусмотрено решение следующих **задач**:

1) выполнить систематизацию методов и средств эффективного использования топливно-энергетических ресурсов 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 топливно-энергетических ресурсов при организации производственных процессов, результатов внедрения организационных, технических и технологических ресурсосберегающих решений, и развития организационной структуры управления процессами использования топливно-энергетических ресурсов;

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

4) разработать методы и средства эффективного использования топливно-энергетических ресурсов 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 научное обоснование стратегии развития железнодорожного транспорта как ресурсосберегающей производственной системы за счет комплексной систематизации, анализа, прогнозирования и верификации ключевых показателей эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в производственных процессах;

7) предложить усовершенствованные методы и средства мониторинга использования топливно-энергетических ресурсов в производственных процессах на железнодорожном транспорте.

2 НАУЧНЫЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Исследования, выполненные в главе 1, позволили сформулировать основные принципы повышения эффективности функционирования производственных процессов, которые направлены на реализацию предлагаемой методологии организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте:

1. 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.

2. Совершенствование организационной структуры управления процессами использования топливно-энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте в части делегирования полномочий по разработке проектов заданий по экономии энергоресурсов с уровня Центрального аппарата ОАО «РЖД» на уровень филиалов и линейных СП.

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

Реализация первого принципа подразумевает необходимость исследования факторов, влияющих на использование ТЭР, для перевозочного процесса и перевозочных видов производственной деятельности.

В качестве первичного метода исследования деятельности предлагается использовать корреляционный анализ.

Для оценки степени влияния факторов на расход ТЭР рассчитывается коэффициент корреляции по формуле [170 – 172]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{S_x \cdot S_y (n-1)}, \quad (2.1)$$

где S_x, S_y – средние квадратические отклонения случайных величин;

x_i, y_i – i -е значения случайных величин;

n – объем выборки;

\bar{x}, \bar{y} – математические ожидания случайных величин.

В целях наглядности суждений о коррелированности исследуемых случайных величин формируется нормированная корреляционная матрица $\|r_{ij}\|$, составленная из коэффициентов корреляции, вычисляемых по формуле (2.1):

$$\|r_{ij}\| = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1n} \\ & 1 & r_{23} & \dots & r_{2n} \\ & & 1 & \dots & r_{3n} \\ & & & \dots & \dots \\ & & & & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

Для оценки значимости полученного коэффициента корреляции определяется наблюдаемое значение критерия

$$T_{\text{набл}} = r_{xy} \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}}, \quad (2.3)$$

которое сравнивается с критическим значением:

$$|T_{\text{набл}}| > t_{\text{кр}}. \quad (2.4)$$

Если неравенство (2.4) выполняется, то полученное значение коэффициента корреляции следует признать значимым.

В настоящей главе дальнейшие исследования выполнены на примере использования электрической энергии в перевозочном процессе и в неперевозочных видах деятельности.

2.1 Анализ влияния факторов на использование электроэнергии в перевозочном процессе

Основным показателем, характеризующим энергетическую эффективность тяги поездов, является удельный расход электроэнергии (УРЭ), определяемый как отношение расхода электрической энергии в кВт·ч к выполненной перевозочной работе в 10 тыс. ткм брутто. В соответствии с [143, 148, 150] можно выделить ряд факторов, которые оказывают влияние на УРЭ. С учетом специфики решаемой задачи их можно классифицировать следующим образом:

1. *Условно-постоянные факторы*: доля бесстыкового пути, номинальная (длительная) касательная мощность локомотива, сцепная масса локомотива, коэффициент технического состояния, коэффициент использования мощности вспомогательных машин, относительный расход энергоресурсов на холостом ходу, номинальный (длительный) КПД локомотива, возраст парка, эквивалентный уклон, корректировка сопротивления движению, доля вагонов с кондиционерами, структура парка локомотивов.

2. *Переменные факторы*: масса состава, средняя нагрузка на ось вагона, доля порожнего пробега вагонов, участковая и техническая скорости, задержки у запрещающих сигналов, неграфиковые предупреждения по скорости, путевые предупреждения по скорости, температура наружного воздуха, рекуперация электроэнергии, организационно-технические мероприятия, нагон опоздания пассажирского поезда, электроотопление пассажирских вагонов.

Дополнительно следует рассмотреть фактор, учитывающий применение машинистами систем автоведения.

Условно-постоянные факторы для рассматриваемого участка железной дороги существенно не изменяются на протяжении расчетных интервалов времени,

для которых осуществляется формирование математической модели электропотребления, и поэтому их влияние может не учитываться.

Переменные факторы можно укрупненно классифицировать следующим образом:

- температура наружного воздуха t (данный фактор в том числе учитывает расход электрической энергии на электроотопление пассажирских вагонов), °С;
- нагон опоздания пассажирского поезда $T_{\text{наг}}$, мин;
- участковая скорость $V_{\text{уч}}$, км/ч;
- техническая скорость $V_{\text{техн}}$, км/ч;
- рекуперация электроэнергии $W_{\text{рек}}$, кВт·ч;
- простой (в том числе связанный с задержками у запрещающих сигналов, неграфиковыми предупреждения по скорости, путевскими предупреждениями по скорости) $T_{\text{прост}}$, ч;
- доля автоведения $d_{\text{авт}}$, отн. ед.;
- масса состава m_c , т;
- средняя нагрузка на ось вагона q , т.

Расчет коэффициентов корреляции и составление нормированной корреляционной матрицы выполнены на основе выражений (2.1), (2.2) с применением программного комплекса *Statistica* отдельно для грузового, пассажирского и пригородного движения.

Для анализа влияния факторов на УРЭ в грузовом движении сформирована выборка из 4658 поездок, выполненных локомотивными бригадами эксплуатационного локомотивного депо Карасук за 1-е полугодие 2015 г.

На рассматриваемом участке эксплуатируются грузовые электровозы переменного тока серии ВЛ-80С, ВЛ-80ТК, ВЛ-80СК.

Корреляционная матрица для рассматриваемого участка приведена в таблице 2.1. **Жирным шрифтом** здесь и далее выделены коэффициенты корреляции, которые являются значимыми с учетом выражений (2.3) и (2.4).

Результаты корреляционного анализа показывают, что в грузовом движении наблюдается значительное влияние массы состава и нагрузки на ось на УРЭ с коэффициентами корреляции более 0,8. Значительно более слабое влияние оказывает участковая скорость (коэффициенты корреляции 0,025). Практически не оказывают влияния на УРЭ простой, температура воздуха и техническая скорость.

Таблица 2.1 – Корреляционная матрица для эксплуатационного локомотивного депо Карасук (грузовое движение)

Фактор	Температура воздуха	УРЭ	Участковая скорость	Техническая скорость	Простой	Масса состава	Нагрузка на ось
Температура воздуха	1,000	-0,006	-0,017	-0,015	-0,016	0,006	0,006
УРЭ	–	1,000	0,025	0,017	-0,005	-0,882	-0,851
Участковая скорость	–	–	1,000	0,830	-0,006	-0,068	-0,133
Техническая скорость	–	–	–	1,000	-0,008	-0,053	-0,109
Простой	–	–	–	–	1,000	-0,017	-0,010
Масса состава	–	–	–	–	–	1,000	0,968
Нагрузка на ось	–	–	–	–	–	–	1,000

Для анализа влияния факторов на УРЭ в пассажирском движении сформирована выборка из 2334 поездов, выполненных локомотивными бригадами эксплуатационного локомотивного депо Барабинск за 1-е полугодие 2015 г. на участке Новосибирск – Барабинск.

На рассматриваемом участке эксплуатируются пассажирские электровозы постоянного тока серии ЭП-2К.

Корреляционная матрица для рассматриваемого участка приведена в таблице 2.2.

Результаты корреляционного анализа показывают, что в пассажирском движении наибольшее влияние на УРЭ оказывает масса состава с коэффициентом корреляции (-0,308). Кроме того, значимым оказывается влияние участковой и технической скорости, а также температуры воздуха (коэффициенты корреляции по абсолютному значению около 0,2). Коэффициенты корреляции для

остальных факторов по итогам расчета, выполненного по формулам (2.6) и (2.7), оказались статистически незначимыми.

Таблица 2.2 – Корреляционная матрица для эксплуатационного локомотивного депо Барабинск (пассажирское движение)

Фактор	Температура воздуха	Нагон опоздания	УРЭ	Участковая скорость	Техническая скорость	Простой	Масса состава	Нагрузка на ось
Температура воздуха	1,000	-0,038	-0,196	-0,018	-0,014	-0,032	0,039	-0,076
Нагон опоздания	–	1,000	0,033	0,079	0,156	0,090	0,008	0,010
УРЭ	–	–	1,000	0,163	0,207	0,048	-0,308	-0,035
Участковая скорость	–	–	–	1,000	0,956	0,004	0,087	0,010
Техническая скорость	–	–	–	–	1,000	0,005	0,082	0,007
Простой	–	–	–	–	–	1,000	-0,014	0,007
Масса состава	–	–	–	–	–	–	1,000	0,076
Нагрузка на ось	–	–	–	–	–	–	–	1,000

Для анализа влияния факторов на УРЭ в пригородном движении сформирована выборка из 5100 поездок, выполненных локомотивными бригадами моторвагонного депо Омск за 2015 г., в т.ч.:

участок Иртышское – Омск: в нечетном направлении 782 поездки, в четном – 595 поездок;

участок Исилькуль – Омск: в нечетном направлении 854 поездки, в четном – 844 поездки;

участок Называевская – Омск: в нечетном направлении 261 поездка, в четном – 479 поездок;

участок Татарская – Омск: в нечетном направлении 446 поездок, в четном – 436 поездок;

участок Петропавловск – Омск: в нечетном направлении 202 поездки, в четном – 201 поездка.

На рассматриваемых участках эксплуатируются электропоезда серий ЭД-4М, ЭД-2Т, ЭР-2К, ЭД-4МК, за исключением участка Петропавловск – Омск, на котором применяются только электропоезда серий ЭД-4М и ЭД-4МК. В целом в моторвагонном депо Омск большинство поездов выполнено электропоездами ЭД-4М и ЭД-4МК (91,2 %).

Корреляционные матрицы на примере участка Иртышское – Омск приведены в таблицах 2.3, 2.4.

Таблица 2.3 – Корреляционная матрица для участка Иртышское – Омск (нечетное направление)

Фактор	Температура воздуха	Рекуперация	УРЭ	Участковая скорость	Техническая скорость	Доля автоведения	Масса состава	Нагрузка на ось
Температура воздуха	1,000	0,033	-0,249	-0,005	0,059	0,053	-0,062	0,022
Рекуперация	–	1,000	-0,094	0,069	0,000	0,123	0,187	0,188
УРЭ	–	–	1,000	-0,377	-0,490	-0,069	0,184	0,245
Участковая скорость	–	–	–	1,000	0,576	0,050	-0,067	-0,077
Техническая скорость	–	–	–	–	1,000	0,000	-0,126	-0,162
Доля автоведения	–	–	–	–	–	1,000	-0,025	-0,016
Масса состава	–	–	–	–	–	–	1,000	0,971
Нагрузка на ось	–	–	–	–	–	–	–	1,000

Для удобства выполнения дальнейшего анализа составлена таблица 2.5, которая содержит коэффициенты корреляции между УРЭ и влияющими факторами по рассматриваемым участкам.

Практически на всех рассматриваемых участках температура воздуха оказывает значимое влияние на УРЭ. Наиболее сильное влияние – на участках Петропавловск – Омск (в четном и нечетном направлении) и Называевская – Омск (в четном направлении) с коэффициентами корреляции, превышающими по абсолютному значению 0,4.

Таблица 2.4 – Корреляционная матрица для участка Иртышское – Омск (четное направление)

Фактор	Температура воздуха	Рекуперация	УРЭ	Участковая скорость	Техническая скорость	Доля автоведения	Масса состава	Нагрузка на ось
Температура воздуха	1,000	0,070	-0,390	0,023	0,069	0,107	-0,057	0,012
Рекуперация	–	1,000	-0,169	0,034	0,030	0,155	0,065	0,072
УРЭ	–	–	1,000	-0,340	-0,269	-0,055	-0,119	-0,131
Участковая скорость	–	–	–	1,000	0,543	0,080	-0,021	-0,022
Техническая скорость	–	–	–	–	1,000	-0,031	-0,036	-0,032
Доля автоведения	–	–	–	–	–	1,000	-0,034	-0,017
Масса состава	–	–	–	–	–	–	1,000	0,984
Нагрузка на ось	–	–	–	–	–	–	–	1,000

Таблица 2.5 – Коэффициенты корреляции между УРЭ и влияющими факторами на рассматриваемых участках (пригородное движение)

Участок	Температура воздуха	Рекуперация	Участковая скорость	Техническая скорость	Доля автоведения	Масса состава	Нагрузка на ось
Иртышское-Омск (неч)	-0,249	-0,094	-0,377	-0,490	-0,069	0,184	0,245
Иртышское-Омск (чет)	-0,390	-0,169	-0,340	-0,269	-0,055	-0,119	-0,131
Исилькуль-Омск (неч)	-0,122	-0,039	-0,132	0,061	0,016	-0,132	-0,118
Исилькуль-Омск (чет)	-0,129	0,004	-0,345	-0,445	0,029	0,310	0,516
Называевская-Омск (неч)	-0,449	-0,327	-0,296	-0,271	-0,170	-0,137	-0,132
Называевская-Омск (чет)	-0,210	-0,182	-0,530	-0,073	0,076	0,072	0,084
Татарская-Омск (неч)	-0,125	0,185	-0,368	-0,015	0,016	-0,565	-0,564
Татарская-Омск (чет)	-0,058	-0,064	-0,527	-0,627	-0,091	-0,279	-0,278
Петропавловск-Омск (неч)	-0,515	–	-0,642	-0,731	-0,261	0,098	-0,144
Петропавловск-Омск (чет)	-0,431	–	-0,692	-0,733	-0,244	0,106	-0,058

Низкие температуры способствуют росту удельного расхода энергии и снижению энергоэффективности тяги электропоездов. В основном это объясняется следующими причинами:

– энергозатратами на отопление вагонов;

- невозможностью применения рекуперации при низких температурах;
- снижением коэффициента сцепления колес с рельсами.

Увеличение объема энергии рекуперации в большинстве случаев приводит к снижению УРЭ, причем наиболее значимо влияние этого показателя на участках Иртышское – Омск (нечетное направление) с коэффициентом корреляции $-0,169$ и Называевская – Омск в обоих направлениях с коэффициентами корреляции $-0,327$ и $-0,182$. На участке Татарская – Омск (четное направление) наблюдается увеличение УРЭ при повышении объема энергии рекуперации. Это может быть связано с нерациональным выбором режимов движения, в том числе нерациональным применением рекуперативного торможения. Так, если на перегонах незначительной протяженности разгонять поезд до высоких значений скорости, а затем применять торможение, в том числе рекуперативное, энергозатраты на ускорение поезда могут превысить эффект от рекуперации на таких перегонах.

Рост участковой скорости во всех рассматриваемых случаях приводит к снижению УРЭ. Наиболее характерными участками являются Называевская – Омск (нечетное направление) с $r_{xy} = -0,530$, Татарская – Омск (четное направление) с $r_{xy} = -0,527$ и Петропавловск – Омск в обоих направлениях с $r_{xy} = -0,642$ и $-0,692$. Значения участковой скорости по данным участкам находятся в пределах $55 - 60$ км/ч.

Значения технической скорости на участках находятся в пределах $60 - 80$ км/ч. Техническая скорость, как и участковая, в большинстве случаев имеет отрицательное статистическое влияние на УРЭ. Наиболее характерными участками являются Иртышское – Омск (четное направление) с $r_{xy} = -0,490$, Татарская – Омск (четное направление) с $r_{xy} = -0,627$ и Петропавловск – Омск в обоих направлениях с $r_{xy} = -0,731$ и $-0,733$.

Анализ показывает, что примерно для половины участков влияние технической скорости на УРЭ оказывается сильнее, чем участковой скорости, а для остальных участков наблюдается обратная зависимость. Следовательно, влияние этих факторов на УРЭ примерно равнозначно. При этом наблюдается значимая статистическая связь между этими параметрами, поэтому при формировании ма-

тематической модели необходимо принимать меры для устранения мультиколлинеарности факторов.

Следует отметить, что характер влияния участковой и технической скорости на УРЭ в пригородном движении отличается от грузового и пассажирского, где рост этих показателей приводит к увеличению УРЭ. В случае с пригородным движением электропоездов более высокие значения участковой скорости свидетельствуют о большем времени в движении электропоезда с постоянной скоростью при меньшем количестве остановок, разгонов и замедлений, которые как раз и сопровождаются повышенным расходом электроэнергии в данном виде движения. В пассажирском и грузовом движении при гораздо более высоких массах поездов увеличение технической и участковой скорости приводит к увеличению удельного расхода энергии. Кроме того, с увеличением скорости движения поездов повышается значение коэффициента использования силы тяги электропоезда, что положительно сказывается на его энергетической эффективности.

Увеличение доли автоведения в общем времени поездки для четырех участков приводит к значимому снижению УРЭ (наиболее это заметно для участка Петропавловск – Омск в обоих направлениях с $r_{xy} = -0,261$ и $-0,244$).

Для остальных участков влияние автоведения на УРЭ оказалось статистически незначимым, что можно объяснить их меньшей протяженностью. Другими словами, преимущества автоведения в полной мере проявляются на участках с большей протяженностью, где энергоэффективность от оптимальных режимов ведения поезда складывается из энергоэффективности движения на каждом перегоне в отдельности. На коротких участках ручной режим ведения по энергоэффективности оказывается сопоставим с режимом автоведения. В целом можно сделать вывод о наличии энергетического эффекта от применения систем автоведения на моторвагонном подвижном составе.

Увеличение массы состава и нагрузки на ось лишь примерно в половине случаев приводит к значимому снижению УРЭ. Наиболее характерным участком является Татарская – Омск в обоих направлениях с коэффициентами корреляции до $-0,57$. В остальных случаях влияние этих факторов либо незначительное, либо

имеет противоположный характер (например, для участка Иртышское – Омск в четном направлении). Таким образом, влияние указанных факторов на УРЭ в пригородном движении не так однозначно, как в грузовом и пассажирском движении. Причина этого заключается в том, что массы составов и нагрузки на ось электропоездов значительно меньше аналогичных показателей грузовых и пассажирских поездов и с учетом распределенной тяги электропоездов по длине составов влияние изменяющейся массы составов практически не наблюдается. Гораздо более influentialными являются такие факторы, как температура воздуха, наличие рекуперации и автоведения, скорости движения, количество остановок.

Поэтому при формировании математической модели электропотребления в пригородном движении следует с осторожностью подходить к включению этих факторов в модель. При этом необходимо учитывать их сильную взаимную корреляционную связь.

Кроме того, можно отметить значительную нелинейность зависимостей между УРЭ и влияющими факторами. В частности, это видно из графика, характеризующего зависимость УРЭ от температуры и участковой скорости для ТЧЭ Барабинск (рисунок 2.1).

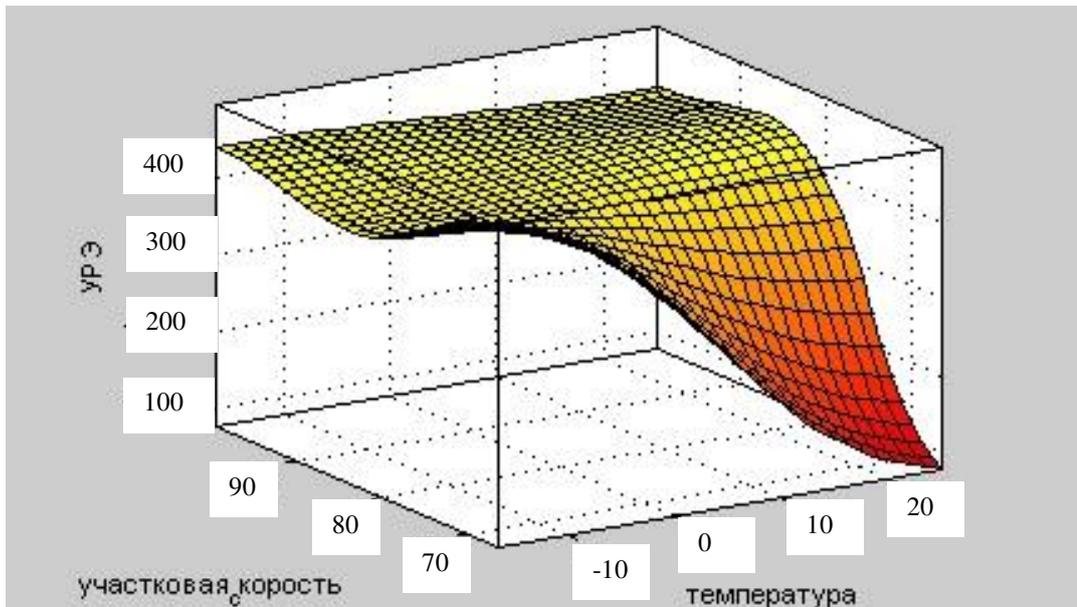


Рисунок 2.1 – Поверхность, характеризующая зависимость УРЭ от температуры и участковой скорости для ТЧЭ Барабинск

2.2 Анализ влияния факторов на использование электроэнергии в неперевозочных видах деятельности

Факторы, влияющие на использование электрической энергии в неперевозочных видах деятельности (на нетяговые нужды) железнодорожного транспорта, могут быть разделены на три группы (рисунок 2.2): климатические, производственные и прочие факторы.

Известно, что расход электрической энергии в неперевозочных видах деятельности в большинстве случаев носит ярко выраженный сезонный характер.

Например, на рисунке 2.3 представлена помесечная динамика расхода электрической энергии структурных подразделений, расположенных в границах Западно-Сибирской железной дороги, за 2015 г. Расхождение между максимальным и минимальным значением расхода электрической энергии в целом по рассматриваемым объектам составляет 3,9 раза, а по отдельным подразделениям, например, по дистанциям гражданских сооружений (НГЧ), превышает 6 раз.



Рисунок 2.2 – Факторы, влияющие на использование электрической энергии в неперевозочных видах деятельности железнодорожного транспорта

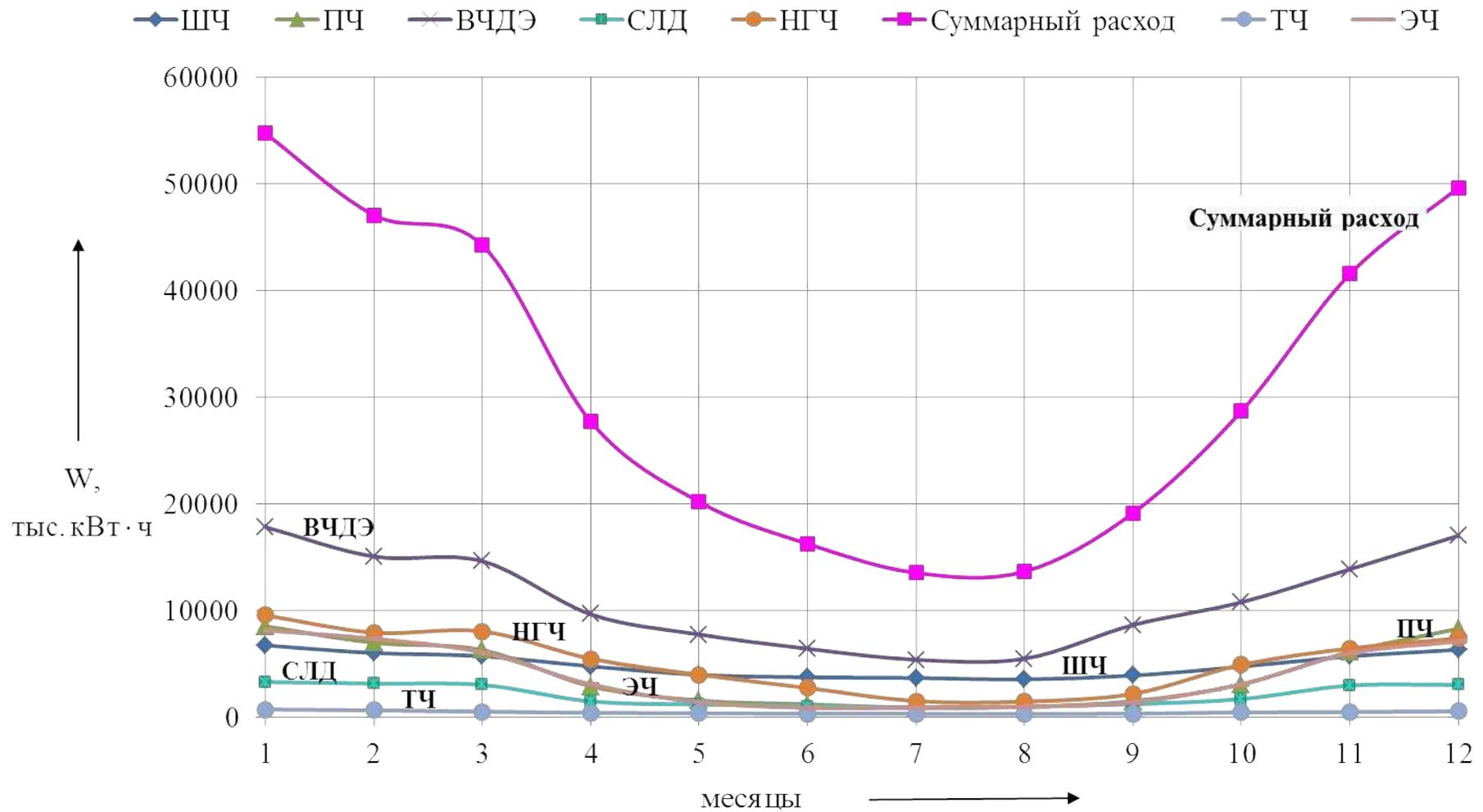


Рисунок 2.3 – Динамика расхода электрической энергии структурных подразделений, расположенных в границах Западно-Сибирской железной дороги, за 2015 г.

Очевидно, что это связано в первую очередь с сезонным изменением климатических факторов, главным образом температуры воздуха и продолжительности светового дня.

Как показано автором в [72], «..влияние изменения температуры воздуха на уровень электропотребления электроэнергии особенно сильно заметно на объектах, выполняющих сезонные работы, например, отопление вагонов в пунктах отстоя, на объектах, оборудованных системами электроотопления и использующих тепловые завесы, а также на предприятиях, имеющих в своем составе крупные котельные, отапливающие не только собственные производственные помещения, но и соседние железнодорожные предприятия или прилегающие населенные пункты...». В то же время необходимо учитывать, что в летнее время может наблюдаться увеличение времени использования вентиляционного оборудования и кондиционеров в административно-бытовых помещениях, что приведет к росту электропотребления [12].

Влияние продолжительности светового дня на уровень электропотребления в первую очередь обусловлено изменением продолжительности включения осветительного оборудования. Этот фактор наиболее важен для объектов с большим количеством административно-бытовых помещений, а также для объектов со значительной долей наружного освещения (например, освещение территории железнодорожных станций).

Кроме того, «...в зависимости от пространственной ориентации зданий и сооружений по сторонам света, а именно, от того, куда выходят застекленные поверхности ограждающих конструкций, изменяется время работы осветительных установок в цехах и подразделениях предприятий. Если окна помещения выходят на северную сторону, время работы осветительных установок увеличивается...» [72].

Другие факторы, связанные с погодными условиями, также могут оказать влияние на расход электрической энергии. Так, «...повышенная облачность, особенно в осенне-зимний период, может вызвать увеличение времени работы осветительных установок и, как следствие, рост электропотребления...» [72].

Для отдельных объектов значимым фактором могут являться осадки в виде снега. Это связано с выполнением специфических видов работ, связанных с обдувом стрелочных переводов сжатым воздухом, что увеличивает потребление электроэнергии компрессорным оборудованием, а также прочих видов работ по уборке снега.

В отдельных случаях значимым фактором может оказаться сила ветра. Это может быть характерно для регионов с частыми и сильными ветрами, например, районы Крайнего Севера.

Из числа производственных факторов наиболее значимым является объем производственной деятельности, измеритель которой принимается в зависимости от типа бизнес-процесса предприятия. В соответствии с типовыми методиками энергетического анализа производственно-хозяйственной деятельности структурных подразделений ОАО «РЖД» [174 – 183] установлены следующие показатели производственной деятельности, оказывающие влияние на расход электрической энергии:

- для железнодорожных станций: среднесписочная численность персонала; площадь освещаемой территории, м^2 ; развернутая длина пути, км;

- для эксплуатационных вагонных депо: среднесписочная численность персонала; площадь освещаемых зданий, сооружений и наружных территорий, м^2 ; объем зданий, отапливаемых с применением электроотопления, м^3 ; количество вагонов, прошедших техническое обслуживание, ед.; количество вагонов, прошедших текущий отцепочный ремонт, усл. вагонов; производство сжатого воздуха, м^3 ; количество действующих компрессорных установок, ед.;

- для дистанций пути: среднесписочная численность персонала; эксплуатационная и развернутая длина пути, км; средняя годовая грузонапряженность без учета массы локомотива, млн ткм брутто/км; площадь освещаемых зданий, сооружений и наружных территорий, м^2 ; объем зданий, отапливаемых с применением электроотопления, м^3 ; количество обогреваемых стрелочных переводов, ед.; производство сжатого воздуха, м^3 ; количество действующих компрессорных установок, ед.;

– для дистанций сигнализации, централизации и блокировки: станций: среднесписочная численность персонала; площадь освещаемых зданий, сооружений и наружных территорий, m^2 ; объем зданий, отапливаемых с применением электроотопления, m^3 ; количество распускаемых с горки вагонов, усл. вагон; длина перегонов, оборудованных устройствами СЦБ, км; количество стрелок на станциях, ед.; количество переездов, оборудованных сигнализацией, ед.; количество устройств КТСМ, ед.; количество действующих компрессорных установок, ед.;

– для дистанций электроснабжения: среднесписочная численность персонала; площадь освещаемых зданий, сооружений и наружных территорий, m^2 ; объем зданий, отапливаемых с применением электроотопления, m^3 ; объем переработанной электрической энергии на тягу поездов и нетяговые нужды, тыс. кВт·ч; эксплуатационная длина электрифицированных участков, км; количество тяговых и трансформаторных подстанций, ед.; протяженность линий электропередачи, км.;

– для моторвагонных депо: среднесписочная численность персонала; площадь освещаемых зданий, сооружений и наружных территорий, m^2 ; объем зданий, отапливаемых с применением электроотопления, m^3 ; производство сжатого воздуха, m^3 ; подъемочный ремонт моторвагонного подвижного состава (МВПС), усл. ед.; количество действующих компрессорных установок, ед.;

– для участков тепловодоснабжения: среднесписочная численность персонала; площадь освещаемых зданий, сооружений и наружных территорий, m^2 ; объем зданий, отапливаемых с применением электроотопления, m^3 ; производство тепловой энергии, Гкал; производство воды, m^3 ;

– для отделов материально-технического обеспечения: среднесписочная численность персонала; площадь освещаемых зданий, сооружений и наружных территорий, m^2 ; объем зданий, отапливаемых с применением электроотопления, m^3 ; товарооборот по материальному складу, тыс. руб.;

– для дистанций гражданских сооружений: среднесписочная численность персонала; площадь освещаемых зданий, сооружений и наружных территорий, m^2 ; объем зданий, отапливаемых с применением электроотопления, m^3 .

Анализ специфики хозяйственной деятельности СП ОАО «РЖД» позволил систематизировать основные направления использования электрической энергии и сформировать укрупненные показатели производственной деятельности объектов ОАО «РЖД» в соответствии с таблицей 2.3 [108].

Таблица 2.3 – Укрупненные показатели производственной деятельности для объектов железнодорожного транспорта различной хозяйственной принадлежности

Тип СП	Основные направления использования электроэнергии	Укрупненный показатель производственной деятельности
1	2	3
Сервисные локомотивные депо (СЛД)	Технологическое оборудование, компрессорные, освещение	Количество отремонтированных локомотивов, прив. ед.
Вагонные эксплуатационные депо (ВЧДЭ)	Технологическое оборудование, компрессорные, освещение	Количество вагонов, прошедших техническое обслуживание, ед. Количество вагонов, прошедших текущий отцепочный ремонт, усл. вагонов
Дистанция электроснабжения (ЭЧ)	Электроотопление, освещение, вычислительная и оргтехника	Содержание устройств электроснабжения, техн. единиц
Дистанция сигнализации, централизации и блокировки (ШЧ)	Электроотопление, освещение, компрессорные, автоблокировка, вычислительная и оргтехника	Содержание устройств автоматики и телемеханики, техн. единиц
Дистанция гражданских сооружений (НГЧ)	Освещение, бытовое электрооборудование	Площадь зданий, м ²
Дистанция пути (ПЧ)	Электроотопление, освещение, компрессорные	Эксплуатационная или развернутая длина пути, км
Дирекция тепловодоснабжения (ДТВ)	Насосное оборудование, электродкотлы	Производство тепловой энергии, Гкал. Производство воды, м ³
Дистанция погрузочно-разгрузочных работ (МЧ)	Подъемно-транспортные механизмы, освещение	Грузопереработка, тыс. тонн

Продолжение таблицы 2.3

1	2	3
Дирекция моторвагонного подвижного состава (ДМВ)	Освещение, технологическое оборудование	Количество отремонтированного МВПС, прив. ед.
Дирекция железнодорожных вокзалов (ДЖВ)	Содержание вокзалов	Количество обслуженных пассажиров. Площадь зданий, м ²
Дирекция материально-технического обеспечения (ДМТО)	Освещение, вычислительная и оргтехника, технологическое оборудование	Товарооборот по материальному складу, тыс. руб.
Административно-хозяйственное управление (АХУ)	Содержание зданий	Площадь зданий, м ²
Дортехшкола (ДТШ)	Освещение, вычислительная и оргтехника, стенды	Число обучаемых
Дирекция управления движением (Д)	Освещение станций	Площадь освещаемой территории, привед. м ²
Локомотивные эксплуатационные депо (ТЧЭ)	Освещение, вычислительная и оргтехника, кондиционирование	—
Дирекция пассажирских обустройств (ДПО)	Освещение платформ, содержание малых вокзалов	—
Региональный центр связи (РЦС)	Освещение, вычислительная и оргтехника, оборудование связи	—
Линейные отделы Трансэнерго (ЭЭ)	Освещение, вычислительная и оргтехника	—
Информационно-вычислительный центр (ИВЦ)	Освещение, вычислительная и оргтехника	—
Дирекция по ремонту пути (ДРП)	Освещение, вычислительная и оргтехника	—

Отдельные объекты имеют два укрупненных показателя производственной деятельности. Для некоторых объектов измеритель производственной деятельности не вводится, т.к. их объем электропотребления зависит только от климатических факторов.

Состав и режимы работы электрооборудования (ЭО), а также внедрение ресурсосберегающих технологий на объекте также оказывают влияние на объем

электропотребления. При рассмотрении выборки данных о расходе электрической энергии и влияющих факторов данный показатель необходимо учесть либо в количественной, либо в качественной форме. Одним из возможных вариантов является учет этого показателя на основе приведенной мощности ЭО по условно-постоянной ($P_{пр.}^{у.п}$) и переменной ($P_{пр.}^{перем}$) составляющим электропотребления [108, 184, 185]. Такой подход позволяет учесть как состав ЭО на предприятии за счет его установленной (номинальной) мощности, так и режимы его работы за счет коэффициентов использования электрооборудования.

Условно-постоянная составляющая обусловлена наличием ЭО, режимы работы которого не имеют зависимости от объемов производственной деятельности

Переменная составляющая электропотребления непосредственно связана с выполнением производственного процесса. Расчет приведенной мощности осуществляется в соответствии с методикой, изложенной в [186, 187].

Следует отметить, что использовать данный фактор при корреляционном анализе затруднительно в первую очередь из-за его малой дисперсии (для отдельных производственных процессов он может не изменяться за весь период наблюдений). Например, исследования выборок для дистанций сигнализации, централизации и блокировки Московской ж.д. (таблица 2.4) показывают, что из 18 СП в пяти коэффициент вариации данного показателя оказался равен нулю для условно-постоянной составляющей и в 9 для переменной. Коэффициент вариации расхода электроэнергии для тех же выборок составляет в среднем 0,25. Сопоставимые значения вариации приведенной мощности, пригодные для корреляционного анализа, наблюдаются в четырех СП (ШЧ-5, ШЧ-21, ШЧ-24, ШЧ-28).

Поэтому в дальнейшем предлагается не включать факторы, связанные с приведенной мощностью ЭО, в математическую модель, а учитывать отдельно.

Прочие факторы по своей природе в большинстве случаев являются субъективными, т.е. связанными с неквалифицированным проведением работ обслуживающим персоналом. К ним следует отнести «...увеличение длительности работы оборудования на единицу выпускаемой продукции из-за несоблюдения технологии выполнения работ, нерациональное использование осветительных установок

и электроотопительных электроприборов, простой оборудования в режиме холостого хода, отсутствие у персонала мотивации экономии электроэнергии, несанкционированное использование электрооборудования и др....» [72]. Эти факторы, как и ошибки, связанные с недостоверным учетом электрической энергии, по своему характеру являются случайными и не поддаются объективному прогнозированию.

Таблица 2.4 – Исследования коэффициента вариации выборок условно-постоянной и переменной составляющих приведенной мощности ЭО

Наименование СП	Коэффициент вариации	
	Условно-постоянная составляющая	Переменная составляющая
ШЧ-2	0	0
ШЧ-4	0	0
ШЧ-5	0,4	0,067
ШЧ-6	0,028	0,022
ШЧ-8	0,056	0
ШЧ-10	0,019	0,004
ШЧ-13	0	0
ШЧ-14	0,013	0
ШЧ-15	0,005	0,003
ШЧ-17	0,026	0,005
ШЧ-19	0	0
ШЧ-21	1,050	0,073
ШЧ-24	0,724	0
ШЧ-26	0,035	0
ШЧ-28	0,121	0,026
ШЧ-31	0,043	0,012
ШЧ-32	0,019	0,009
ШЧ-35	0	0

Однако в тех случаях, когда выявляется систематическое проявление субъективных факторов на рассматриваемом объекте, составляющие, связанные с

данным фактором, следует устранить из рассматриваемой выборки. Наличие систематических ошибок выявляется одним из известных способов [188], например, с помощью критерия Аббе.

К числу прочих факторов можно отнести и «...несоответствие технических характеристик электрооборудования и режимов его работы технологическим нормативам (установленная мощность, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, степени загрузки, техническое состояние электрооборудования – моральный и физический износ) и т.д....» [72]. Однако на практике в условиях ограниченного объема исходных данных учет этого фактора представляется затруднительным.

Для анализа влияния перечисленных факторов на расход электрической энергии в неперевозочных видах деятельности были сформированы выборки исходных данных для СП различной хозяйственной принадлежности, расположенных в различных регионах РФ. Всего было обследовано 123 СП, расположенных в границах Московской, Октябрьской, Западно-Сибирской, Забайкальской, Южно-Уральской и Юго-Восточной железных дорог, что составляет более 5 % от общего количества СП в холдинге «РЖД». Перечень СП с указанием периода сбора данных и объема выборки представлен в таблице 2.5.

Расчет коэффициентов корреляции и составление корреляционной матрицы выполнены на основе выражений (2.1), (2.2) с применением программного комплекса *Statistica*. К рассмотрению принимались следующие влияющие факторы: объем производственной деятельности $V_{произв}$, измеритель которого принимался в соответствии с таблицей 2.1; площадь зданий $S_{зд}$, м²; температура воздуха t , °С; продолжительность светового дня $T_{св.дня}$, с; облачность Cl , %; ветер F_w , м/с; снег, Sn . Последний показатель учитывается в виде отношения количества дней за период, в которые наблюдались осадки в виде снега, к общему количеству дней и измеряется в относительных единицах.

Для сбора информации о климатических факторах использованы открытые интернет-источники (портал gp5.ru, вкладка «Архив погоды»).

Таблица 2.5 – Перечень СП, выбранных для анализа влияния факторов на расход электрической энергии

№ п/п	Наименование СП	Железная дорога	Период сбора данных	Объем вы-борки
1	2	3	4	5
Отделы материально-технического обеспечения				
1	ОМТО-1	ЗСЖД	январь 2010 г. – декабрь 2012 г.	36
2	ОМТО-2	ЗСЖД	январь 2011 г. – декабрь 2012 г.	24
3	ОМТО-3	ЗСЖД	октябрь 2010 г. – сентябрь 2012 г.	24
4	ОМТО-4	ЗСЖД	январь 2010 г. – декабрь 2012 г.	36
5	Главный материаль-ный склад	ЗСЖД	январь 2010 г. – октябрь 2012 г.	34
Итого				154
Региональные центры связи				
6	РЦС-1	МЖД	январь 2010 г. – сентябрь 2012 г.	33
7	РЦС-2	МЖД	январь 2010 г. – сентябрь 2012 г.	33
8	РЦС-3	МЖД	январь 2010 г. – сентябрь 2012 г.	33
9	РЦС-4	МЖД	январь 2010 г. – сентябрь 2012 г.	33
10	РЦС-5	МЖД	январь 2010 г. – сентябрь 2012 г.	33
11	РЦС-6	МЖД	январь 2011 г. – сентябрь 2012 г.	21
12	РЦС-7	МЖД	январь 2010 г. – август 2012 г.	32
13	РЦС-8	МЖД	январь 2010 г. – сентябрь 2012 г.	33
14	РЦС-9	МЖД	январь 2010 г. – сентябрь 2012 г.	33
Итого				284

Продолжение таблицы 2.5

1	2	3	4	5
Дирекция по энергообеспечению				
15	ЭЭ Брянск	МЖД	апрель 2010 г. – сентябрь 2012 г.	30
16	ЭЭ Калуга	МЖД	апрель 2010 г. – сентябрь 2012 г.	30
17	ЭЭ Курск	МЖД	апрель 2010 г. – сентябрь 2012 г.	30
18	ЭЭ Москва	МЖД	апрель 2010 г. – сентябрь 2012 г.	30
19	ЭЭ Орел	МЖД	апрель 2010 г. – сентябрь 2012 г.	30
20	ЭЭ Рязань	МЖД	апрель 2010 г. – сентябрь 2012 г.	30
21	ЭЭ Смоленск	МЖД	апрель 2010 г. – сентябрь 2012 г.	30
22	ЭЭ Тула	МЖД	апрель 2010 г. – сентябрь 2012 г.	30
Итого				240
Дистанции погрузочно-разгрузочных работ				
23	МЧ-4 Барнаул	ЗСЖД	январь 2010 г. – июль 2012 г.	31
24	МЧ-10 Апатиты	ОЖД	январь 2010 г. – сентябрь 2012 г.	33
Итого				64
Дистанции гражданских сооружений				
25	НГЧ-14 Кандалакша	ОЖД	январь 2009 г. – сентябрь 2012 г.	45
26	НГЧ-1 Омск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
27	НГЧ-2 Новосибирск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
28	НГЧ-3 Кемерово	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
29	НГЧ-4 Барнаул	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
Итого				141
Дистанции сигнализации, централизации и блокировки				
30	ШЧ-1 Входная	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24

Продолжение таблицы 2.5

1	2	3	4	5
31	ШЧ-2 Омск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
32	ШЧ-5 Барабинск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
33	ШЧ-6 Новосибирск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
34	ШЧ-8 Инская	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
35	ШЧ-10 Алтайская	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
36	ШЧ-11 Барнаул	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
37	ШЧ-14 Карасук	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
38	ШЧ-17 Тайга	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
39	ШЧ-18 Кемерово	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
40	ШЧ-20 Белово	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
41	ШЧ-20 Белово	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
42	ШЧ-21 Новокузнецк	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
43	ШЧ-2	МЖД	июнь 2010 г. – декабрь 2012 г.	31
44	ШЧ-4 Железнодорожная	МЖД	январь 2010 г. – декабрь 2012 г.	36
45	ШЧ-5	МЖД	январь 2010 г. – декабрь 2012 г.	36
46	ШЧ-6 Перово	МЖД	январь 2010 г. – декабрь 2012 г.	36
47	ШЧ-8 Голутвин	МЖД	январь 2011 г. – декабрь 2012 г.	24
48	ШЧ-10	МЖД	январь 2010 г. – декабрь 2012 г.	36
49	ШЧ-13	МЖД	январь 2009 г. – декабрь 2012 г.	48
50	ШЧ-14 Рижско-Савеловская	МЖД	январь 2010 г. – декабрь 2012 г.	36

Продолжение таблицы 2.5

1	2	3	4	5
51	ШЧ-15 Московско-Смоленская	МЖД	январь 2010 г. – декабрь 2012 г.	36
52	ШЧ-17	МЖД	январь 2010 г. – декабрь 2012 г.	36
53	ШЧ-19 Орловско-Курская	МЖД	январь 2010 г. – сентябрь 2012 г.	33
54	ШЧ-21 Курск	МЖД	январь 2010 г. – декабрь 2012 г.	36
55	ШЧ-24 Кашира	МЖД	январь 2010 г. – декабрь 2012 г.	36
56	ШЧ-26	МЖД	январь 2010 г. – декабрь 2012 г.	36
57	ШЧ-28	МЖД	январь 2010 г. – декабрь 2012 г.	36
58	ШЧ-31 Смоленск	МЖД	январь 2009 г. – декабрь 2012 г.	48
59	ШЧ-32 Вязьма	МЖД	январь 2009 г. – декабрь 2012 г.	48
60	ШЧ-35 Брянск-Льговский	МЖД	январь 2009 г. – декабрь 2012 г.	48
Итого				964
Дистанции пути				
61	ПЧ-8 Барабинск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
62	ПЧ-3 Омск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
63	ПЧ-4 Калачинск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
64	ПЧ-5 Называевская	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
65	ПЧ-6 Иртышское	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
66	ПЧ-7 Татарская	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
67	ПЧ-10 Чулымская	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
68	ПЧ-11 Новосибирск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
69	ПЧ-12 Болотное	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24

Продолжение таблицы 2.5

1	2	3	4	5
70	ПЧ-13 Инская	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
71	ПЧ-14 Тогучин	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
72	ПЧ-16 Алтайская	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
73	ПЧ-17 Барнаул	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
74	ПЧ-18 Рубцовск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
75	ПЧ-19 Заринская	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
76	ПЧ-22 Кулунда	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
77	ПЧ-24 Карасук	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
78	ПЧ-25 Камень	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
79	ПЧ-26 Сузун	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
80	ПЧ-27 Тайга	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
81	ПЧ-28 Анжерская	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
82	ПЧ-29 Томск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
83	ПЧ-31 Белово	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
84	ПЧ-32 Прокопьевск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
85	ПЧ-35 Полосухино	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
Итого				600
Дистанции электроснабжения				
86	ЭЧ-1 Входная	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
87	ЭЧ-2 Омск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
88	ЭЧ-5 Барабинск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24

Продолжение таблицы 2.5

1	2	3	4	5
89	ЭЧ-6 Новосибирск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
90	ЭЧ-7 Тайга	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
91	ЭЧ-8 Инская	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
92	ЭЧ-9 Алтайская	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
93	ЭЧ-10 Барнаул	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
94	ЭЧ-13 Камень-на-Оби	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
95	ЭЧ-14 Карасук	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
96	ЭЧ-16 Кемерово	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
97	ЭЧ-17 Белово	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
98	ЭЧ-18 Новокузнецк	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
99	ЭЧ-1 Чита	ЗабЖД	октябрь 2009 г. – март 2012 г.	30
100	ЭЧ-7 Шилка	ЗабЖД	январь 2010 г. – июнь 2012 г.	30
101	ЭЧ-Оренбург	ЮУЖД	январь 2010 г. – сентябрь 2012 г.	33
102	ЭЧ-7 Волховстрой	ОЖД	январь 2010 г. – сентябрь 2012 г.	33
Итого				438
Локомотивные сервисные (ремонтные) депо				
103	ТЧР-21 Таганай	ЮУЖД	январь 2009 г. – май 2011 г.	29
104	ТЧР-22 Южный Урал	ЮУЖД	январь 2009 г. – июнь 2011 г.	30
105	ТЧР-23 Зауралье	ЮУЖД	апрель 2009 г. – июнь 2011 г.	27
106	ТЧР-25 Аркаим	ЮУЖД	январь 2008 г. – май 2011 г.	41
107	ТЧР-26 Орск	ЮУЖД	январь 2009 г. – июнь 2011 г.	30

Окончание таблицы 2.5

1	2	3	4	5
108	ТЧР-22 Воронеж	ЮВЖД	август 2010 г. – июль 2012 г.	24
109	СЛД Барабинск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
110	СЛД Барнаул	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
111	СЛД Инская	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
112	СЛД Карасук	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
113	СЛД Топки	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
Итого				301
Вагонные эксплуатационные депо				
114	ВЧД-6 Инская	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
115	ВЧД-11 Алтайская	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
116	ВЧД-12 Входная	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
117	ВЧД-23 Белово	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
118	ВЧД-25 Новокузнецк- Сев	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
119	ВЧД-27 Тайга	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
Итого				144
Моторвагонные депо				
120	ТЧ-31 Омск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
121	ТЧ-32 Новосибирск	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
122	ТЧ-33 Новокузнецк	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
123	ТЧ-34 Алтайская	ЗСЖД	январь 2014 г. – декабрь 2015 г.	24
Итого				96
Итого по всем СП				3426

Корреляционные матрицы для различных структурных подразделений железнодорожного транспорта приведены в таблицах 2.6 – 2.16. **Жирным шрифтом**

Таблица 2.16 – Корреляционная матрица для сервисных локомотивных депо

Фактор	Расход электроэнергии	Объем производственной деятельности	Площадь зданий	Температура	Продолжительность светового дня	Облачность	Ветер	Снег
Расход электроэнергии	1,000	0,675	0,159	-0,434	-0,389	-0,196	-0,176	0,272
Объем производственной деятельности	–	1,000	0,109	0,028	0,036	-0,415	-0,048	0,096
Площадь зданий	–	–	1,000	0,057	-0,026	0,049	0,168	0,085
Температура	–	–	–	1,000	0,892	-0,269	-0,077	-0,619
Продолжительность светового дня	–	–	–	–	1,000	-0,376	-0,079	-0,329
Облачность	–	–	–	–	–	1,000	0,226	-0,001
Ветер	–	–	–	–	–	–	1,000	-0,017
Снег	–	–	–	–	–	–	–	1,000

По итогам исследований можно сделать следующие выводы о степени влияния принятых к рассмотрению факторов на расход электрической энергии.

1. Объем производственной деятельности. Указанный фактор оказывает влияние на расход электрической энергии главным образом для тех структурных подразделений, которые связаны с выполнением одного основного вида работ (сервисные локомотивные депо, моторвагонные депо – ремонт подвижного состава; эксплуатационные вагонные депо – техническое обслуживание вагонов; дистанции погрузочно-разгрузочных работ – грузопереработка; отделы материально-технического обеспечения – снабжение товарами).

Коэффициенты корреляции для таких подразделений находятся в интервале 0,445 – 0,699. Для дистанций электроснабжения и дистанций СЦБ это влияние значительно слабее (коэффициенты корреляции 0,174 и 0,227), а для остальных рассмотренных подразделений оно совсем незначительное. Следовательно, при формировании математических моделей электропотребления для таких подразделений нет необходимости в учете данного фактора.

2. Площадь зданий. Указанный фактор оказался наиболее значимым для структурных подразделений, в составе которых имеется значительное количество административно-бытовых зданий (региональные центры связи, дистанции гражданских сооружений, электроснабжения, моторвагонные депо), с коэффициентами корреляции 0,298 – 0,564. Несколько меньше коэффициент корреляции для дистанций пути (0,154). Для прочих подразделений влияние указанного фактора незначительно. В границах одного СП данный показатель изменяется очень редко, поэтому включать его в математическую модель не рекомендуется.

3. Климатические факторы. Для всех структурных подразделений значительное влияние на расход электрической энергии оказывают температура воздуха и продолжительность светового дня (абсолютные значения коэффициентов корреляции 0,308 – 0,723 и 0,292 – 0,732), что связано с широким использованием систем освещения и электроотопления. В большинстве случаев несколько менее значимым оказывается влияние ветра и облачности (коэффициенты корреляции не более 0,697 и 0,386). Осадки в виде снега в большинстве рассмотренных случаях не оказали существенного влияния на электропотребление (коэффициент корреляции не более 0,272).

4. Как и в перевозочном процессе, в неперевозочных видах деятельности наблюдаются нелинейные зависимости расхода ТЭР от влияющих факторов (рисунок 2.4).

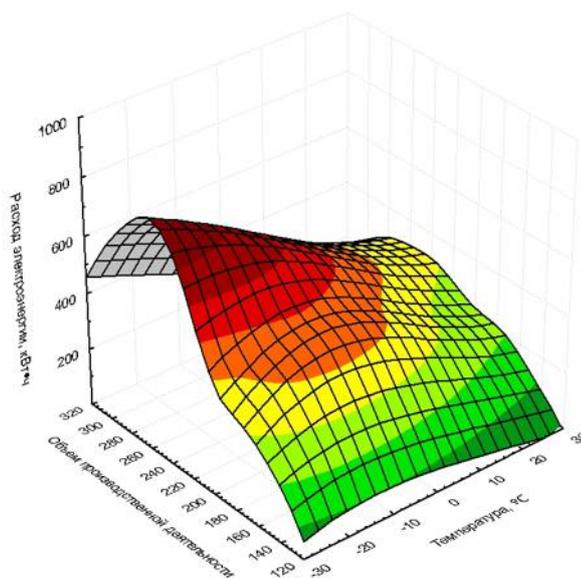


Рисунок 2.4 – Зависимость расхода электроэнергии от температуры и объема производства для дистанций СЦБ

По результатам корреляционного анализа влияющих факторов в перевозочном процессе и неперевозочных видах деятельности можно сделать вывод, что в большинстве случаев наблюдается существенная мультиколлинеарность между различными факторами (например, масса состава и средняя нагрузка на ось вагона, участковая и техническая скорость, климатические факторы). Это обуславливает необходимость проведения исследований по исключению мультиколлинеарности и отбору факторов для формирования конкретных математических моделей.

2.3 Разработка методологии отбора факторов, влияющих на использование топливно-энергетических ресурсов в производственных процессах железнодорожного транспорта (на примере электроэнергии)

Как показывают исследования, выполненные в п. 2.1 и 2.2, количество факторов, влияющих на расход электрической энергии, может быть весьма значительным. Так, для перевозочного процесса рассматриваются не менее семи переменных производственных и эксплуатационных факторов и одного климатического фактора, а для непроизводственных видов деятельности – не менее четырех производственных и пяти климатических факторов. При этом в ряде случаев наблюдается мультиколлинеарность между этими факторами.

В связи с этим возникает проблема с отбором наиболее информативных факторов, которые следует включить в математическую модель. Задача отбора информативных признаков является частным случаем задачи «понижение размерности». При этом она представляет собой определение нерелевантных признаков, т.е. таких, которые не несут полезной информации в контексте решения поставленной задачи.

Задача отбора информативных признаков для включения их в математическую модель электропотребления может быть формализована следующим образом. Пусть исходная выборка A состоит из векторов значений влияющих факторов x размером $1 \times n$ и соответствующих им значений расхода электрической энергии:

$$A = \left\{ (x^i; W^i) \right\}_{i=1}^k. \quad (2.5)$$

Необходимо среди множества факторов $F = \{x_j\}_{j=1}^n$ выбрать некое подмножество информативных факторов.

Анализ работ отечественных и зарубежных ученых [189 – 194] позволил сформировать классификацию методов отбора факторов, представленную на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Классификация методов отбора факторов для включения в математическую модель расхода электрической энергии

Методы-фильтры используются на предварительном этапе и не требуют формирования математической модели электропотребления. Они основаны только на информации, имеющейся в исходной выборке A . Эти алгоритмы демонстрируют наилучшие результаты при решении задач классификации.

Методы-обертки выбирают подмножества информативных факторов на основе их информативности для алгоритмов обучения. К ним относятся экспоненциальные алгоритмы поиска, примером которых является метод полного перебора, алгоритм FOCUS, алгоритм ветвей и границ.

В методе полного перебора происходит перебор всех возможных подмножеств факторов. Этот метод является наиболее точным и достаточно прост в реализации, однако он имеет значительную трудоемкость и требует применения вычислительных машин большой мощности. Поэтому, как правило, данный метод используется при небольшом количестве влияющих факторов (не более пяти) [194].

Алгоритм FOCUS является разновидностью данного метода, однако выполняет подбор факторов вначале по подмножествам мощностью 1, затем по подмножествам мощностью 2 и т.д., либо в обратном порядке.

Алгоритм ветвей и границ требует меньшего количества операций, чем предыдущие методы. Рассмотрим порядок работы этого алгоритма на примере следующей задачи. Требуется выполнить отбор информативных факторов для разработки математической модели зависимости УРЭ w от массы поездов в четном и нечетном направлении m_1 и m_2 , температуры воздуха t и объема рекуперации $W_{\text{рек}}$. Составляется дерево набора факторов (рисунок 2.6).

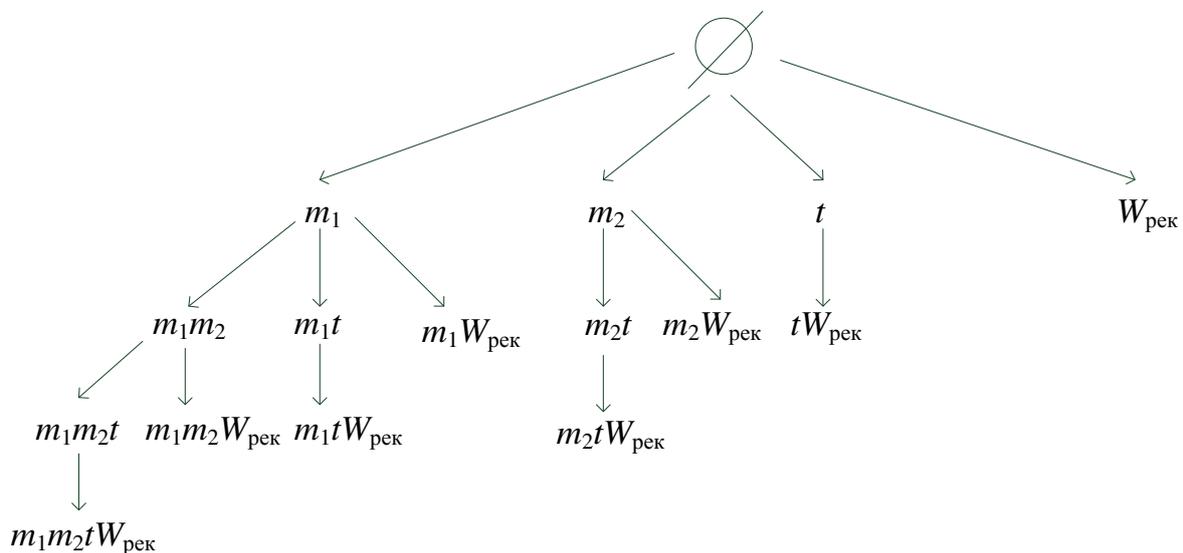


Рисунок 2.6 – Дерево набора факторов для формирования алгоритма ветвей и границ

Затем необходимо задаться величинами $d \geq 0$ и $\mu \geq 1$, которые будут определять скорость алгоритма. Чем меньше указанные величины, тем быстрее будет алгоритм. Перебор различных наборов признаков будет прекращен при выполнении следующих условий [191]:

$$\exists j: Q(\Psi) \geq \mu Q_j^* \quad \text{и} \quad |\Psi| \geq j + d, \quad (2.6)$$

где Q – выбранный внешний критерий оценки качества модели;

Ψ – рассматриваемое подмножество набора факторов;

Q_j^* – значение критерия на самом лучшем наборе мощностью j из ранее рассмотренных.

Другими словами, при исследовании оценивается качество модели при текущем наборе факторов, и если в какой-то момент времени выполняется условие (2.6), то перебор прекращается и можно не рассматривать узлы дерева, являющиеся потомком данного узла. Для повышения эффективности данного алгоритма целесообразно держать в приоритете обхода потенциально более информативные ветви, то есть выбирать на каждом шаге более значимый признак. Для этого следует оценить коэффициенты корреляции между факторами и расходом электрической энергии и упорядочить признаки по этому показателю.

Другой группой методов-оберток являются последовательные алгоритмы поиска. К ним относятся алгоритм «последовательный с включением» (прямой жадный алгоритм), алгоритм «последовательный с исключением» (обратный жадный алгоритм), алгоритм поочередного добавления и удаления признаков.

В алгоритме «последовательный с включением» начинают с построения модели, включающей лишь один фактор, имеющий наибольший парный коэффициент корреляции с расходом электрической энергии. Затем вычисляют частные F -статистики для всех оставшихся факторов и включают в модель фактор с большей F -статистикой [189]. Процесс продолжается до тех пор, пока не наберется определенное число факторов или F -статистики не окажутся меньше заданного значения. Этот метод склонен включать в набор лишние факторы.

В алгоритме «последовательный с исключением» процесс выполняется противоположным образом. Сначала в модель включают все факторы, а затем поочередно исключают переменные с меньшей F -статистикой. Данный метод может оказаться предпочтительнее предыдущего в случае, когда имеется априорная информация о том, что информативных признаков значительно больше, чем неинформативных.

Указанные алгоритмы работают достаточно быстро, однако не всегда на практике приводят к хорошим результатам. Для устранения этого недостатка может применяться алгоритм поочередного добавления и удаления признаков, который является комбинацией предыдущих алгоритмов. Сначала выполняется прямой жадный алгоритм. В какой-то момент алгоритм останавливается и запускается обратный жадный алгоритм, который исключает из набора избыточные факторы, добавленные прямым алгоритмом. Затем процесс повторяется.

Условием остановки алгоритма может служить прекращение или замедление уменьшения выбранного внешнего критерия Q для оптимального набора на текущей итерации по сравнению с предыдущими итерациями. Также можно отслеживать состав оптимального набора признаков и останавливать алгоритм, если набор стабилизируется.

Данный подход имеет более медленную сходимость по сравнению с алгоритмами «последовательный с включением» и «последовательный с исключением», однако в практических задачах он в ряде случаев дает лучшие результаты.

К третьей группе методов-оберток относятся рандомизированные алгоритмы поиска, в т.ч. фильтр Лас-Вегас, алгоритм симуляции отжига, генетические алгоритмы.

Фильтр Лас-Вегас на первом шаге выбирает подмножество признаков Ψ случайным образом и рассчитывает его функцию оценки $Q(\Psi)$. Если это значение оказывается больше или равно заранее заданного порога и размер этого подмножества меньше, чем размер ранее найденного наилучшего подмножества, то новое подмножество будет считаться наилучшим.

Для избегания остановки в локальных максимумах может применяться алгоритм имитации отжига. Если система находится в точке локального максимума, то вероятность того, что она находится в этом состоянии Ψ , равна:

$$P(\Psi) = \frac{e^{-\frac{E(\Psi)}{kT}}}{\sum_{\Psi \in \bar{\Psi}} e^{-\frac{E(\Psi)}{kT}}}, \quad (2.7)$$

где $E(\Psi)$ – энергия системы;

T – температура системы;

k – постоянная Больцмана;

$\bar{\Psi}$ – множество всех подмножеств исходного множества факторов.

Тогда вероятность того, что система перейдет из состояния Ψ в состояние Ψ' , равна:

$$P(\Psi \rightarrow \Psi') = e^{-\frac{E(\Psi') - E(\Psi)}{kT}}. \quad (2.8)$$

Если значение этой вероятности оказывается достаточно малым (менее некоторого заранее заданного значения), то алгоритм завершается.

Генетический алгоритм отбора информативных признаков представляет собой алгоритм эвристического поиска, являющиеся мощным способом решения сложных задач оптимизации, позволяющие находить приближенные решения, очень близкие к оптимуму за короткое время [195].

Алгоритм функционирует следующим образом.

1. Инициализируется случайная популяция из определенного количества наборов факторов B :

$$R := \{\Psi^1, \dots, \Psi^B\}. \quad (2.9)$$

2. Индивиды ранжируются по критерию Q :

$$Q(\Psi^1) \leq \dots \leq Q(\Psi^B). \quad (2.10)$$

3. Если оказывается, что $Q(\Psi^1) \leq Q^*$, которое задается заранее, то производится селекция и присваивается $Q^* := Q(\Psi^1)$.

4. Порождается следующее поколение путем скрещиваний и мутаций:

$$R_{next} := \{ \sim (\Psi' \times \Psi'') \mid \Psi', \Psi'' \in R \} \cup R. \quad (2.11)$$

5. Процесс повторяется, пока не достигнуто некоторое заранее заданное число поколений или не получено требуемое значение функции оценки.

Опыт применения генетических алгоритмов для отбора информативных признаков приведен в работах [195 – 206].

Встроенные методы отбора факторов для включения в математическую модель электропотребления осуществляют выбор подмножества признаков непосредственно в процессе обучения. К ним можно отнести рекурсивную оценку признаков, которая применяется в методе опорных векторов SVM, а также случайный полиномиальный логит, который применяется для полиномиальной логистической регрессии.

Еще одним способом понижения размерности является конструирование признаков, при котором на основе имеющегося набора факторов формируют новые признаки. К таким методам относят метод главных компонент, кластеризация признаков, автокодировщик, регуляризованный случайный лес, спектральные и волновые преобразования признаков и др. [191].

Наиболее часто применяется метод главных компонент (МГК), главная идея которого заключается в объединении нескольких коррелированных переменных в одну, которая будет являться линейной комбинацией исходных переменных.

Решение модели факторного анализа на основе главных компонент описано в [207]. Суть задачи заключается в аппроксимации известных заранее признаков (факторов) $x^{(1)}, x^{(2)} \dots x^{(p)}$ с применением линейных функций от заданного числа общих факторов $f^{(1)}(m), \dots, f^{(m)}(m)$. Тогда

$$X_m = A_m F(m), \quad (2.12)$$

где A_m – матрица размером $p \times m$, составленная из первых m столбцов матрицы A , которая является матрицей нагрузок общих факторов на исследуемые признаки;

$$F(m) = (f^{(1)}(m), \dots, f^{(m)}(m))^T. \quad (2.13)$$

В методе главных компонент элементы матрицы A_m находятся путем минимизации отличий ковариационной матрицы Σ исследуемого вектора X от ковариационной матрицы $\Sigma_X = A_m A_m^T$. В этом случае $f^{(i)}(m)$ определяется пропорционально i -й главной компоненте вектора X .

Рассмотрим применение МГК применительно к выборкам исходных данных о расходе электрической энергии и влияющих факторах по объектам железнодорожного транспорта из числа рассмотренных ранее в п. 2.1 и 2.2:

из 2334 поездок, выполненных локомотивными бригадами эксплуатационного локомотивного депо Барабинск за 1-е полугодие 2015 г. в пассажирском движении;

из 4658 поездок, выполненных локомотивными бригадами эксплуатационного локомотивного депо Карасук за 1-е полугодие 2015 г.;

из 742 поездок, выполненных локомотивными бригадами моторвагонного депо Омск за 2015 г. на участке Омск – Иртышское в пригородном движении;

из 41 значения, полученного для сервисного локомотивного депо Аркаим Южно-Уральской железной дороги;

из 48 значений, полученных для дистанции сигнализации, централизации и блокировки Брянск-Льговский Московской железной дороги;

из 33 значений, полученных для дистанции погрузочно-разгрузочных работ Апатиты Октябрьской железной дороги.

При формировании модели для ТЧЭ Барабинск в пассажирском движении методом главных компонент были сгенерированы три новых признака F_1 , F_2 , F_3 . Они являются фиктивными, т.е. не имеют физической реализации, однако позволяют объединить несколько корреляционно связанных реальных признаков в один. Факторные нагрузки этих новых признаков приведены в таблице 2.17 и на рисунке 2.7.

Таблица 2.17 – Факторные нагрузки сгенерированных признаков для модели электропотребления ТЧЭ Барабинск в пассажирском движении

Признак	F_1	F_2	F_3
t	0,016	-0,204	0,480
$T_{наг}$	0,175	0,003	-0,613
$V_{уч}$	0,982	0,019	0,002
$V_{техн}$	0,987	0,006	-0,039
$T_{прост}$	-0,034	-0,073	-0,690
m_c	0,107	0,726	0,149
q	-0,047	0,786	-0,105

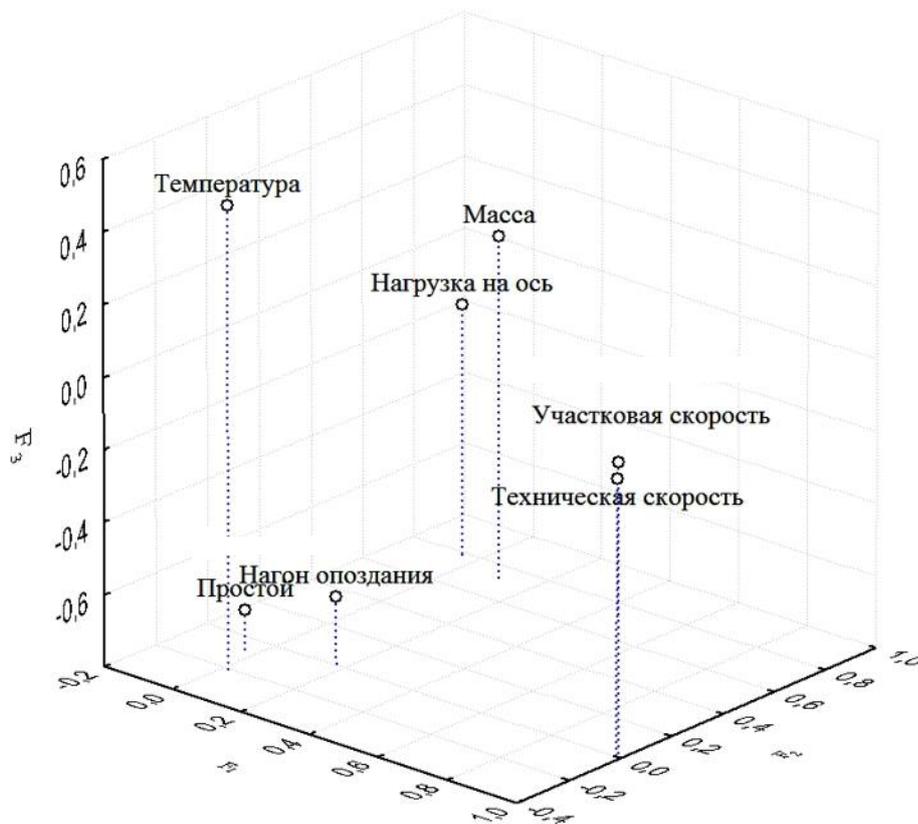


Рисунок 2.7 – График факторных нагрузок сгенерированных признаков для модели электропотребления ТЧЭ Барабинск в пассажирском движении

При этом дополнительно использовалось вращение факторов для получения простой структуры, при которой большинство наблюдений находится вблизи осей координат. С этой целью применялся метод «варимакс» для исходных (ненормализованных) данных (Varimax raw).

Из таблицы 2.17 и рисунка 2.7 видно, что признак F_1 в большей степени связан с участковой и технической скоростью, т.к. он имеет факторные нагрузки более 0,9. Признак F_2 связан с массой состава и нагрузкой на ось, а признак F_3 – с временем нагона и простоя и в меньшей степени с температурой воздуха.

Для выбора необходимого количества новых признаков можно воспользоваться двумя способами [207]:

– критерий Кайзера: в рассмотрение принимаются только факторы, которым соответствуют собственные числа ковариационной матрицы больше 1;

– критерий каменистой осыпи: отбрасываются все факторы, соответствующие собственные числа которых мало отличаются друг от друга.

Для анализа критерия Кайзера сформирована таблица 2.18.

Собственные числа для каждого из сгенерированных признаков оказываются больше единицы, следовательно, в модели необходимо оставить все три признака. При этом накопленная доля общей дисперсии сравнительно невелика и составляет 61,3 %. Следовательно, около 39 % дисперсии объясняются факторами, не включенными в модель.

Для анализа критерия каменистой осыпи формируется рисунок 2.8.

Таблица 2.18 – Собственные числа и доля общей дисперсии сгенерированных признаков для модели электропотребления ТЧЭ Барабинск в пассажирском движении

Признак	Собственные числа	Доля общей дисперсии, %	Накопленные собственные числа	Накопленная доля общей дисперсии, %
F_1	2,000	28,6	2,000	28,6
F_2	1,190	17,0	3,190	45,6
F_3	1,103	15,8	4,293	61,3

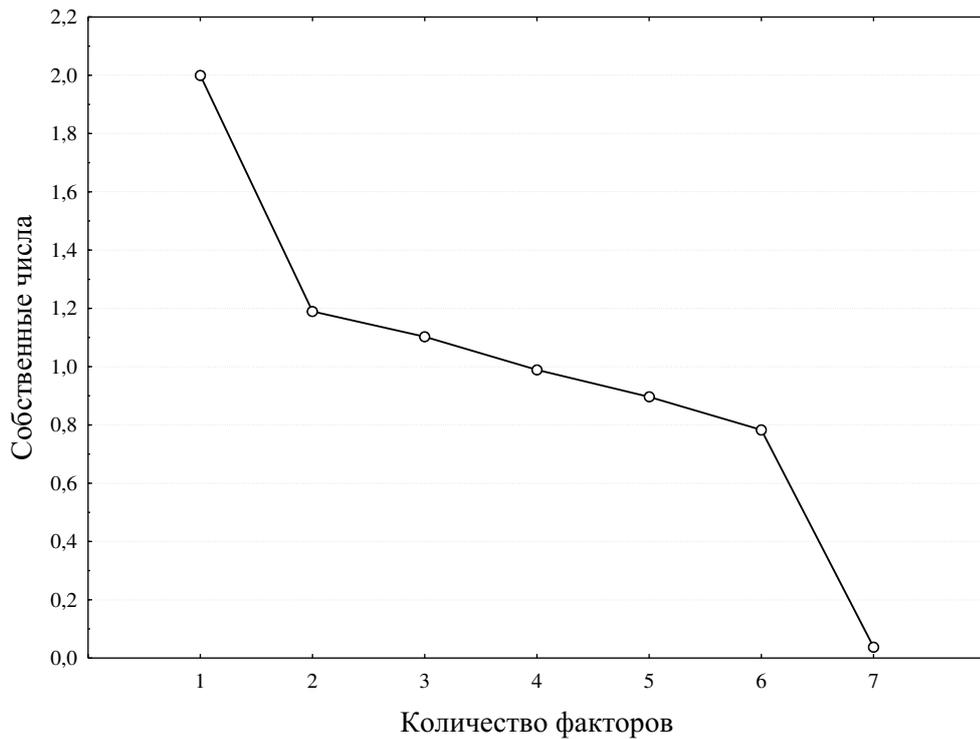


Рисунок 2.8 – Критерий каменистой осыпи для модели электропотребления ТЧЭ Барабинск в пассажирском движении

Начиная со второго признака, собственные числа мало отличаются друг от друга. Следовательно, по этому критерию следует принимать к рассмотрению только признаки F_1 и F_2 . Однако в этом случае накопленная доля общей дисперсии составит 45,6 %, что, безусловно, снижает точность модели.

Таким образом, по результатам анализа критериев Кайзера и каменистой осыпи к рассмотрению следует принимать все три сгенерированных признака, на основе которых строится регрессионная модель.

При формировании модели для дистанции сигнализации, централизации и блокировки Брянск-Льговский методом главных компонент были сгенерированы два новых признака F_1 , F_2 . Факторные нагрузки новых признаков приведены в таблице 2.19.

В данном случае признак F_1 в большей степени связан с метеорологическими факторами, за исключением ветра, а F_2 – с объемом производственной деятельности.

Для анализа критерия Кайзера сформирована таблица 2.20, а для критерия каменистой осыпи – рисунок 2.9.

Таблица 2.19 – Факторные нагрузки сгенерированных признаков для модели электропотребления ШЧ 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 2.20 – Собственные числа и доля общей дисперсии сгенерированных признаков для модели электропотребления ШЧ 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

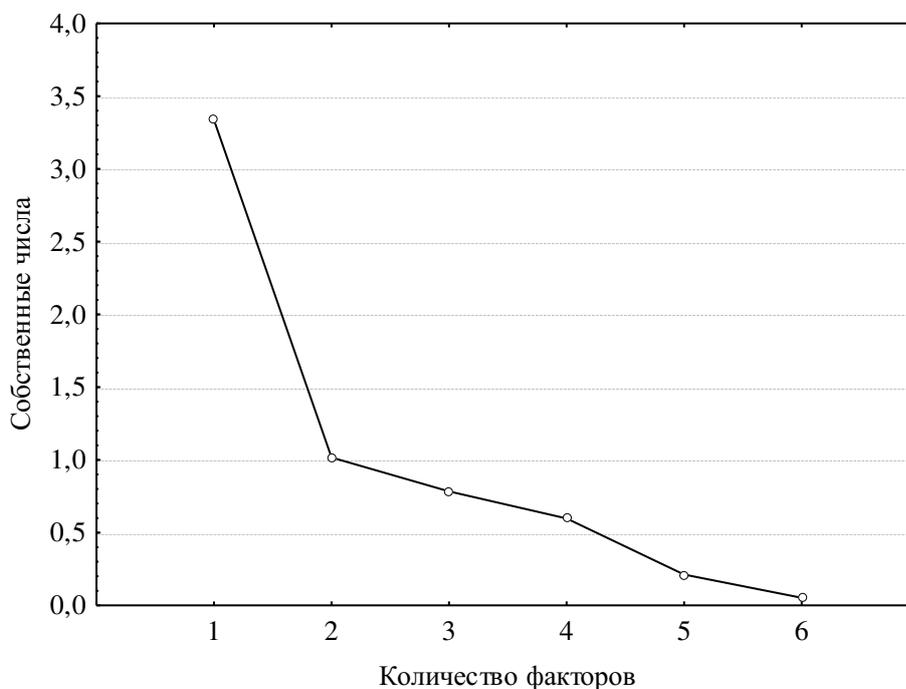


Рисунок 2.9 – Критерий каменной осыпи для модели электропотребления ШЧ Брянск-Льговский

Собственные числа для всех признаков оказываются больше единицы. Накопленная доля общей дисперсии составляет 72,55 %. Следовательно, целесообразно оставить в модели два фактора.

Аналогичные исследования выполнены для остальных принятых к рассмотрению объектов железнодорожного транспорта.

С учетом изложенного предложена методология отбора факторов, влияющих на расход ТЭР в производственных процессах железнодорожного транспорта, представленная в виде укрупненного алгоритма (рисунок 2.10).

Исходными данными для алгоритма являются выборка значений расхода ТЭР и соответствующих влияющих факторов. В соответствии с формулами (2.1) – (2.2) осуществляется формирование нормированной корреляционной матрицы, а затем с помощью выражений (2.3), (2.4) выполняется проверка значимости коэффициентов корреляции.

Если не найдено ни одного фактора, значимо влияющего на расход ТЭР, необходимо выполнить поиск иных факторов, ранее не принятых к рассмотрению, для чего требуется более тщательно изучить процесс потребления ТЭР на данном объекте железнодорожного транспорта.

В случае, если установлены влияющие факторы, осуществляется их проверка на мультиколлинеарность. При отсутствии мультиколлинеарности все значимые факторы включаются в модель расхода ТЭР. В противном случае следует применить один или несколько из рассмотренных в настоящем подразделе методов отбора факторов. Выбор наилучшего метода осуществляется следующим образом.

1. Исходная выборка разделяется случайным образом на обучающую и тестовую. Затем на основе данных из обучающей выборки строится регрессионная модель энергопотребления для различных методов отбора факторов.

2. Осуществляется оценка точности моделей по обучающей и тестовой выборке.

3. Осуществляется отбор факторов, входящих в набор наилучшего с точки зрения показателей точности метода.

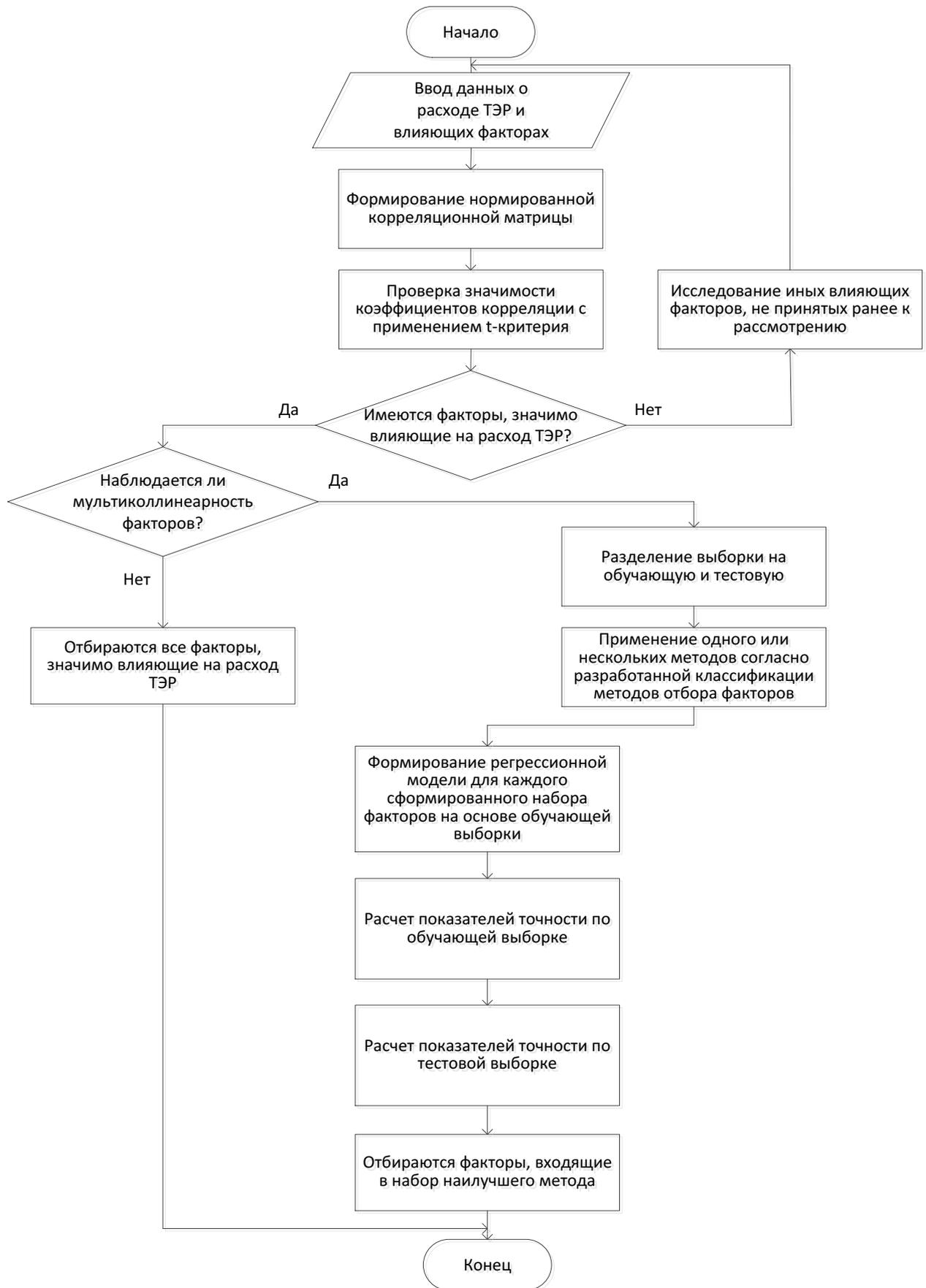


Рисунок 2.10 – Укрупненный алгоритм отбора факторов, влияющих на использование ТЭР в производственных процессах железнодорожного транспорта

Выполнена апробация представленной методологии на примере ранее принятых к рассмотрению производственных процессов в следующих СП:

для перевозочного процесса – ТЧЭ Карасук, ТЧЭ Барабинск, ТЧприг Омск;

для неперевозочных видов деятельности – СЛД Аркаим, ШЧ Брянск-Льговский, МЧ Апатиты.

Исходные выборки приведены в приложении А.

Пусть имеется выборка $A = \{(X_i, W_i)\}_{i=1}^n$ ($A \subset \chi \times \mathbb{R}$, χ – пространство входных значений). Задача состоит в нахождении функции F , наилучшим образом описывающей зависимость между расходом электрической энергии и влияющими факторами:

$$W = F(X_1, X_2 \dots X_m), \quad (2.14)$$

где W – расход электрической энергии;

$X_1, X_2 \dots X_m$ – производственные, климатические и иные факторы, оказывающие влияние на расход электрической энергии.

По итогам формирования нормированных корреляционных матриц установлено, что наблюдается мультиколлинеарность между факторами для всех принятых к рассмотрению объектов. Следовательно, необходимо рассмотреть применение специальных методов отбора факторов.

Из числа рассмотренных подходов для дальнейших исследований примем к рассмотрению следующие методы отбора факторов:

- 1) последовательный с включением (прямой жадный алгоритм);
- 2) последовательный с исключением (обратный жадный алгоритм);
- 3) метод главных компонент.

Схема эксперимента была сформирована следующим образом. Исходная выборка разделялась случайным образом на обучающую и тестовую в соотношении 80 % / 20 %. Затем на основе данных из обучающей выборки строилась регрессионная модель электропотребления для различных методов отбора факторов. Дополнительно рассматривался случай, когда в модель включаются все факторы.

Построение регрессионной модели ведется на основе метода наименьших квадратов [189]. Пусть формула для построения линейной модели регрессии выглядит следующим образом:

$$y_u = \sum_{i=0}^k b_i x_{iu}, \quad (2.15)$$

где b_i – расчетные коэффициенты модели; x_{iu} – входные переменные.

При использовании метода наименьших квадратов осуществляется минимизация суммы квадратов расхождений между фактическими значениями модели и откликами Q . С этой целью вычисляются и приравниваются к нулю частные производные функции Q по переменным b_i :

$$\frac{\partial Q}{\partial b_i} = 0. \quad (2.16)$$

В результате формируется система уравнений для нахождения коэффициентов b_i :

$$\begin{cases} b_0 \sum_{u=1}^n x_{0u}^2 + b_1 \sum_{u=1}^n x_{0u} x_{1u} + \dots + b_k \sum_{u=1}^n x_{0u} x_{ku} = \sum_{u=1}^n x_{0u} y_u, \\ b_0 \sum_{u=1}^n x_{1u} x_{0u} + b_1 \sum_{u=1}^n x_{1u}^2 + \dots + b_k \sum_{u=1}^n x_{1u} x_{ku} = \sum_{u=1}^n x_{1u} y_u, \\ \dots \\ b_0 \sum_{u=1}^n x_{ku} x_{0u} + b_1 \sum_{u=1}^n x_{ku} x_{1u} + \dots + b_k \sum_{u=1}^n x_{ku}^2 = \sum_{u=1}^n x_{ku} y_u. \end{cases}, \quad (2.17)$$

Решение данной системы уравнений запишется в виде:

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y, \quad (2.18)$$

где b и y – векторы-столбцы системы уравнений (3.14):

$$b = (b_0, b_1 \dots b_k)^T, \quad (2.19)$$

$$y = (y_1, y_2 \dots y_n)^T, \quad (2.20)$$

X – матрица, составленная из значений входных переменных:

$$X = \begin{pmatrix} x_{01} & x_{11} & \dots & x_{k1} \\ x_{02} & x_{12} & \dots & x_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{0N} & x_{1N} & \dots & x_{kN} \end{pmatrix}. \quad (2.21)$$

Затем определяются показатели, характеризующие точность полученных моделей. По данным обучающей выборки рассчитываются коэффициенты корреляции и детерминации, а по данным тестовой выборки – следующие показатели [209]:

средняя относительная погрешность *MAPE* (mean absolute percentage error):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|W_{\text{факт}} - W_{\text{мод}}|}{W_{\text{факт}}} 100 \%, \quad (2.22)$$

средняя квадратическая погрешность *RMSE* (root mean squared error):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_{\text{факт}} - W_{\text{мод}})^2}, \quad (2.23)$$

коэффициент вариации *CV* (coefficient of variation):

$$CV = \frac{RMSE}{\bar{W}_{\text{факт}}}, \quad (2.24)$$

где $W_{\text{факт}}$ – фактическое потребление ТЭР; $W_{\text{мод}}$ – прогнозное значение расхода ТЭР; $\bar{W}_{\text{факт}}$ – математическое ожидание фактического потребления ТЭР, рассчитанное по выборке из n значений.

Для оценки точности математических моделей, составленных для перевозочного процесса в грузовом и пассажирском движении, вместо значений расхода электроэнергии W принимались значения УРЭ.

Расчеты проводились с применением программы *Statistica* и пакета *Global Optimization Toolbox* программы *MATLAB*.

Результаты формирования регрессионных моделей электропотребления и расчет показателей их точности для рассматриваемых объектов представлены в таблицах 2.21 – 2.26.

Таблица 2.21 – Показатели точности регрессионных моделей электропотребления в производственных процессах ТЧЭ Барабинск при различных методах отбора факторов

Метод отбора факторов	Факторы, включаемые в модель	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции r_{xy}	Коэффициент детерминации r_{xy}^2	$MAPE$, %	$RMSE$, кВт·ч/10000 т·км бр.	CV
Все факторы	$t, T_{\text{наг}}, V_{\text{уч}}, V_{\text{техн}}, T_{\text{прост}}, m_c, q$	$w_{\text{уд}} = 72,99 - 0,67t - 0,39T_{\text{наг}} - 2,15V_{\text{уч}} + 3,57V_{\text{техн}} + 0,07T_{\text{прост}} + -0,07m_c - 1,03q$	0,68	0,46	10,20	16,68	0,13
Последовательный с включением (прямой жадный алгоритм)	$t, T_{\text{наг}}, V_{\text{уч}}, V_{\text{техн}}, m_c, q$	$w_{\text{уд}} = 72,99 - 0,67t - 0,39T_{\text{наг}} - 2,15V_{\text{уч}} + 3,56V_{\text{техн}} - -0,07m_c - 1,03q$	0,68	0,46	10,20	16,68	0,13
Последовательный с исключением (обратный жадный алгоритм)	$t, V_{\text{уч}}, V_{\text{техн}}, m_c$	$w_{\text{уд}} = 60,21 - 0,66t - 1,99V_{\text{уч}} + 3,38V_{\text{техн}} - 0,07m_c$	0,67	0,45	10,22	16,70	0,13
Метод главных компонент	F_1, F_2, F_3	$w_{\text{уд}} = 127,73 + 6,26F_1 - -8,23F_2 + 6,44F_3$	0,49	0,24	11,79	18,88	0,15

Таблица 2.22 – Показатели точности регрессионных моделей электропотребления в производственных процессах ТЧЭ Карасук при различных методах отбора факторов

Метод отбора факторов	Факторы, включаемые в модель	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции r_{xy}	Коэффициент детерминации r_{xy}^2	$MAPE$, %	$RMSE$, кВт·ч/10000 т·км бр.	CV
Все факторы	$t, V_{уч}, V_{техн}, T_{прост}, m_c, q$	$w_{уд} = 300,06 - 0,47t - 0,46V_{уч} - 0,26V_{техн} - 0,17T_{прост} - 0,02m_c - 3,65q$	0,72	0,52	15,17	32,96	0,19
Последовательный с включением (прямой жадный алгоритм)	$t, V_{уч}, V_{техн}, m_c, q$	$w_{уд} = 300,07 - 0,48t - 0,46V_{уч} - 0,27V_{техн} - 0,02m_c - 3,65q$	0,72	0,52	15,17	32,96	0,19
Последовательный с исключением (обратный жадный алгоритм)	$t, V_{уч}, m_c, q$	$w_{уд} = 295,64 - 0,48t - 0,66V_{уч} - 0,02m_c - 3,63q$	0,72	0,52	15,18	32,97	0,19
Метод главных компонент	F_1, F_2, F_3	$w_{уд} = 171,74 + 19,82F_1 - 29,72F_2 - 0,26F_3$	0,72	0,52	15,22	33,02	0,19

Таблица 2.23 – Показатели точности регрессионных моделей электропотребления в производственных процессах ТЧприг Омск при различных методах отбора факторов

Метод отбора факторов	Факторы, включаемые в модель	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции r_{xy}	Коэффициент детерминации r_{xy}^2	$MAPE$, %	$RMSE$, кВт·ч	CV
Все факторы	$t, W_{рек}, V_{уч}, V_{техн}, d_{авт}, m_c, q$	$W = 151,45 - 10,73t - 0,02W_{рек} + 3,52V_{уч} - 3,85V_{техн} + 13,61d_{авт} + 4,37m_c + 6,53q$	0,85	0,72	16,59	171,35	0,21
Последовательный с включением (прямой жадный алгоритм)	$t, V_{уч}, V_{техн}, m_c, q$	$W = 157,51 - 10,74t + 3,66V_{уч} - 4,00V_{техн} + 4,34m_c + 6,84q$	0,85	0,72	17,58	171,61	0,21
Последовательный с исключением (обратный жадный алгоритм)	t, m_c	$W = 130,19 - 10,56t + 4,58m_c$	0,84	0,71	15,75	166,88	0,20
Метод главных компонент	F_1, F_2, F_3	$W = 877,58 + 279,75F_1 + 14,51F_2 - 179,88F_3 - 3,91F_4$	0,83	0,68	18,32	182,43	0,22

Таблица 2.24 – Показатели точности регрессионных моделей электропотребления в производственных процессах СЛД Аркаим при различных методах отбора факторов

Метод отбора факторов	Факторы, включаемые в модель	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции r_{xy}	Коэффициент детерминации r_{xy}^2	MAPE, %	RMSE, кВт·ч	CV
Все факторы	$V_{\text{произв}}, t, T_{\text{св.дня}}, Cl, F_w, Sn$	$W = -35,05 + 1,19V_{\text{произв}} - 5,09t - 0,0008T_{\text{св.дня}} - 0,43Cl - 5,06F_w + 12,71Sn$	0,85	0,73	16,06	65,56	0,22
Последовательный с включением (прямой жадный алгоритм)	$V_{\text{произв}}, t$	$W = -98,42 + 1,17V_{\text{произв}} - 5,63t$	0,85	0,72	17,23	65,75	0,22
Последовательный с исключением (обратный жадный алгоритм)	$V_{\text{произв}}, t$	$W = -98,42 + 1,17V_{\text{произв}} - 5,63t$	0,85	0,72	17,23	65,75	0,22
Метод главных компонент	F_1, F_2	$W = 346,82 - 58,69F_1 + 19,83F_2$	0,61	0,38	17,56	60,43	0,18

Таблица 2.25 – Показатели точности регрессионных моделей электропотребления в производственных процессах ШЧ Брянск-Льговский при различных методах отбора факторов

Метод отбора факторов	Факторы, включаемые в модель	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции r_{xy}	Коэффициент детерминации r_{xy}^2	MAPE, %	RMSE, кВт·ч	CV
Все факторы	$V_{\text{произв}}, t, T_{\text{св.дня}}, Cl, F_w, Sn$	$W = 515,53 + 0,08V_{\text{произв}} - 6,70t - 0,0011T_{\text{св.дня}} + 0,13Cl - 18,84F_w + 96,79Sn$	0,96	0,92	6,63	33,05	0,08
Последовательный с включением (прямой жадный алгоритм)	$t, T_{\text{св.дня}}, Sn$	$W = 535,78 - 5,98t - 0,0015T_{\text{св.дня}} + 109,84Sn$	0,96	0,92	6,08	30,44	0,07
Последовательный с исключением (обратный жадный алгоритм)	t	$W = 501,42 - 8,97t$	0,95	0,90	8,01	39,79	0,10
Метод главных компонент	F_1, F_2	$W = 442,70 + 91,01F_1 - 7,68F_2$	0,93	0,87	8,15	48,76	0,12

Таблица 2.26 – Показатели точности регрессионных моделей электропотребления в производственных процессах МЧ Апатиты при различных методах отбора факторов

Метод отбора факторов	Факторы, включаемые в модель	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции r_{xy}	Коэффициент детерминации r_{xy}^2	MAPE, %	RMSE, кВт·ч	CV
Все факторы	$V_{\text{произв}}, t, T_{\text{св.дня}}, Cl, F_w, Sn$	$W = 376,51 + 0,15V_{\text{произв}} - 11,33t - 0,001T_{\text{св.дня}} - 1,35Cl - 0,78F_w + 269,07Sn$	0,87	0,75	19,61	90,72	0,25
Последовательный с включением (прямой жадный алгоритм)	$V_{\text{произв}}, t, Sn$	$W = 232,47 + 0,14V_{\text{произв}} - 13,96t + 307,89Sn$	0,86	0,74	21,61	83,82	0,23
Последовательный с исключением (обратный жадный алгоритм)	t	$W = 364,62 - 19,30t$	0,82	0,67	36,05	107,04	0,34
Метод главных компонент	F_1, F_2	$W = 343,35 - 164,13F_1 + 36,57F_2$	0,83	0,69	19,66	65,49	0,19

В результате анализа регрессионных моделей можно сделать следующие выводы.

1. При формировании модели использования ТЭР в перевозочном процессе все рассмотренные методы отбора факторов демонстрируют показатели точности, сопоставимые с вариантом, когда все факторы включаются в модель. Например, *MAPE* для пассажирского движения находится в пределах 10,20 – 11,79 %, для грузового 15,17 – 15,22 %, для пригородного 16,59 – 18,72 %.

При этом во всех случаях наихудшие результаты демонстрирует метод главных компонент, тогда как погрешности прямого и обратного жадного алгоритма практически одинаковы.

Однако следует отметить, что при прямом жадном алгоритме задействуется значительно большее количество факторов, чем при обратном (в пассажирском движении 6 против 4, в грузовом 5 против 4, в пригородном 5 против 2), что существенно увеличивает трудозатраты на сбор и обработку данных. Поэтому для формирования математической модели электропотребления в перевозочном процессе для отбора влияющих факторов можно рекомендовать обратный жадный алгоритм (метод «последовательный с исключением»).

2. При формировании модели использования ТЭР в неперевоочных видах деятельности расхождение показателей точности различных методов отбора факторов более существенное, чем для перевозочного процесса. При этом для различных объектов лучшие результаты демонстрируют разные методы. Так, для сервисного локомотивного депо Аркаим наилучшим следует признать метод главных компонент, который хотя и имеет сравнительно высокую среднюю относительную погрешность 17,56 %, но обладает наиболее низким коэффициентом вариации 0,18. Для дистанции погрузочно-разгрузочных работ Апатиты указанный метод также следует признать приоритетным, так как его показатели точности ($MAPE = 19,66 \%$, $CV = 0,19$) значительно превышают другие методы. Однако для дистанции сигнализации, централизации и блокировки Брянск-Льговский наилучшим является прямой жадный алгоритм, который позволил, применяя все-

го 3 фактора вместо 6, добиться наиболее высоких показателей точности ($MAPE = 6,08 \%$, $CV = 0,07$).

Учитывая изложенное, при формировании модели электропотребления в неперевозочных видах деятельности следует принимать во внимание все рассмотренные методы отбора факторов, так как их эффективность будет зависеть от специфики производственной деятельности и режимов работы конкретного СП.

3. Показатели точности математических моделей, построенных на основе регрессионного анализа, сравнительно невысоки. Как видно из рисунка 2.11, средняя относительная погрешность в большинстве случаев превышает 10 %, а в ряде случаев – 15 %. Коэффициенты вариации для большинства производственных процессов превышают 0,15 (рисунок 2.12). Следовательно, применение статистических методов, основанных на регрессионном анализе, не во всех случаях можно считать приемлемым для формирования математических моделей электропотребления на железнодорожном транспорте. Необходимо рассмотреть другие варианты формирования математических моделей, в частности, методы, основанные на применении технологии машинного обучения.

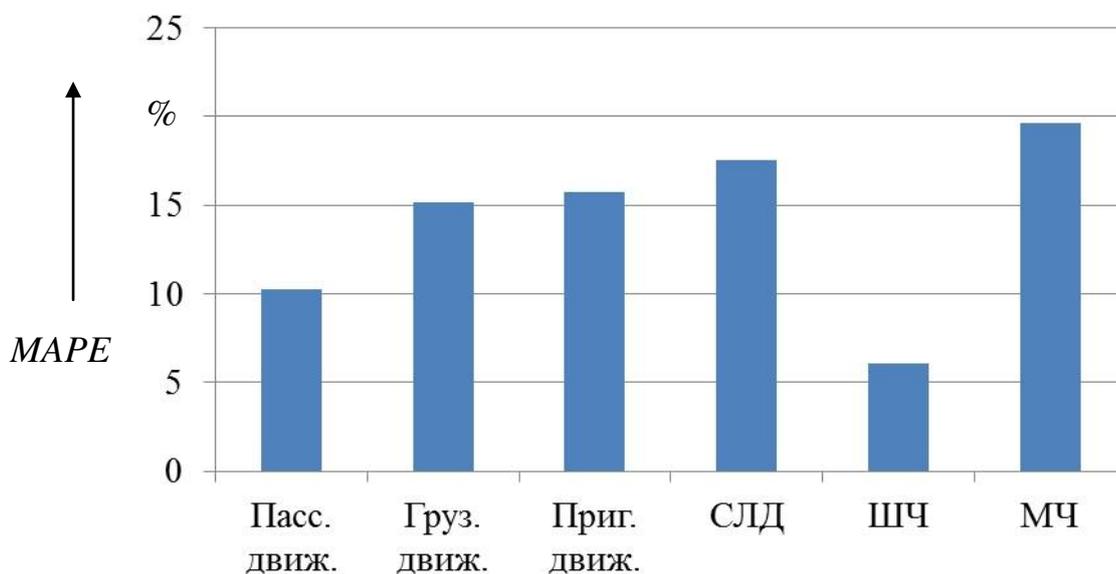


Рисунок 2.11 – Средние относительные погрешности наилучшего метода отбора факторов

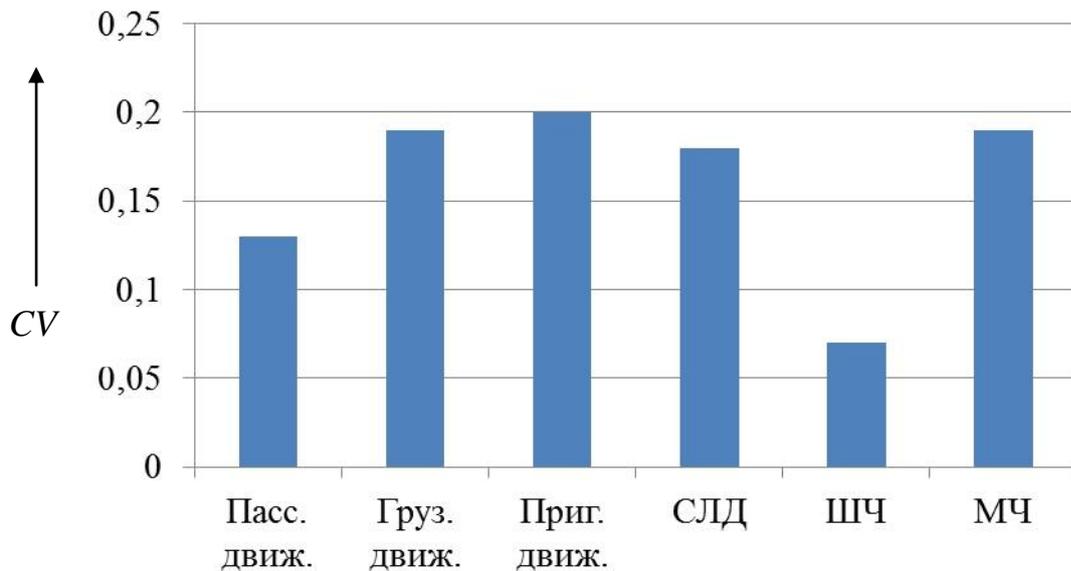


Рисунок 2.12 – Коэффициенты вариации наилучшего метода отбора факторов

2.4 Основные результаты и выводы

По результатам анализа и систематизации действующих методов и средств эффективного использования топливно-энергетических ресурсов 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 топливно-энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте в части делегирования полномочий по разработке проектов заданий по экономии энергоресурсов с уровня центрального аппарата на уровень филиалов и линейных структурных подразделений.

Выполнены классификация и корреляционный анализ факторов, влияющих на использование топливно-энергетических ресурсов при организации производ-

ственных процессов, предложена методология отбора факторов, влияющих на расход ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте, по результатам апробации которой на действующих объектах железнодорожного транспорта для перевозочного процесса рекомендовано использовать метод «последовательный с исключением», а для неперевоочных видов деятельности – «последовательный с включением», «последовательный с исключением» и метод главных компонент. Установлено, что применение регрессионных моделей для анализа эффективности использования ТЭР является нецелесообразным, следует рассмотреть применение методов машинного обучения.

3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Настоящая глава посвящена теоретическому обоснованию и разработке математических моделей использования ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте с применением методов машинного обучения. Исследования выполнены на примере ранее принятых к рассмотрению производственных процессов в следующих СП:

для перевозочного процесса – ТЧЭ Карасук, ТЧЭ Барабинск, ТЧприг Омск;

для неперевозочных видов деятельности – СЛД Аркаим, ШЧ Брянск-Льговский, МЧ Апатиты.

Как показано в главах 1 и 2, при формировании математических моделей процесса использования ТЭР в современных условиях наиболее перспективными являются методы, основанные на предположении о вероятностном характере процесса потребления ТЭР. Применение данных методов позволяет исследовать линейные и нелинейные зависимости между расходом ТЭР и принимаемыми к рассмотрению факторами [107, 169].

3.1 Порядок формирования математической модели использования электрической энергии в производственных процессах с применением искусственных нейронных сетей

В настоящем разделе представлены результаты исследования моделей энергопотребления, основанных на ИНС, для перевозочного процесса и для неперевозочных видов деятельности. В настоящее время известны различные типы нейросетевых моделей, в т.ч. многослойные персептроны, радиально-базисные сети, самоорганизующиеся сети Кохонена и др. Выбор наиболее подходящего типа ИНС для моделирования расхода ТЭР осуществляется на основе анализа соответствующих выборок для различных производственных процессов.

Для неперевозочных видов деятельности к рассмотрению приняты 20 выборок расхода ТЭР в производственных процессах СП, расположенных в границах Южно-Уральской, Московской, Западно-Сибирской и Октябрьской ж.д. (СЛД, ТЧПриг, ЭЧ и т.д.).

В качестве исходных данных для перевозочного процесса использованы рассмотренные ранее в разделе 2.3 выборки для ТЧЭ Барабинск, ТЧприг Омск, ТЧЭ Карасук Западно-Сибирской ж.д.

Анализ моделей ИНС осуществляется с применением программного продукта *Statistica* с учетом следующих особенностей:

1. Для каждой выборки осуществляется обучение не менее 1000 ИНС, из которых затем выбираются 10 архитектур с наилучшими показателями точности.

2. К рассмотрению принимаются многослойные перцептроны (multilayer perceptron – MLP) с одним скрытым слоем и радиально-базисные сети (radial basis function networks – RBF).

Исследования показали, что использование моделей с несколькими скрытыми слоями как для перевозочного процесса, так и для неперевозочных видов деятельности не привело к снижению погрешностей.

Показатели точности ИНС, выраженные в значениях коэффициента корреляции r между фактическими и смоделированными значениями расхода ТЭР, для неперевозочных видов деятельности приведены на рисунках 3.1, 3.2 и 3.3. При этом исследовалась зависимость от количества нейронов на скрытом слое и от типа активационной функции на скрытом и выходном слоях.

Из рисунка 3.1 видно, что увеличение количества нейронов на скрытом слое многослойного перцептрона свыше 9 приводит к снижению показателей точности моделей ИНС. Кроме того, использование моделей RBF также приводит к увеличению погрешности (коэффициент корреляции от 0,81 до 0,87, на рисунке 3.1 не показаны).

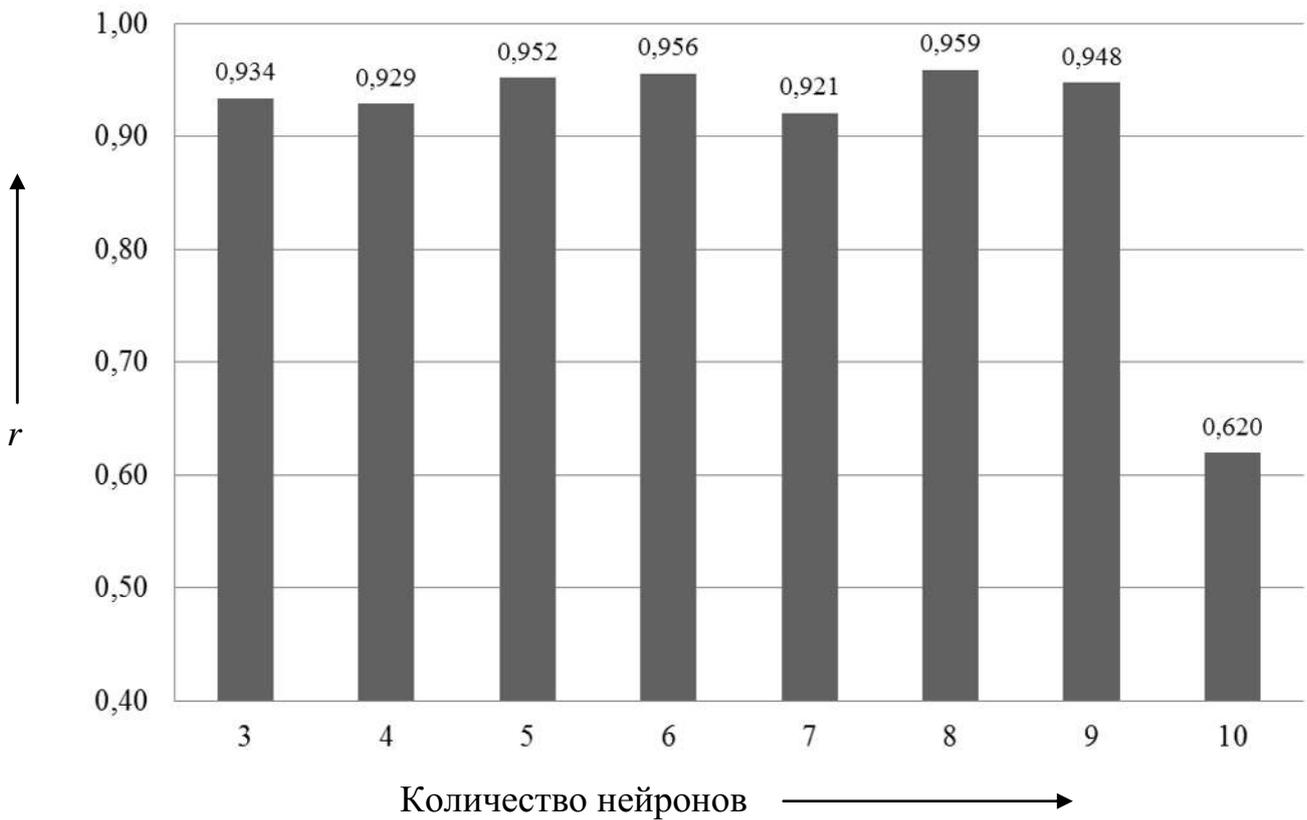


Рисунок 3.1 – Показатели точности ИНС в зависимости от количества нейронов на скрытом слое для неперевозочных видов деятельности

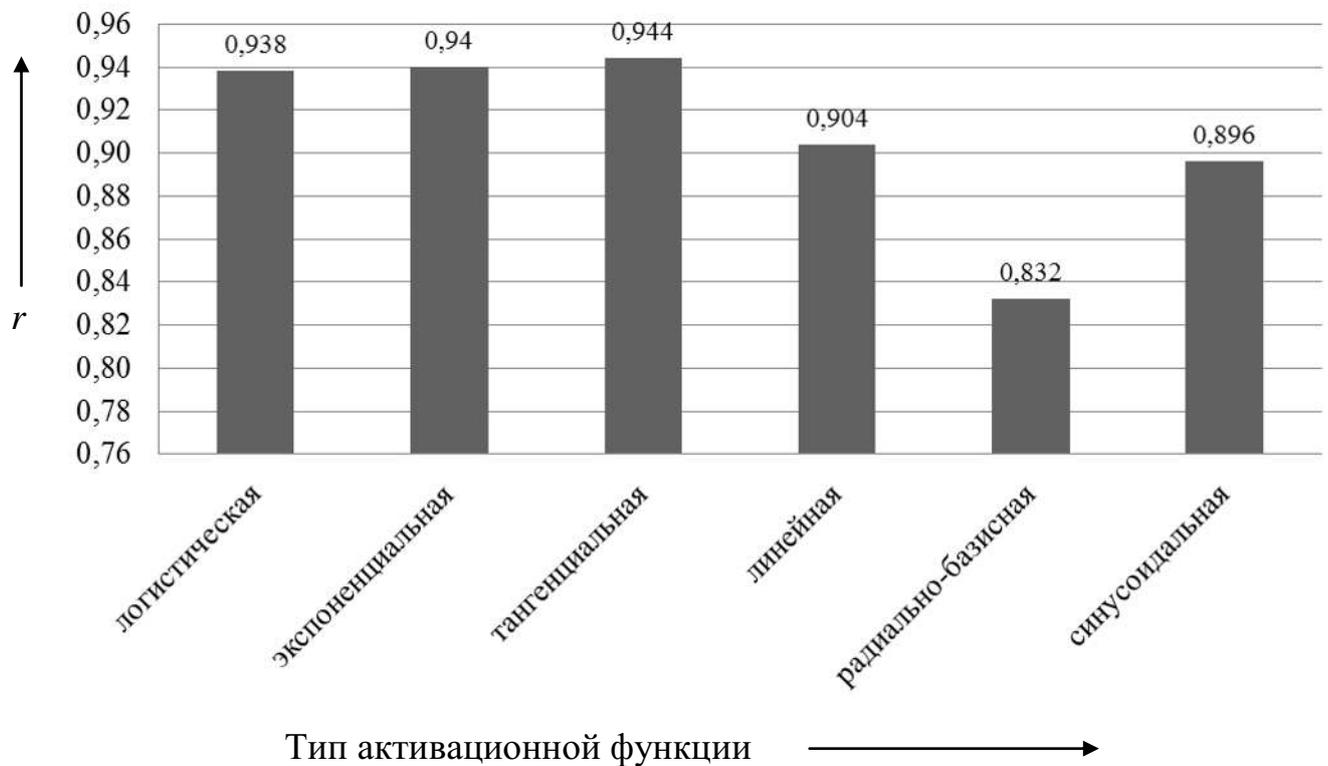


Рисунок 3.2 – Показатели точности ИНС в зависимости от типа активационной функции на скрытом слое для неперевозочных видов деятельности

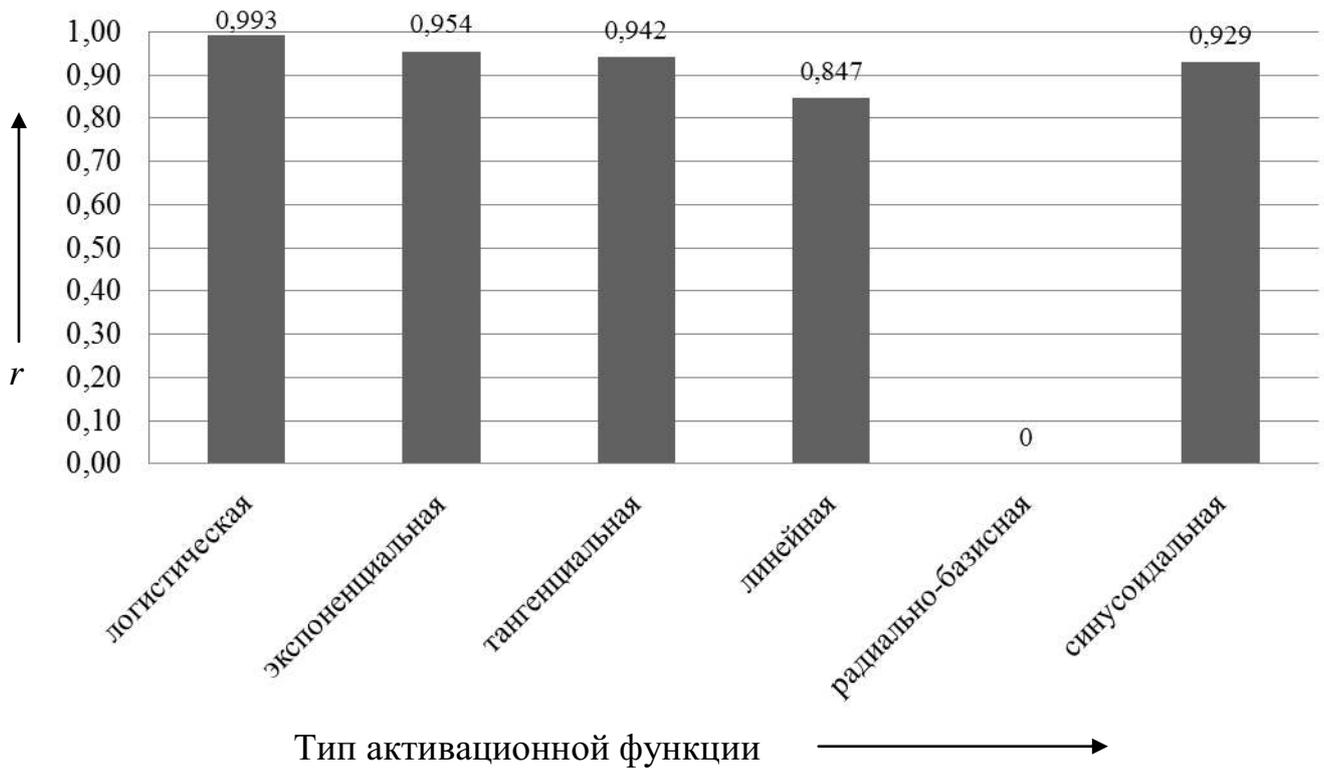


Рисунок 3.3 – Показатели точности ИНС в зависимости от типа активационной функции на выходном слое для неперевозочных видов деятельности

На скрытом слое ИНС целесообразно применять логистическую, экспоненциальную и тангенциальную активационные функции (коэффициенты корреляции 0,938 – 0,944), а на выходном слое – те же с дополнением синусоидальной функцией (коэффициенты корреляции 0,929 – 0,993).

Для перевозочного процесса зависимость коэффициента корреляции от числа нейронов на скрытом слое не выявлена (рисунок 3.4). Следует необходимо отметить, что радиально-базисные сети не попали в число лучших структур ИНС, как и для неперевозочных видов деятельности.

При анализе типа передаточных функций на скрытом слое в число лучших архитектур ИНС попали только структуры с тангенциальной, экспоненциальной или логистической функцией (рисунок 3.5). На выходном слое при этом могут применяться любые функции, кроме радиально-базисной (рисунок 3.6).

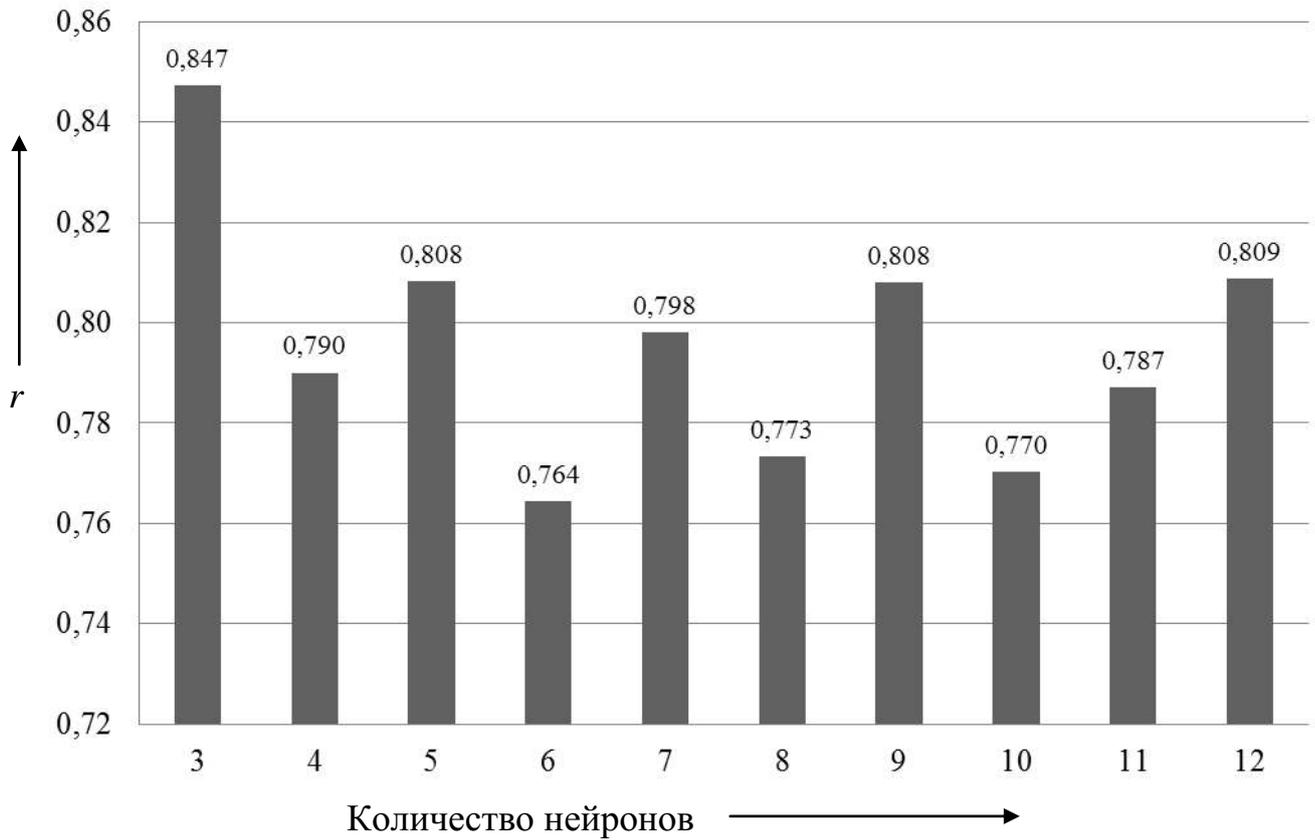


Рисунок 3.4 – Показатели точности ИНС в зависимости от количества нейронов на скрытом слое для перевозочного процесса

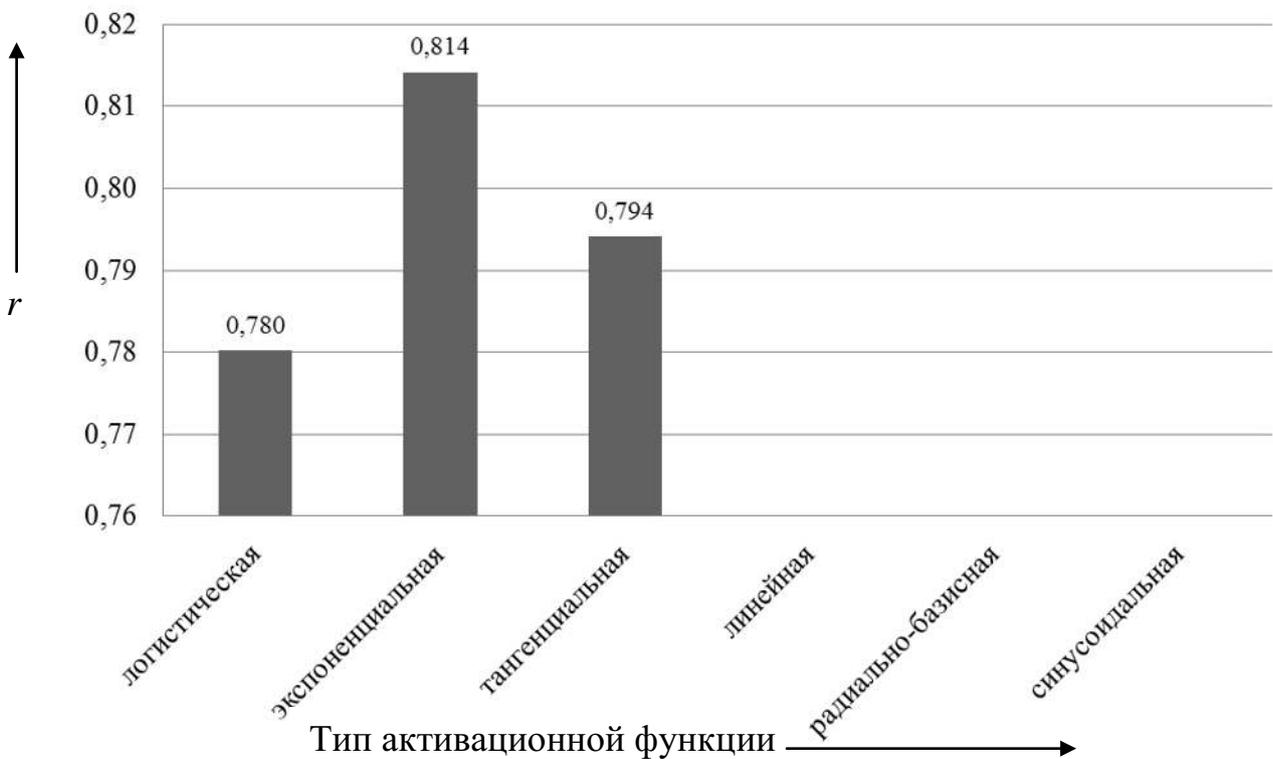


Рисунок 3.5 – Показатели точности ИНС в зависимости от типа активационной функции на скрытом слое для перевозочного процесса

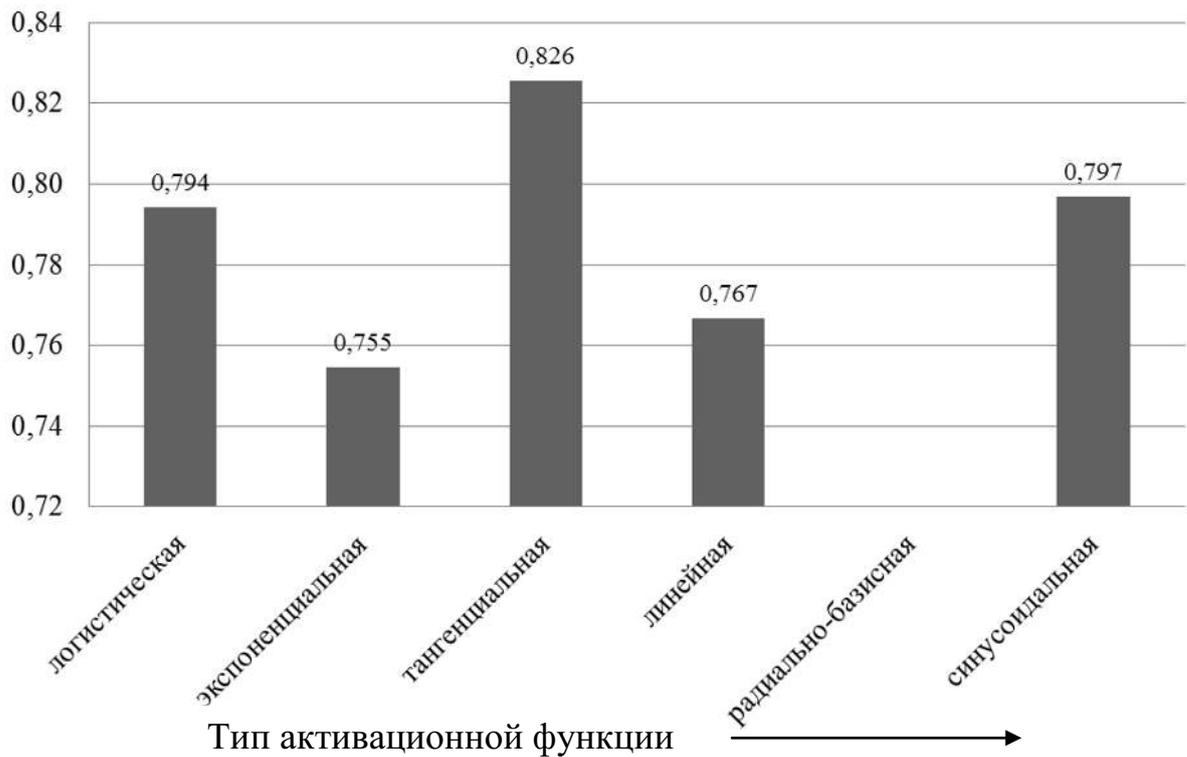


Рисунок 3.6 – Показатели точности ИНС в зависимости от типа активационной функции на выходном слое для перевозочного процесса

Таким образом, для создания математической модели использования электрической энергии в производственных процессах на железнодорожном транспорте выбрана модель ИНС на основе многослойного персептрона с одним скрытым слоем, примерная структура которой приведена на рисунке 3.7 [107, 211].

Разработанная ИНС включает в себя три слоя: входной, выходной и скрытый. 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 9, а для перевозочного процесса – 12.

В [211] автором совместно с А. В. Пономаревым и О. А. Коломоец приведено описание ИНС, представленной на рисунке 3.7, в частности, указано, что «...между собой слои соединены синапсами, каждый из которых характеризуется своим весом w_{ij} , выраженным действительным числом. Значения весов синапсов

определяют характер зависимости расхода электрической энергии от значения принятых к рассмотрению факторов...».

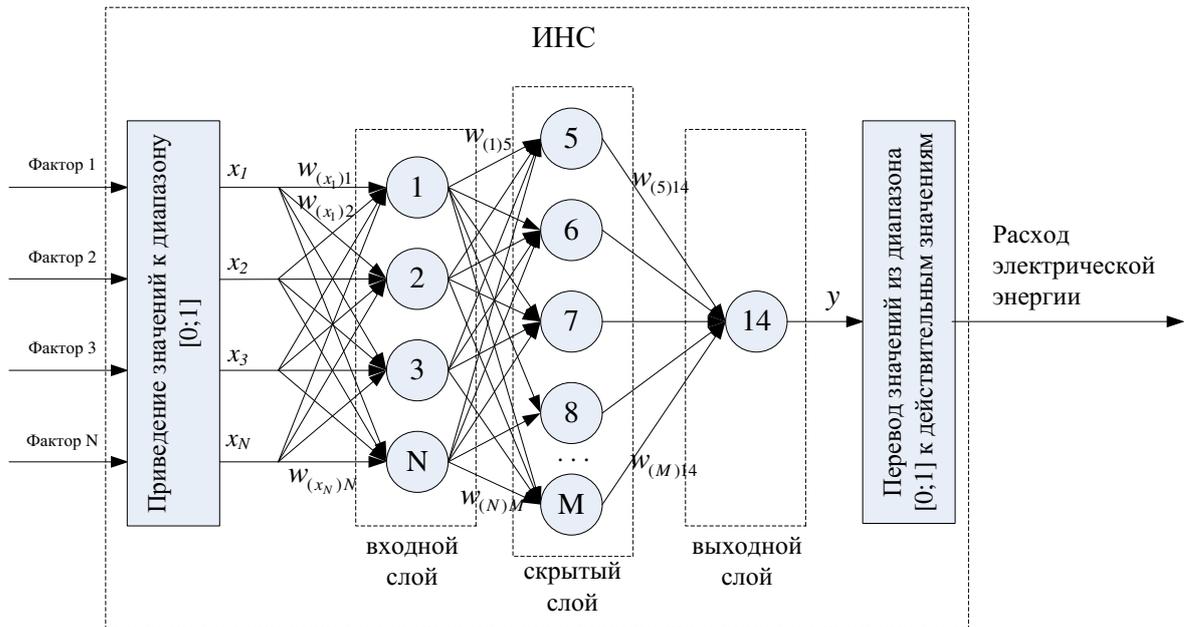


Рисунок 3.7 – Примерная структура нейронной сети для создания математической модели использования электрической энергии в производственных процессах на железнодорожном транспорте

Также в [211] указано, что «...в структуре ИНС, представленной на рисунке 3.7, предусмотрены блоки перевода входных и выходных значений к диапазону $[0;1]$ и обратно, так как сигналы, передаваемые по синапсам, должны принимать значения из указанного диапазона...».

Каждый нейрон в составе ИНС характеризуется своим состоянием, определяемым по формуле (1.4).

Например, состояние нейрона 1 на рисунке 3.7 определится следующим образом: $S = x_1 w_{(x_1)1} + x_2 w_{(x_2)1} + x_3 w_{(x_3)1} + x_N w_{(x_N)1}$.

Значение выхода нейрона y определяется по выражению (1.5).

Из числа рассмотренных в разделе 1.2.2 активационных функций для объектов, функционирующих в неперевозочных видах деятельности, на скрытом и выходном слоях приняты тангенциальная, экспоненциальная и логистическая.

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

ская; на выходном слое – тангенциальная, экспоненциальная, логистическая, линейная и синусоидальная.

В [211] показано, что «...наиболее удобными для исследования являются экспоненциальная и логистическая функции, так как они являются дифференцируемыми на всей оси абсцисс и обладают простыми с точки зрения машинной реализации производными...». Например, производная логистической функции равна

$$f'(x) = af(x)(1 - f(x)). \quad (3.1)$$

Рассматриваемая нейронная сеть относится к классу многослойных перцептронов, обучение которых, как правило, ведется по методу обратного распространения ошибки, который является разновидностью метода градиентного спуска [106].

Далее представлен порядок функционирования ИНС согласно выражениям (3.2) – (3.8) [211].

Процесс обучения заключается в минимизации функции ошибки, которая находится по методу наименьших квадратов:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p (y_j - d_j)^2, \quad (3.2)$$

где y_j и d_j – смоделированное и требуемое значение выходного сигнала нейрона выходного слоя сети соответственно;

p – число нейронов на выходном слое.

При обучении ИНС на каждом этапе осуществляется корректировка весов синапсов по методу градиентного спуска на следующую величину [210]:

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}, \quad (3.3)$$

где η – скорость обучения.

Второй множитель в правой части выражения (3.14) можно записать в виде:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial y_j} \frac{\partial y_j}{\partial S_j} \frac{\partial S_j}{\partial w_{ij}}. \quad (3.4)$$

Принимая во внимание выражение (1.23), можно записать:

$$\frac{\partial S_j}{\partial w_{ij}} = x_i. \quad (3.5)$$

Величина $\frac{\partial y_j}{\partial S_j}$ есть частная производная функции $y = f(S)$ по S .

Если учесть, что в рассматриваемой нейронной сети число нейронов на выходном слое равно единице, то первый множитель в выражении (3.15) будет равен:

$$\frac{\partial E}{\partial y_j} = y_j - d_j. \quad (3.6)$$

В этом случае результирующее выражение для величины коррекции весов синапсов выходного слоя примет следующий вид:

$$\Delta w_{ij} = -\eta x_i f'(S_j)(y_j - d_j), \quad (3.7)$$

Для нейронов остальных n -х слоев используется рекуррентная формула, если известно значение корректировки для $(n+1)$ -го слоя:

$$\Delta w_{ij}^{(n)} = -\eta x_i f'(S_j) \sum_k \delta_k^{(n+1)} w_{ik}^{(n+1)}, \quad (3.8)$$

где $\delta_k^{(n+1)} = f'(S_j)(y_j - d_j)$ (для выходного слоя).

Для повышения эффективности обучения в формулы (3.7) и (3.8) добавлено дополнительное слагаемое $m\Delta w_{ij}$, которое позволяет изменять влияние градиента на изменение весов синапсов.

В [108, 209, 211] предложен метод сравнения нейронных сетей и выбор наилучшей из них, основанный на расчете двух коэффициентов: K_{T1} и K_{T2} . Первый коэффициент оценивает близость дисперсий фактической и смоделированной выборок расхода электроэнергии [209]:

$$K_T = \frac{S_1}{S_2}, \quad (3.9)$$

где S_1 и S_2 – дисперсии фактической и смоделированной выборок расхода электроэнергии (отношение большей к меньшей, так что значение критерия K_T всегда больше единицы), рассчитываемые по формуле:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{N_T} (W_i - \bar{W})^2}{N_T - 1}, \quad (3.10)$$

где N_T – объем тестовой выборки; W_i – фактическое или смоделированное значение расхода электрической энергии; \bar{W} – среднее фактическое или смоделированное значение расхода электроэнергии.

Второй коэффициент во многом схож с коэффициентом вариации и поэтому в настоящем исследовании предлагается его заменить на CV и дополнить критерии выбора наилучшей структуры сети третьим коэффициентом – $MAPE$.

Критерий выбора ИНС в этом случае будет сформулирован в виде:

$$\begin{cases} K_T \rightarrow 1; \\ MAPE \rightarrow \min; \\ CV \rightarrow \min. \end{cases} \quad (3.11)$$

Алгоритм обучения и выбора наилучшей структуры и гиперпараметров ИНС приведен на рисунке 3.8 [211].

Исследования по разработке математических моделей расхода электроэнергии с применением ИНС, выполненные автором совместно с соавторами, приведены в [107, 209, 211 – 220].

С учетом изложенного разработаны математические модели для принятых к рассмотрению производственных процессов с применением ИНС. Количество выбранных факторов соответствуют результатам исследований, выполненных в п. 2.3. Характеристики моделей приведены в таблице 3.1.

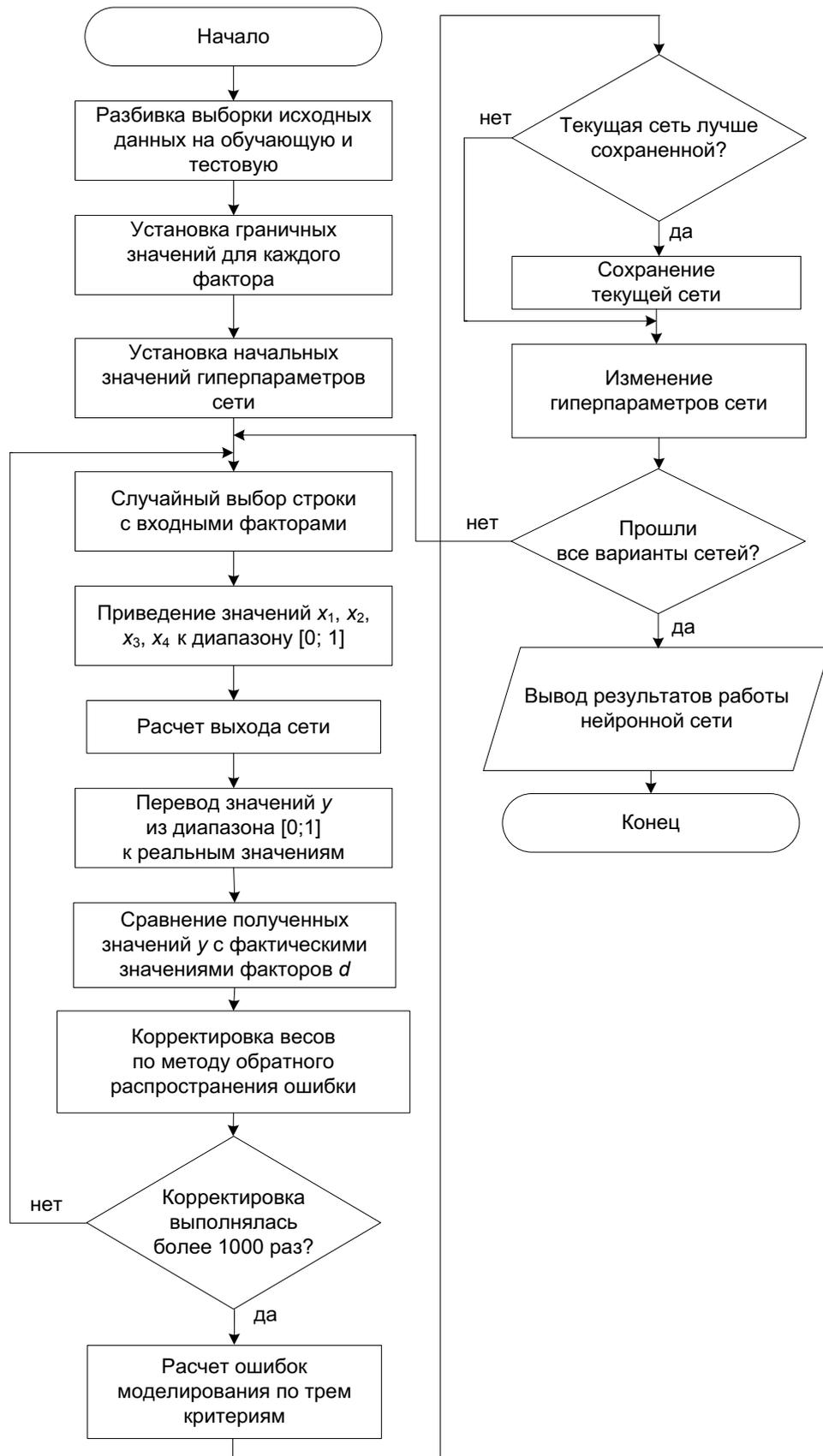


Рисунок 3.8 – Алгоритм выбора структуры и гиперпараметров ИНС для формирования модели расхода ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте

Таблица 3.1 – Характеристики моделей ИНС для принятых к рассмотрению производственных процессов на железнодорожном транспорте

№ п/п	Объект	Тип ИНС	Функции принадлежности	
			на скрытом слое	на выходном слое
1	ТЧЭ Барабинск	MLP 4-9-1	логистическая	экспоненциальная
2	ТЧЭ Карасук	MLP 4-9-1	логистическая	логистическая
3	ТЧприг Омск	MLP 2-9-1	логистическая	логистическая
4	СЛД Аркаим	MLP 2-4-1	экспоненциальная	логистическая
5	ШЧ Брянск-Льговский	MLP 3-9-1	логистическая	логистическая
6	МЧ Апатиты	MLP 2-3-1	тангенциальная	логистическая

Оценка показателей точности моделей и сравнение их с другими методами представлены в п. 3.4 настоящей главы.

3.2 Порядок формирования математической модели использования электрической энергии в производственных процессах с применением нечетких нейронных сетей

Анализ математических моделей процесса электропотребления для принятых к рассмотрению производственных процессов проводились с использованием программы *MATLAB* [221 – 223]. Исследования по разработке математических моделей расхода электроэнергии с применением ННС, выполненные автором совместно с соавторами, приведены в [224 – 229].

Как показано в [224, 230], «...для формирования математической модели процесса электропотребления на основе ННС необходимо три выборки значений: обучающая, проверочная и тестовая...». Оценка качества сформированной математической модели осуществляется путем расчета средней квадратической ошибки *RMSE*, определенной по фактическим $w_{\text{факт}}$ и смоделированным $w_{\text{мод}}$ значениям расхода электроэнергии или УРЭ для тестовой выборки.

Для выбора структуры и параметров ННС предложен алгоритм, приведенный на рисунке 3.9.

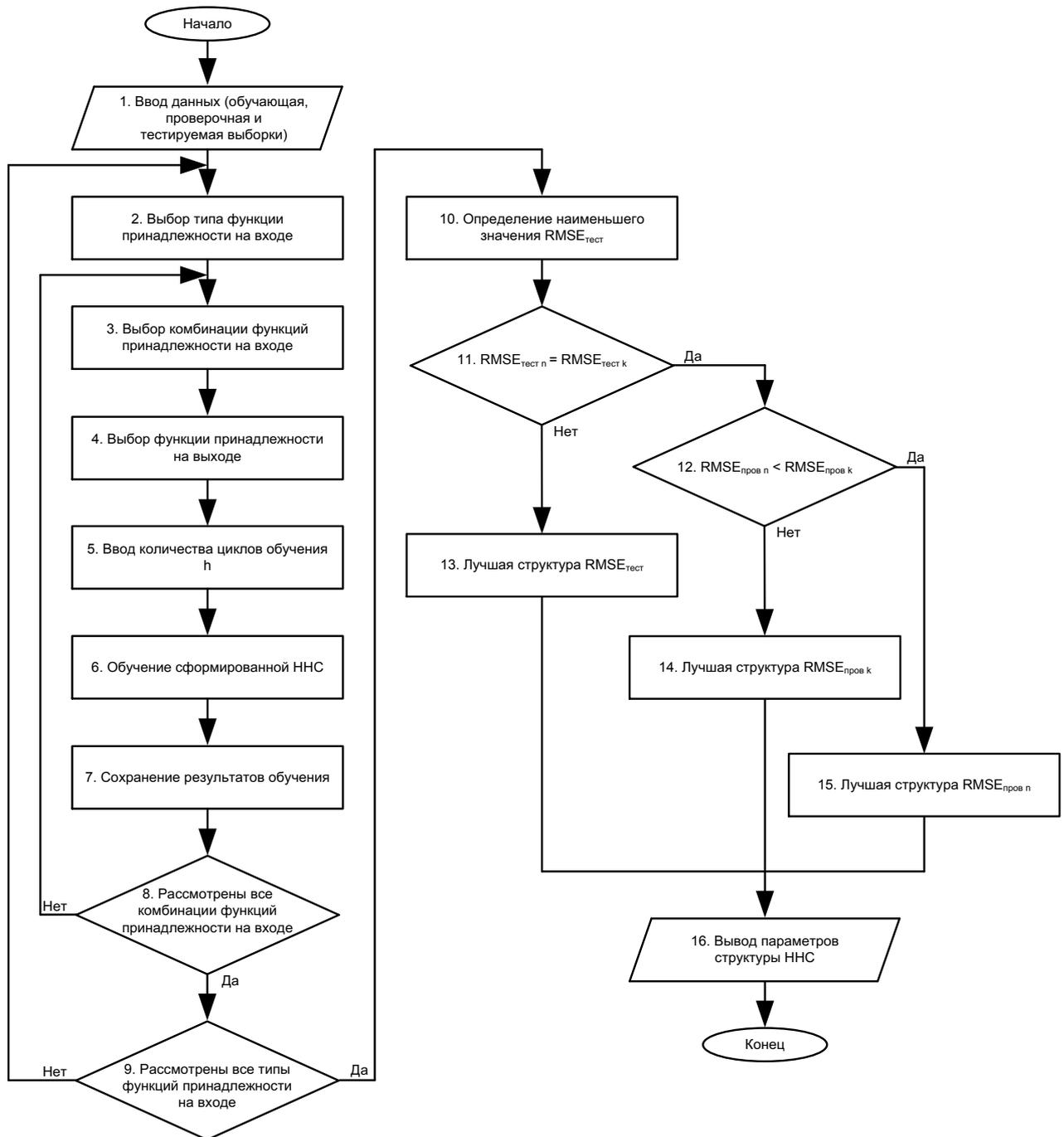


Рисунок 3.9 – Алгоритм выбора структуры и гиперпараметров ННС для формирования модели расхода ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте

В качестве исходных данных использованы рассмотренные ранее в разделе 2.3 выборки для ТЧЭ Барабинск в пассажирском движении, ТЧприг Омск в при-

городном движении, ТЧЭ Карасук в грузовом движении Западно-Сибирской железной дороги, а также для неперевозочных видов деятельности – СЛД Аркаим, ШЧ Брянск-Льговский, МЧ Апатиты.

Далее более подробно приведен порядок формирования ННС для ТЧЭ Барабинск в пассажирском движении в соответствии с алгоритмом, приведенным на рисунке 3.9.

На первом этапе осуществляется ввод исходных данных с разделением выборки на три части.

На втором этапе выполняется выбор типа функции принадлежности на входе ННС. При этом рассматриваются типовые функции принадлежности, предлагаемые в редакторе гибридных систем *ANFIS Editor*: треугольная (*trimf*), трапецеидальная (*trapmf*), гауссова (*gaussmf*), двойная гауссова (*gauss2mf*), обобщенная колоколообразная (*gbellmf*), π -функция (*pimf*), сигмоидальная (*sigmf*) [224].

Первоначальный анализ производился для случая одинакового числа функций принадлежности на входе в диапазоне от 2 до 4 (таблица 3.2).

Из представленных результатов видно, что сравнительно лучшие результаты демонстрируют выборки с двумя функциями принадлежности на входе, а выборки с тремя и особенно четырьмя функциями имеют значительно большую погрешность. Для данной выборки следует отказаться от использования моделей с четырьмя функциями принадлежности.

Необходимо отметить, что изменение типа функции принадлежности для комбинации 2 2 2 2 незначительно влияет на среднюю квадратическую погрешность на тестовой выборке, которая находится в диапазоне 16,4 – 16,8 кВт·ч/10 тыс. т·км бр.

Рассмотрим возможность применения неодинакового количества функций принадлежности на входе. Для этого выполним оценку средней квадратической погрешности для моделей, содержащих разное сочетание гауссовых функций принадлежности (2 и 3), результаты которой приведены на рисунке 3.10.

Таблица 3.2 – Результаты тестирования различных структур ННС для ТЧЭ Барабинск

№	Тип функции принадлежности	Количество функций принадлежности на входе	Средняя квадратическая ошибка на тестовой выборке, кВт·ч/10тыс. т·км бр.
1	треугольная	2 2 2 2	16,5
2		3 3 3 3	17,4
3		4 4 4 4	26,1
4	трапецидальная	2 2 2 2	16,5
5		3 3 3 3	68,3
6		4 4 4 4	25,4
7	гауссова	2 2 2 2	16,4
8		3 3 3 3	27,4
9		4 4 4 4	36,4
10	двойная гауссова	2 2 2 2	16,6
11		3 3 3 3	19,4
12		4 4 4 4	136,9
13	обобщенная ко- локолообразная	2 2 2 2	16,4
14		3 3 3 3	19,5
15		4 4 4 4	323,8
16	pi-функция	2 2 2 2	16,8
17		3 3 3 3	18,5
18		4 4 4 4	108,6
19	сигмоидальная	2 2 2 2	16,6
20		3 3 3 3	20,7
21		4 4 4 4	231,6
Минимальное значение			16,4

Применение неодинакового количества функций в ряде случаев приводит к улучшению качества модели. Так, наилучшие результаты демонстрирует модель 2 3 3 2 (средняя квадратическая погрешность на тестовой выборке составила 15,7 кВт·ч/10 тыс. т·км бр.), которая была принята для дальнейших исследований. Применение трех функций принадлежности более чем на трех нейронах приводит к снижению точности.

С целью выбора типа функции принадлежности на входе выполнен анализ показателей точности для трех выборок: обучающей, тестовой и проверочной (таблица 3.3).

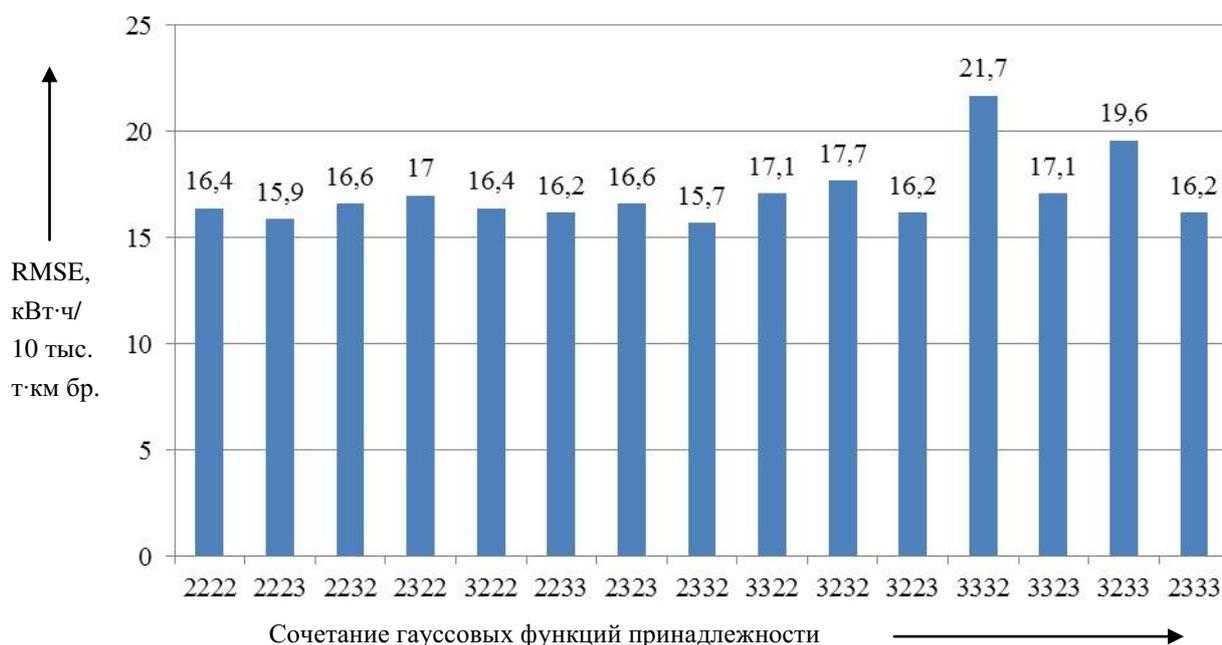


Рисунок 3.10 – Средняя квадратическая погрешность для различных сочетаний функций принадлежности для ТЧЭ Барабинск

Таблица 3.3 – Результаты оценки качества структуры ННС для ТЧЭ Барабинск с комбинациями функций принадлежности 2 3 3 2 в зависимости от типа функции принадлежности на входе

Тип функции принадлежности на входе	Средняя квадратическая ошибка, кВт·ч/10тыс. т·км бр.		
	Обучение	Проверка	Тестирование
треугольная	16,0	18,6	16,3
трапецидальная	17,7	20,1	17,8
гауссова	15,4	18,3	15,7
двойная гауссова	17,6	20,3	133,0
обобщенная колоколообразная	16,2	18,7	21,3
рi-функция	18,1	20,7	18,2
сигмоидальная	17,5	20,2	178,1
Минимальное значение	15,4	18,3	15,7

Лучший результат для ТЧЭ Барабинск показала структура с гауссовыми функциями принадлежности со средними квадратическими ошибками: обучения – 15,4 кВт·ч/10тыс. т·км бр., проверки – 18,3 кВт·ч/10тыс. т·км бр., тестирования 15,7 кВт·ч/10тыс. т·км бр. Внешний вид сформированной структуры приведен на рисунке 3.11.

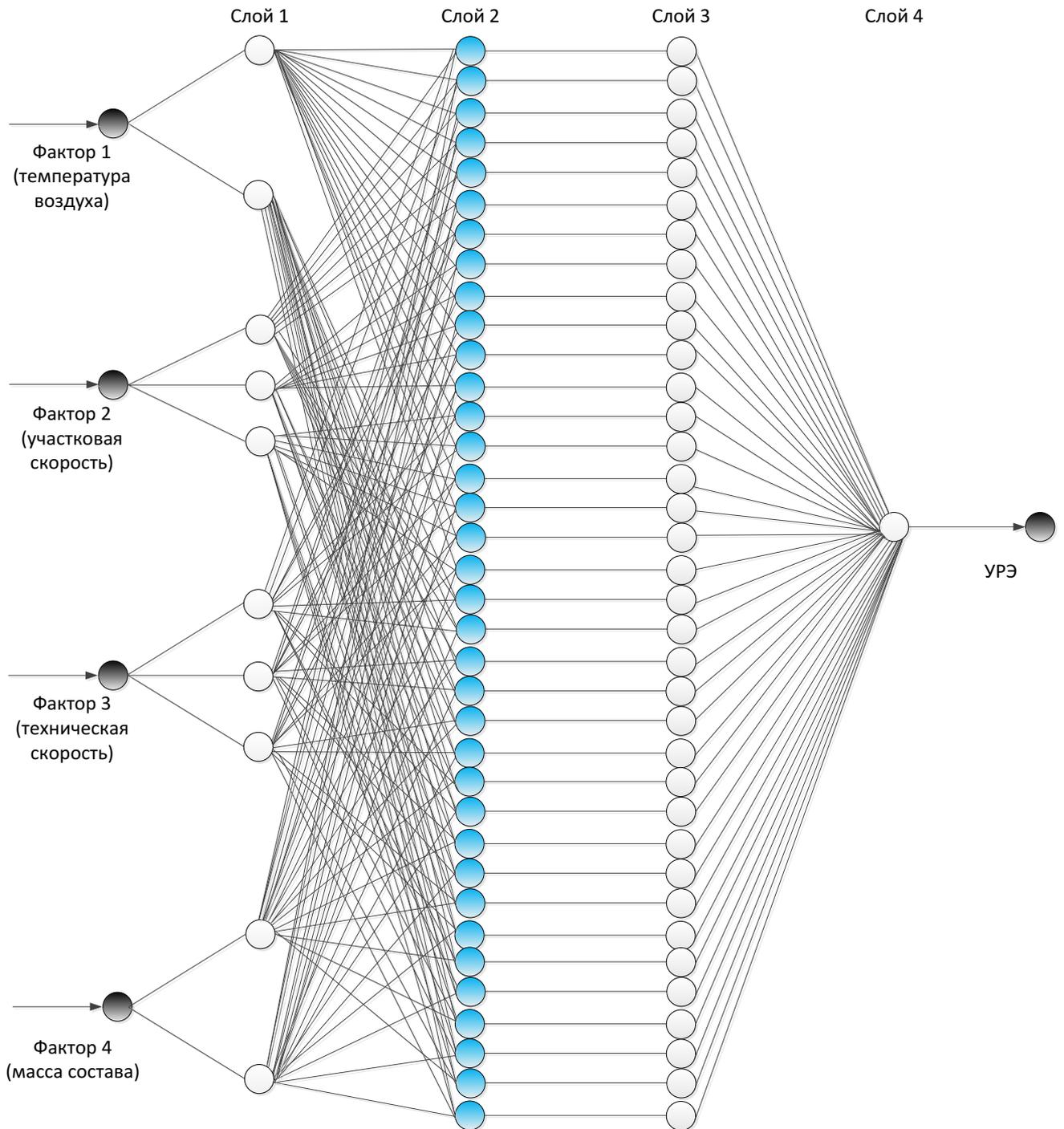


Рисунок 3.11 – Структура ННС для создания модели электропотребления для ТЧЭ Барабинск

На третьем этапе выбирается функция принадлежности на выходе, ее рекомендуется принимать постоянной.

На четвертом этапе для выбранной структуры ННС осуществляется подбор количества циклов обучения h . Как показано в [230], «...формирование модели электропотребления на железнодорожном транспорте целесообразно начинать с малого количества циклов обучения...». В настоящем исследовании количество циклов обучения принято равным трем.

По результатам анализа возможных структур ННС выбирается модель с наилучшими показателями точности (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Характеристики моделей ННС для принятых к рассмотрению производственных процессов на железнодорожном транспорте

№ п/п	Объект	Комбинация функций при- надлежности	Функции принадлежности	
			на скрытом слое	на выходном слое
1	ТЧЭ Барабинск	2 3 3 2	гауссова	постоянная
2	ТЧЭ Карасук	2 3 3 2	гауссова	
3	ТЧприг Омск	15 15	рi-функция	
4	СЛД Аркаим	4 5	двойная гауссова	
5	ШЧ Брянск- Льговский	2 3 2	двойная гауссова	
6	МЧ Апатиты	4 3	треугольная	

С учетом изложенного разработаны математические модели для принятых к рассмотрению производственных процессов на железнодорожном транспорте с применением ННС. Количество выбранных факторов соответствуют результатам исследований, выполненных в п. 2.3.

3.3 Порядок формирования математической модели использования электрической энергии в производственных процессах с применением метода опорных векторов

Метод опорных векторов (SVM) относится к методам машинного обучения [231 – 233]. Опорными векторами применительно к задаче моделирования процесса энергопотребления будут являться векторы выборки расхода ТЭР и влияющих факторов, однозначно определяющие структуру математической модели.

Известны работы отечественных и зарубежных ученых, подтверждающие положительные результаты использования данного метода в решении различных прикладных задач [42, 93 – 96, 234], в том числе в энергетике.

С математической точки зрения опорные векторы – это те векторы, которым соответствуют ненулевые значения множителей Лагранжа α_i, α_i^* , для которых выполняется условие

$$|f(x_i) - W_i| \geq \varepsilon \quad (3.12)$$

где W_i – i -е значение расхода ТЭР; x_i – значение влияющих факторов в i -м эксперименте; $f(x_i)$ – функция, параметры которой определяется в ходе итерационных вычислений; ε – заданный показатель точности, определяющий зону нечувствительности функции $f(x_i)$ [233].

Схема метода SVM представлена на рисунке 3.12.

Математическая модель расхода ТЭР будет иметь вид:

$$W_i = f(x_i) + \xi_i, \quad (3.13)$$

где ξ_i – случайная ошибка.

Функция $f(x_i)$ может быть определена следующим образом [231]:

$$f(x_i) = w^T \varphi(x_i) + b = \sum_{j=1}^n (\alpha_j - \alpha_j^*) K(x_i, x) + b, \quad (3.14)$$

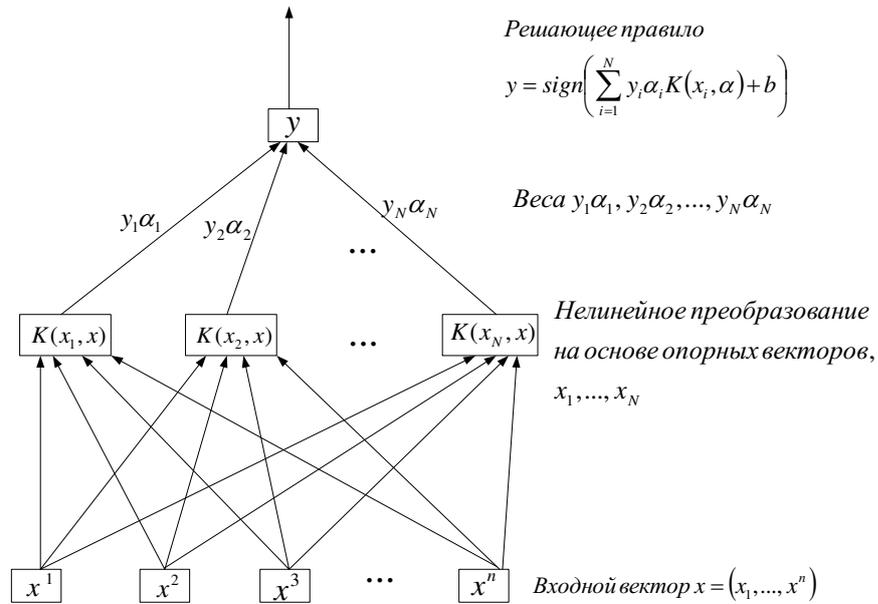


Рисунок 3.12 – Схема метода SVM (взято из [320])

где w^T – вектор расхода ТЭР и влияющих факторов; $\varphi(x_i)$ и $K(x_i, x)$ – нелинейное отображение $\varphi: x \rightarrow \varphi(x)$ и ядерная функция, его задающая; b – свободный член:

$$\begin{aligned} b &= W_i - w^T \varphi(x_i) - \varepsilon && \text{для } \alpha_i \in (0, D) \\ b &= W_i - w^T \varphi(x_i) + \varepsilon && \text{для } \alpha_i^* \in (0, D), \end{aligned} \quad (3.15)$$

где D – константа, задаваемая на этапе формирования модели.

Возможные виды функции $f(x_i)$ и условия ее минимизации приведены в таблице 3.5, которая составлена с учетом информации, приведенной в [232].

Таблица 3.5 – Виды функции $f(x_i)$ и условия ее минимизации

Тип функции	Математическое выражение	Условие минимизации
1	$\frac{1}{2} w^T w + D \sum_{i=1}^N \xi_i + D \sum_{i=1}^N \xi_i^*,$	$\begin{aligned} w^T \varphi(x_i) + b - W_i &\leq \varepsilon + \xi_i^* \\ W_i - w^T \varphi(x_i) - b_i &\leq \varepsilon + \xi_i \\ \xi_i^*, \xi_i &\geq 0, i = 1, \dots, N \end{aligned}$
2	$\frac{1}{2} w^T w - D \left(\nu \varepsilon + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*) \right),$	$\begin{aligned} (w^T \varphi(x_i) + b) - W_i &\leq \varepsilon + \xi_i \\ W_i - (w^T \varphi(x_i) + b_i) &\leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* &\geq 0, i = 1, \dots, N, \varepsilon \geq 0. \end{aligned}$

В таблице 3.5 используются следующие обозначения: ν – параметр, задаваемая на этапе формирования модели; ξ_i и ξ_i^* – верхняя и нижняя границы погрешности обучения соответственно [235].

Из числа ядерных функций $K(x_i, x)$, используемых в выражении (3.14), наибольшее распространение получили сигмоидные $K(x_i, x) = \tanh(\gamma x_i x + A)$, полиномиальные $K(x_i, x) = (\gamma x_i x + B)^C$, радиально-базисные $K(x_i, x) = e^{-\gamma|x_i - x|^2}$ и линейные $K(x_i, x) = x_i x$, где A, B, C – коэффициенты. Наиболее часто применяются радиально-базисные функции.

Выбор параметров моделей SVM D, ε, γ является эвристическим. Однако исследования В. Черкасского и Ю. Ма [236], показывают, что во многих случаях целесообразно использовать следующие выражения:

– для выбора γ

$$\gamma = 1/2p^2; p^d = 0,1...0,5, \quad (3.16)$$

где d – число влияющих факторов;

– для выбора D

$$D = \max(|\bar{W} + 3S|, |\bar{W} - 3S|); \quad (3.17)$$

где S – среднее квадратическое отклонение выборки расхода ТЭР; \bar{W} – ее математическое ожидание;

– для выбора ε

$$\varepsilon = 3\sigma \sqrt{\frac{\ln n}{n}}, \quad (3.18)$$

где n – объем выборки.

На основе представленных выражений с применением программного комплекса *Statistica* сформирована модель использования ТЭР для ТЧЭ Барабинск. Порядок выполняемых действий изложен автором совместно с В. Т. Черемиси-

ным и В. И. Иванченко в [237], а результаты приведены в таблице 3.6. Жирным шрифтом выделены параметры наилучшей модели.

Таблица 3.6 – Результаты выбора структуры и параметров модели электропотребления для ТЧЭ Барабинск на основе SVM

Зависимая переменная	Независимые переменные (факторы)	Исходный (общий) объем выборки	Параметры метода SVM			MAPE, %	RMSE, кВт·ч/10 тыс. ткм брутто (тыс. кВт·ч)	CV	
			Доля обучающей выборки	Тип SVM-регрессии	Тип функции ядра				
$w_{уд}$, кВт·ч/10 тыс. ткм брутто	t , °С $V_{уч}$, км/ч $V_{техн}$, км/ч m_c , т	2305	80 %	1	линейная	10,89	16,86	0,13	
					полиномиальная	10,17	17,47	0,13	
					радиально-базисная	10,17	16,01	0,12	
					сигмоидная	97,27	186,08	1,43	
					2	линейная	11,65	18,42	0,14
						полиномиальная	10,62	17,02	0,13
						радиально-базисная	9,49	15,79	0,12
						сигмоидная	84,04	151,44	1,17

Аналогичные исследования выполнены для остальных принятых к рассмотрению производственных процессов на железнодорожном транспорте [237, 238]. Характеристики моделей приведены в таблице 3.7. Оценка показателей точности моделей и сравнение их с другими методами представлены в п. 3.4 настоящей главы.

Таблица 3.7 – Характеристики моделей SVM для принятых к рассмотрению производственных процессов на железнодорожном транспорте

№ п/п	Объект	Параметры метода SVM	
		тип функции ядра	тип SVM-регрессии
1	ТЧЭ Барабинск	радиально-базисная	2
2	ТЧЭ Карасук	радиально-базисная	2
3	ТЧприг Омск	радиально-базисная	1
4	СЛД Аркаим	линейная	2
5	ШЧ Брянск-Льговский	сигмоидная	2
6	МЧ Апатиты	сигмоидная	2

3.4 Сравнение точности математических моделей, основанных на множественной регрессии и методах машинного обучения

На основе приведенных в таблицах 3.1, 3.4, 3.7 структур ИНС, ННС и SVM выполнено моделирование процессов использования ТЭР для принятых к рассмотрению производственных процессов на железнодорожном транспорте.

Параметры полученных моделей и их показатели точности в сравнении с моделированием методом множественной регрессии приведены в табл. 3.8 – 3.13. Графики, иллюстрирующие значения средних относительных погрешностей и коэффициентов вариации на примере ТЧЭ Барабинск и ШЧ Брянск-Льговский, приведены на рисунках 3.13 и 3.14.

Из полученных результатов видно, что методы машинного обучения показывают существенно лучшие результаты, чем множественная регрессия. Особенно значительное повышение точности наблюдается для неперевоочных видов деятельности (отношение погрешностей регрессионной модели и наилучшей из остальных моделей $\text{MAPE}_{\text{регресс}} / \text{MAPE}_{\text{наилучш}}$ для различных объектов находится в пределах 1,29 – 1,92, рисунок 3.15).

Таблица 3.8 – Сравнение математических моделей, основанных на методах регрессионного анализа и методах машинного обучения, для ТЧЭ Барабинск в пассажирском движении

Тип модели	Факторы, включаемые в модель	Параметры модели	MAPE, %	RMSE, кВт·ч/ 10 ⁴ т·км бр.	CV
Регрессионная	$t, V_{\text{уч}}, V_{\text{техн}}, m_c$	$w_{\text{уд}} = 60,21 - 0,66t - 1,99V_{\text{уч}} + 3,38V_{\text{техн}} - 0,07m_c$	10,22	16,70	0,13
ИНС		MLP 4-9-1, логистическая/экспоненциальная	10,69	17,53	0,14
ННС		Функция принадлежности на входе – гауссова с количеством нейронов 2 3 3 2	9,60	15,66	0,13
SVM		SVM-регрессия типа 2, функция ядра – RBF	9,49	15,79	0,13

Таблица 3.9 – Сравнение математических моделей, основанных на методах регрессионного анализа и методах машинного обучения, для ТЧЭ Карасук в грузовом движении

Тип модели	Факторы, включаемые в модель	Параметры модели	MAPE, %	RMSE, кВт·ч/ 10 ⁴ т·км бр.	CV
Регрессионная	$t, V_{\text{уч}}, m_c, q$	$w_{\text{уд}} = 295,64 - 0,48t - 0,66V_{\text{уч}} - 0,02m_c - 3,63q$	15,18	32,97	0,19
ИНС		MLP 4-9-1, логистическая/логистическая	15,38	33,61	0,19
ННС		Функция принадлежности на входе – гауссова с количеством нейронов 2 3 3 2	14,21	31,98	0,18
SVM		SVM-регрессия типа 2, функция ядра – RBF	14,31	33,43	0,20

Таблица 3.10 – Сравнение математических моделей, основанных на методах регрессионного анализа и методах машинного обучения, для ТЧприг Омск в пригородном движении

Тип модели	Факторы, включаемые в модель	Параметры модели	MAPE, %	RMSE, кВт·ч	CV
Регрессионная	t, m_c	$W = 130,19 - 10,56t + 4,58m_c$	15,75	166,88	0,20
ИНС		MLP 2-9-1, логистическая/логистическая	14,73	157,91	0,19
ННС		Функция принадлежности на входе – рi-функция с количеством нейронов 15 15	13,35	146,70	0,17
SVM		SVM-регрессия типа 1, функция ядра – RBF	19,31	232,62	0,25

Таблица 3.11 – Сравнение математических моделей, основанных на методах регрессионного анализа и методах машинного обучения, для СЛД Аркаим

Тип модели	Факторы, включаемые в модель	Параметры модели	MAPE, %	RMSE, кВт·ч	CV
Регрессионная	F_1, F_2	$W = 346,82 - 58,69F_1 + 19,83F_2$	17,56	60,43	0,18
ИНС		MLP 2-4-1, экспоненциальная/логистическая	13,66	45,12	0,15
ННС		Функция принадлежности на входе – двойная гауссова с количеством нейронов 4-5	17,45	60,07	0,18
SVM		SVM-регрессия типа 2, функция ядра – Linear	16,39	55,1	0,17

Таблица 3.12 – Сравнение математических моделей, основанных на методах регрессионного анализа и методах машинного обучения, для ШЧ Брянск-Льговский

Тип модели	Факторы, включаемые в модель	Параметры модели	<i>MAPE</i> , %	<i>RMSE</i> , кВт·ч	<i>CV</i>
Регрессионная	$t, T_{\text{св. дня}}, Sn$	$W = 535,78 - 5,98t - 0,0015T_{\text{св. дня}} + 109,84Sn$	6,08	30,44	0,07
ИНС		MLP 3-9-1, логистическая/логистическая	5,85	31,03	0,07
ННС		Функция принадлежности на входе – двойная гауссова с количеством нейронов 2-3-2	3,34	17,23	0,04
SVM		SVM-регрессия типа 2, функция ядра – Sigmoid	5,04	26,91	0,06

Таблица 3.13 – Сравнение математических моделей, основанных на методах регрессионного анализа и методах машинного обучения, для МЧ Апатиты

Тип модели	Факторы, включаемые в модель	Параметры модели	<i>MAPE</i> , %	<i>RMSE</i> , кВт·ч	<i>CV</i>
Регрессионная	F_1, F_2	$W = 343,35 - 164,13F_1 + 36,57F_2$	19,66	65,49	0,19
ИНС		MLP 2-3-1, тангенциальная / логистическая	10,38	45,56	0,12
ННС		Функция принадлежности на входе – треугольная с количеством нейронов 4-3	10,25	45,02	0,11
SVM		SVM-регрессия типа 2, функция ядра – Sigmoid	14,84	56,2	0,15

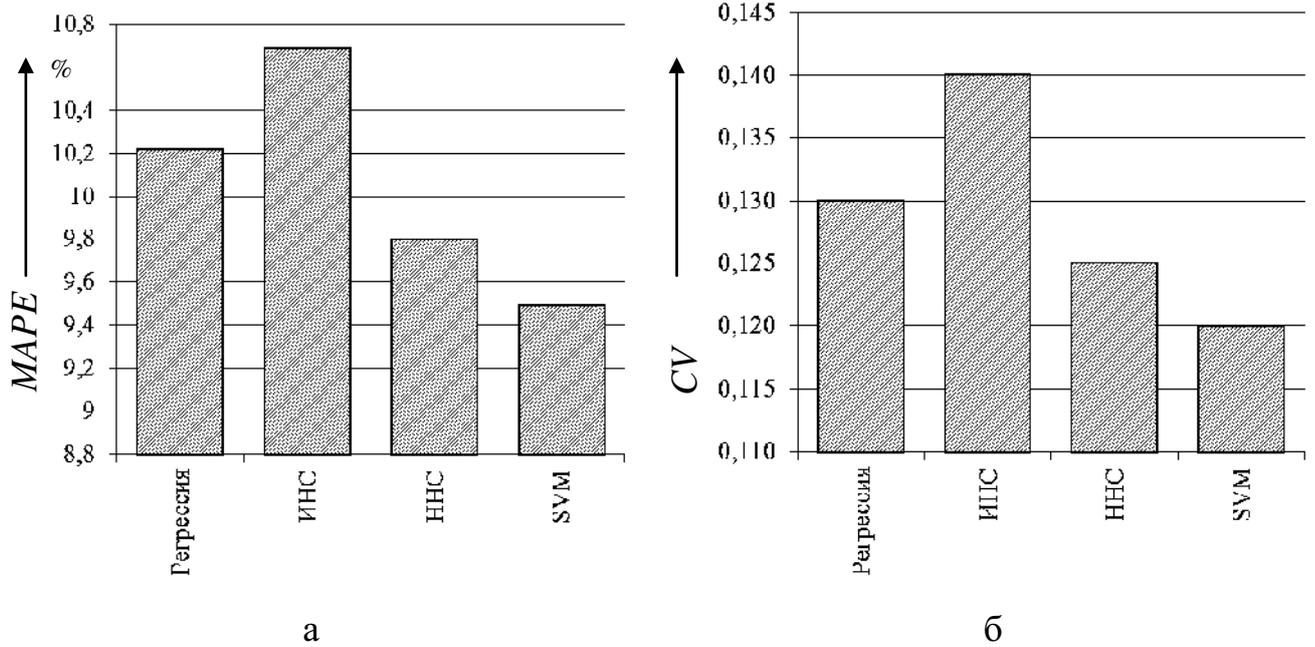


Рисунок 3.13 – Средние относительные погрешности (а) и коэффициенты вариации (б) моделей электропотребления ТЧЭ Барабинск

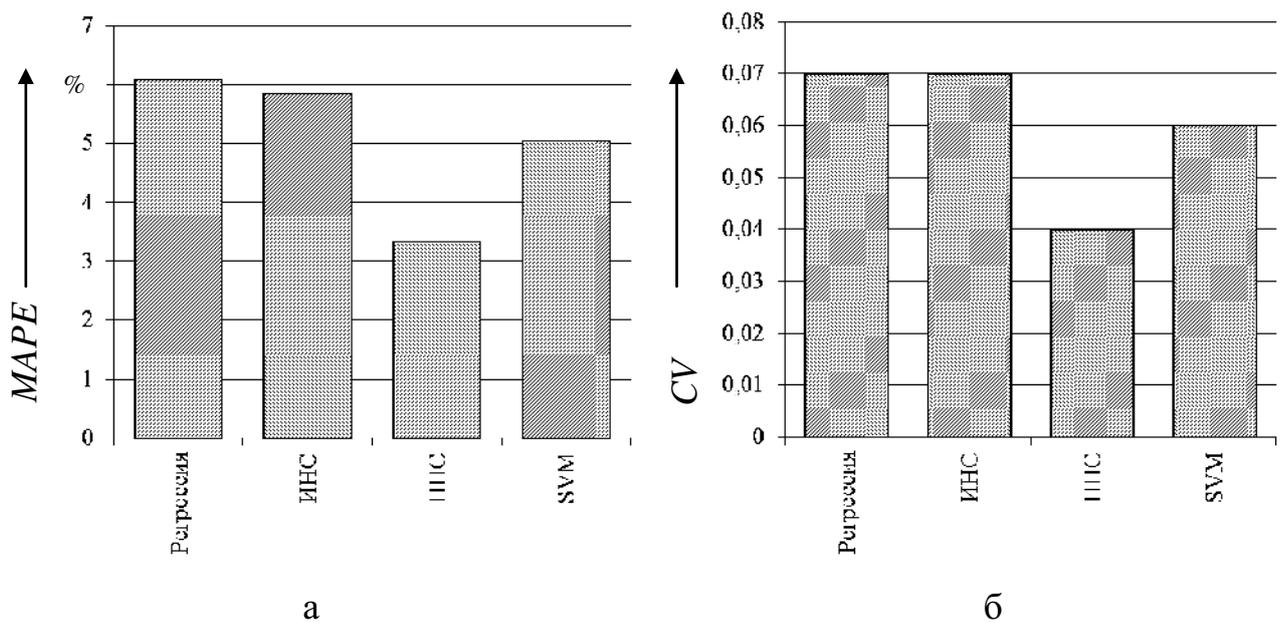


Рисунок 3.14 – Средние относительные погрешности (а) и коэффициенты вариации (б) моделей электропотребления ПЧ Брянск-Льговский

Для перевозочного процесса данный показатель оказывается несколько ниже и находится в интервале 1,07 – 1,18 (рисунок 3.15).

В большинстве случаев наиболее высокие показатели точности демонстрируют модели на основе ННС, однако и методы ИНС и SVM также можно рекомен-

довать для дальнейшего применения при моделировании производственных процессов использования ТЭР на железнодорожном транспорте.

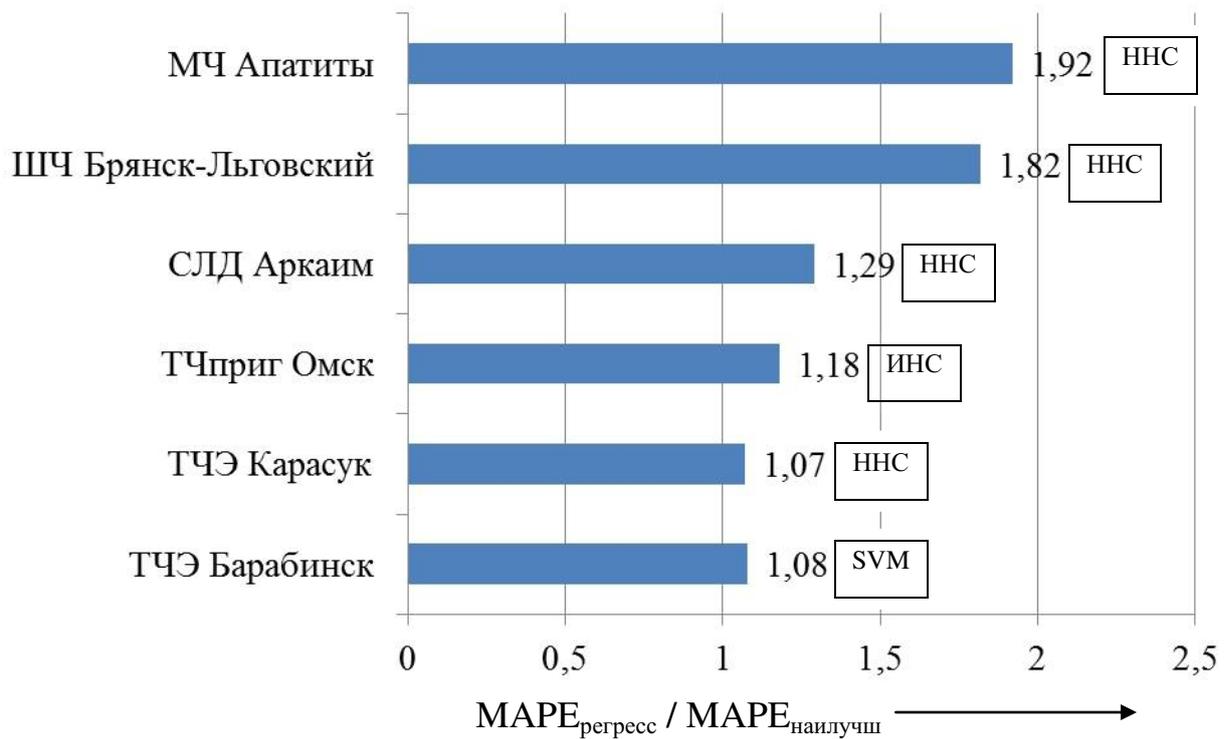


Рисунок 3.15 – Оценка увеличения точности в результате применения моделей на основе методов машинного обучения в сравнении с множественной регрессией

Для оценки качества полученных моделей выполнен анализ закона распределения остатков [239]. Результаты приведены на примере модели ННС для ТЧЭ Барабинск (рисунок 3.16). Аналогичные исследования выполнены для других принятых к рассмотрению производственных процессов.

Как видно из представленных результатов, остатки распределены по нормальному закону (расчетное значение критерия Пирсона 4,22, критическое значение 14,07 для доверительной вероятности 0,95). Математическое ожидание оказалось близким к нулю и составило $-1,05 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/10^4 \text{ т}\cdot\text{км бр}$.

Таким образом, можно сделать вывод, что остатки модели носят случайный характер, а систематические погрешности отсутствуют, что говорит о достаточно высоком качестве модели. Аналогичные выводы можно сделать и для других рассмотренных производственных процессов на железнодорожном транспорте.

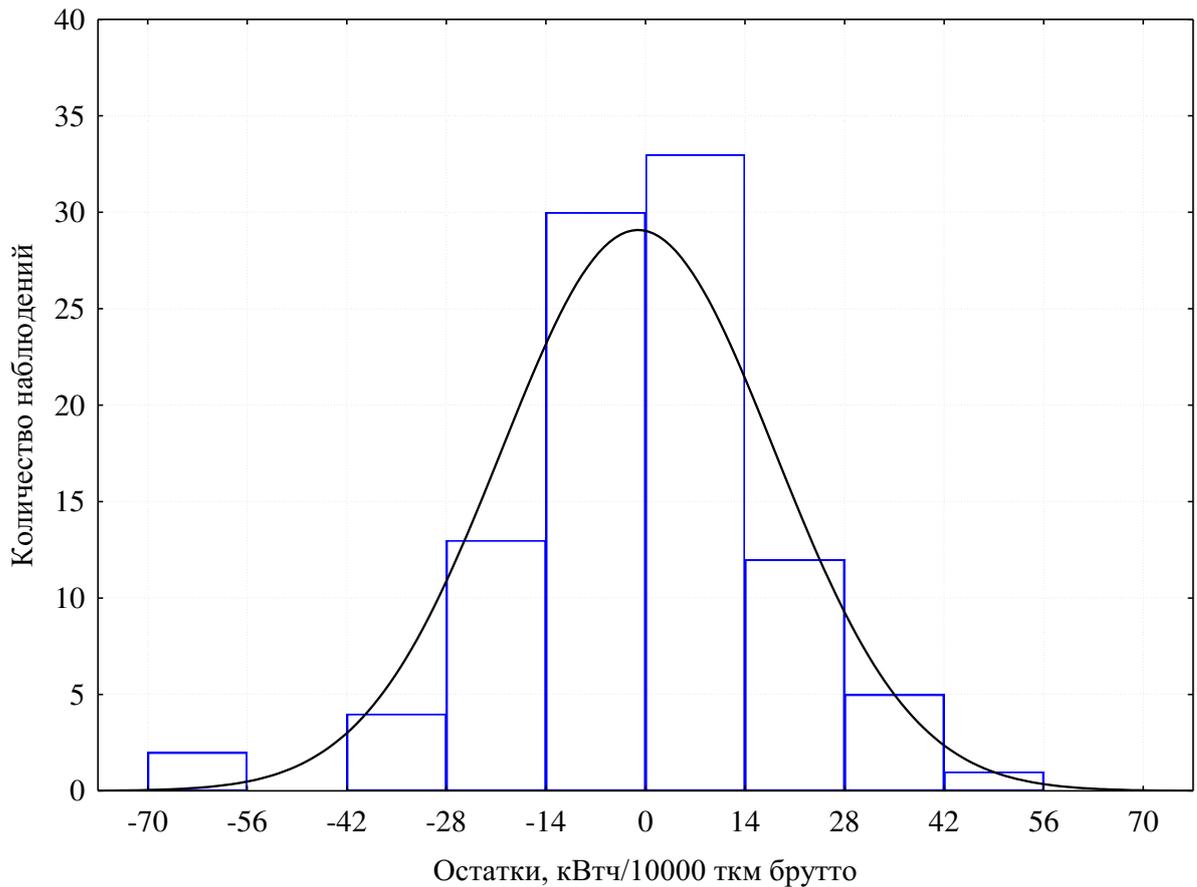


Рисунок 3.16 – Анализ закона распределения остатков модели
ННС для ТЧЭ Барабинск

3.5 Основные результаты и выводы

Теоретически обоснованы, разработаны и экспериментально апробированы математические модели функционирования производственных систем в перевозочных и неперевозочных видах деятельности железнодорожного транспорта в части эффективного использования топливно-энергетических ресурсов, отличающиеся усовершенствованными алгоритмами выбора гиперпараметров, к числу которых относятся: для ИНС – виды и параметры активационных (передаточных) функций на скрытом и выходном слое, количество нейронов на скрытом слое, скорость обучения, коэффициент обратной связи; для ННС – тип и комбинации функции принадлежности на входе, количество циклов обучения; для SVM – тип SVM-регрессии, тип функции ядра, параметры D , ε , γ . На основе предложенных методов и алгоритмов сформированы модели использования ТЭР для принятых к рассмотрению производственных процессов.

По результатам сравнительного анализа установлено, что методы машинного обучения показывают существенно лучшие результаты, чем множественная регрессия. Особенно значительное повышение точности наблюдается для перевозочных видов деятельности (отношение погрешностей регрессионной модели и наилучшей из остальных моделей $MARE_{\text{регресс}} / MARE_{\text{наилучш}}$ для различных объектов находится в пределах 1,29 – 1,92). Для перевозочного процесса данный показатель оказывается несколько ниже и находится в интервале 1,07 – 1,18. Анализ остатков моделей свидетельствует об их нормальном распределении с математическим ожиданием, близким к нулю. Это позволяет рекомендовать методы машинного обучения (ИНС, ННС, SVM) для дальнейшего применения при разработке методов и средств эффективного использования топливно-энергетических ресурсов в производственных процессах на железнодорожном транспорте и оценке фактического эффекта, достигаемого при внедрении организационных, технических и технологических решений, используемых при организации ресурсосберегающих производственных систем железнодорожного транспорта.

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В 2016 году была актуализирована энергетическая стратегия ОАО «РЖД», в соответствии с которой одной из ключевых задач является качественное улучшение структуры управления энергетическим комплексом холдинга, в том числе достигаемое за счет развития инструментария динамического нормирования и прогнозирования расхода ТЭР.

Как было указано в главе 1, в настоящее время в ОАО «РЖД» нашел применение метод нормирования потребления ТЭР «от достигнутого уровня». Процесс нормирования и прогнозирования расхода ТЭР осуществляется по цепочке: СП – региональные дирекции – филиалы – Центральный аппарат.

Исследования, выполненные в п. 1.3, показывают, что погрешность прогнозирования расхода ТЭР на уровне СП и региональных дирекций значительна и более чем в половине случаев превышает удовлетворительное значение (5 %). Главной причиной этого является недостаточно объективный учет особенностей производственного процесса конкретного СП (а в ряде случаев – полное отсутствие такого учета) и динамики изменения климатических факторов [259]. Таким образом, ошибка на первом этапе прогнозирования (уровень СП) неизбежно приводит к пролонгированной ошибке на всех этапах данного процесса. В связи с этим сформулирован первый принцип предлагаемой методологии организации ресурсосберегающих производственных систем, который предполагает переход от методов управления процессом использования ТЭР от достигнутого уровня энергопотребления к методам, предполагающим разработку и применение математических моделей процесса энергопотребления

При этом по обратной цепочке «Центральный аппарат – филиалы – региональные дирекции – СП» формируются задания по экономии ТЭР. В соответствии

с действующей системой бюджетного управления ОАО «РЖД» Департаментом экономики ежегодно формируются задания по экономии ТЭР для филиалов, которые должны реализовываться за счет средств этих филиалов. Необходимо отметить, что определение указанного показателя для филиалов осуществляется на уровне Центрального аппарата ОАО «РЖД» (конкретно – ЦЭУ) с применением эвристических методов на основе экспертных оценок ответственных специалистов [240] без применения современных информационных технологий. Такой подход не позволяет объективно учитывать особенности хозяйственной деятельности различных филиалов и СП с точки зрения процесса энергопотребления.

В связи с этим в главе 2 сформулирован второй принцип предлагаемой методологии организации ресурсосберегающих производственных систем, который заключается в совершенствовании организационной структуры управления процессами использования топливно-энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте в части делегирования полномочий по разработке проектов заданий по экономии энергоресурсов с уровня Центрального аппарата ОАО «РЖД» на уровень филиалов и линейных СП, что позволит объективнее определять обоснованный потенциал экономии ТЭР на данном уровне управления.

Настоящая глава посвящена реализации совершенствованию научных и методологических подходов к организации процесса нормирования и прогнозирования потребления топливно-энергетических ресурсов в производственных процессах на железнодорожном транспорте.

4.1 Совершенствование организационной структуры процесса нормирования и прогнозирования расхода топливно-энергетических ресурсов в производственных процессах на железнодорожном транспорте

С целью совершенствования системы нормирования и прогнозирования расхода ТЭР в ОАО «РЖД» в 2018 году Омским государственным университетом путей сообщения разработан «Порядок формирования заданий филиалам ОАО «РЖД» по экономии топливно-энергетических ресурсов на нетяговые нуж-

ды» [241] (далее – Порядок). Распоряжение о внедрении Порядка приведено в приложении Б.

Для достижения поставленной цели в процессе разработки Порядка решены следующие задачи:

сформирован порядок взаимодействия различных подразделений ОАО «РЖД», задействованных в процессе формирования плана по экономии ТЭР на нетяговые нужды;

разработан математический аппарат, позволяющий, опираясь на существующую статистическую отчетность, а также на результаты энергетического обследования, объективно оценить потенциал экономии ТЭР по филиалам ОАО «РЖД».

Таким образом, структурно разработанный Порядок включает в себя два взаимодополняющих раздела, а именно:

документ, описывающий научные и методологические принципы организации процесса планирования расхода ТЭР, в том числе регламент взаимодействия структурных подразделений ОАО «РЖД» по формированию заданий по экономии ТЭР на нетяговые нужды, порядок формирования годового плана по экономии ТЭР и его корректировки;

методика определения обоснованного потенциала экономии ТЭР на нетяговые нужды.

В дальнейшем описании предлагаемых подходов используются следующие понятия:

1) организационно-технические мероприятия по экономии ТЭР (далее – ОТМ) – мероприятия, направленные на достижение целевых показателей энергосбережения и повышение энергетической эффективности, и реализуемые в рамках инвестиционного проекта «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте» и других инвестиционных проектов филиалов ОАО «РЖД», а также за счет эксплуатационных расходов СП;

2) организационные мероприятия по экономии ТЭР (далее – ОМ) – часть ОТМ, направленных на достижение целевых показателей энергосбережения и по-

вышения энергетической эффективности, и реализуемых за счет эксплуатационных средств текущего периода филиалов ОАО «РЖД».

Таким образом, ОМ являются частью ОТМ, но, в отличие от них, реализуются за счет собственных средств филиалов.

В процессе формирования заданий по экономии ТЭР участвуют подразделения аппарата управления ОАО «РЖД», филиалы и их СП, топливно-энергетические центры железных дорог (НТЭЦ).

При этом указанные подразделения обеспечивают:

1. Департамент технической политики (ЦТех):

а) формирование заданий филиалам по экономии ТЭР от реализации инвестиционного проекта «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте»;

б) осуществление контроля формирования планов ОТМ по экономии ТЭР всех подразделений ОАО «РЖД» и их выполнение;

в) формирование и корректировку перечня типовых ОТМ по экономии ТЭР;

г) организует внесение в АИС «Энергоэффективность» программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности филиалов и их структурных подразделений;

д) вносит предложения по корректировке заданий филиалам по экономии ТЭР с учетом изменений, вносимых в ИПРС.

2. Департамент экономики (ЦЭУ):

а) согласование объемов экономии ТЭР в филиалах, получаемой от реализации инвестиционных проектов;

б) оценку имеющихся резервов по экономии ТЭР в филиалах;

в) формирование и согласование с причастными филиалами проекта заданий филиалам по экономии ТЭР и представление его на утверждение в правление ОАО «РЖД»;

г) контроль достижения филиалами целевых показателей по экономии ТЭР;

д) формирование проектов корректировки заданий филиалам по экономии ТЭР с учетом изменений по балансовой принадлежности объектов потребления

ТЭР, изменений, вносимых в ИПРС и другие инвестиционные проекты, а также с учетом корректировки плановых объемов работ.

3. НТЭЦ:

а) оценку имеющихся резервов экономии ТЭР в региональных дирекциях филиалов (здесь и далее по настоящему пункту – расположенных в границах соответствующей железной дороги) с учетом состояния производственной базы, результатов реализации инвестиционных проектов, а также результатов энергетического обследования и проверок по эффективности использования ТЭР;

б) осуществление выборочной проверки корректности расчета планируемого региональными дирекциями филиалов (и при необходимости линейными структурными подразделениями филиалов) эффекта от мероприятий по экономии ТЭР;

в) согласование целевых показателей по экономии ТЭР, представленных региональными дирекциями филиалов;

г) контроль исполнения региональными дирекциями филиалов целевых показателей экономии ТЭР;

д) согласование корректировки заданий региональным дирекциям филиалов по экономии ТЭР.

4. Аппарат управления филиала:

а) подготовку предложений по экономии ТЭР от реализации инвестиционных проектов, сбалансированные с долгосрочной программой развития и финансовым планом ОАО «РЖД»;

б) согласование проекта целевых показателей по экономии ТЭР, устанавливаемых на корпоративном уровне;

в) декомпозицию проекта заданий по экономии ТЭР по подведомственным региональным дирекциям;

г) оценку корректности формирования ОТМ подведомственными региональными дирекциями, а также проверку соответствия и сбалансированности ОТМ с заданными объемами экономии ТЭР;

д) согласование целевых показателей по экономии ТЭР подведомственным региональным дирекциям;

е) внесение в АИС «Энергоэффективность» подведомственными региональными дирекциями и их структурными подразделениями программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности;

ж) совместно с топливно-энергетическими центрами соответствующих железных дорог корректировку заданий подведомственным региональным дирекциям по экономии ТЭР с учетом изменений плановых объемов работ и других факторов, влияющих на объемы такой экономии.

з) контроль выполнения подведомственными региональными дирекциями заданий по экономии ТЭР.

5. Региональная дирекция филиала:

а) подготовку предложений по экономии ТЭР от реализации ОМ;

б) декомпозицию заданий по экономии ТЭР по подведомственным линейным структурным подразделениям;

в) оценку корректности формирования подведомственными линейными структурными подразделениями ОТМ по экономии ТЭР и согласование этих ОТМ;

г) контроль выполнения подведомственными линейными структурными подразделениями заданий по экономии ТЭР;

д) корректировку плана ОТМ в течение планируемого года с учетом изменения заданий по экономии ТЭР.

6. Линейные структурные подразделения филиалов:

а) формирование плана ОТМ в соответствии с установленными для них целевыми показателями по экономии ТЭР;

б) корректировку плана ОТМ в связи с изменением заданий по экономии ТЭР, а также в случае его несогласования вышестоящими подразделениями, топливно-энергетическими центрами соответствующих железных дорог либо администратором АИС «Энергоэффективность»;

в) выполнение заданий по экономии ТЭР.

Разработан алгоритм процесса нормирования и прогнозирования расхода ТЭР на железнодорожном транспорте, который включает в себя четыре основных этапа (рисунок 4.1).

На I этапе СП ОАО «РЖД» осуществляется прогнозирование расхода ТЭР на основе данных о расходе ТЭР за предыдущие периоды, производственных и климатических факторах, вводе или выводе из эксплуатации оборудования.

Данные предложения согласуются на уровне региональных дирекций, НТЭЦ, филиалов ОАО «РЖД» и ЦЭУ и не включают задания по экономии ТЭР.

Процесс прогнозирования предлагается выполнять на основе разработанной в главе 3 методологии математического моделирования производственных процессов на железнодорожном транспорте в части эффективного использования топливно-энергетических ресурсов с применением методов машинного обучения. Более подробно данный процесс изложен в п. 4.2.

На II этапе Департамент технической политики в установленном в ОАО «РЖД» порядке формирует на планируемый период проект заданий филиалам (с разбивкой по региональным дирекциям) по экономии ТЭР от реализации мероприятий ИПРС по форме согласно таблице 4.1 и направляет их в сроки, установленные действующим регламентом бюджетного управления, в Департамент экономики.

Задания формируются на основе технико-экономических обоснований и прогнозных эффектов от внедрения мероприятий в базовом году.

Филиалы формируют предложения по экономии ТЭР в рамках реализации инвестиционных проектов филиалов (ИПФ) и в установленном в ОАО «РЖД» порядке направляют их в Департамент экономики. Форма предоставления предложений может быть произвольной.

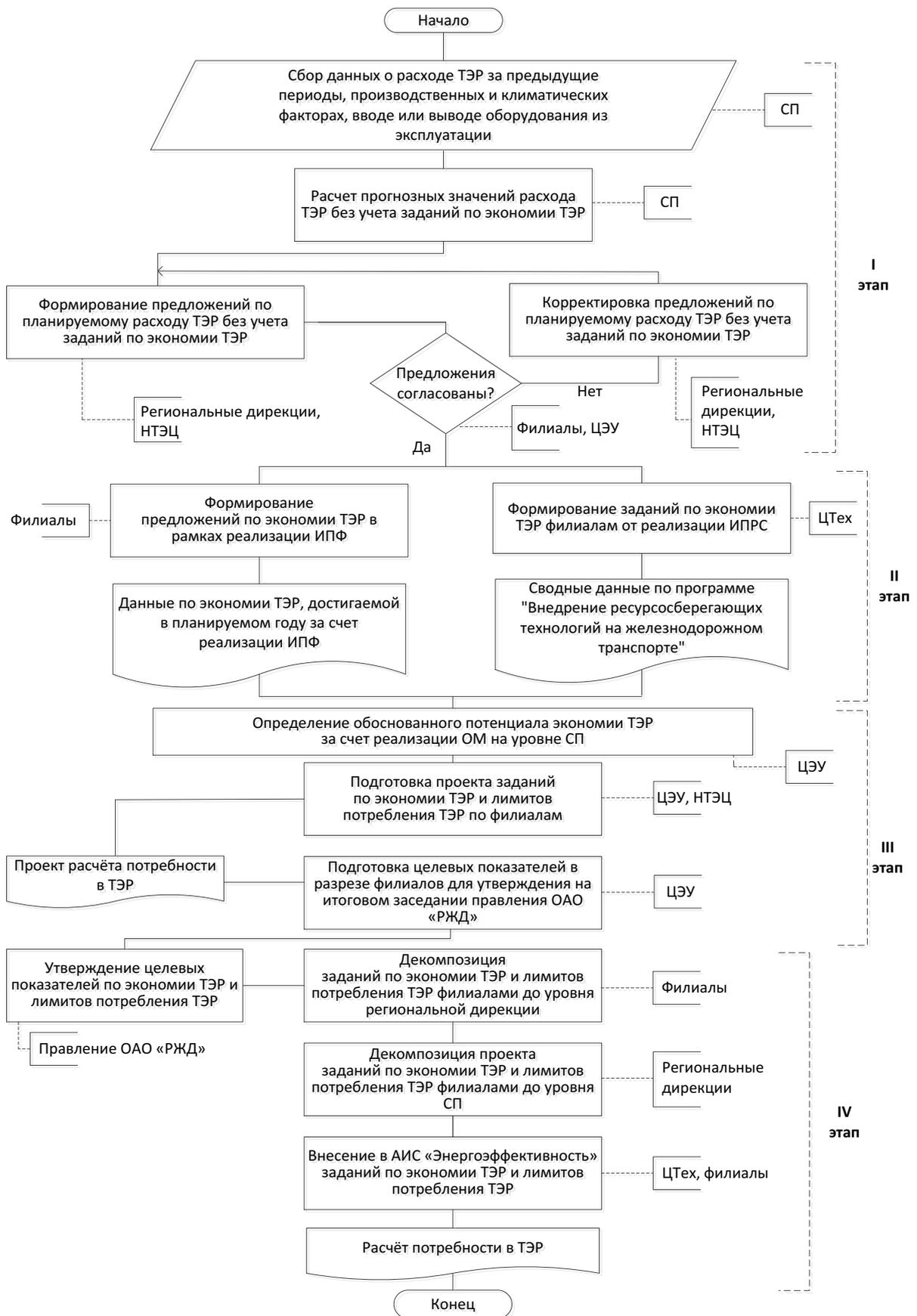


Рисунок 4.1 – Алгоритм процесса нормирования и прогнозирования расхода ТЭР на железнодорожном транспорте

Таблица 4.1 – План экономии ресурсов от реализации мероприятий инвестиционного проекта «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте»

№ п/п	Наименование мероприятия	Электроэнергия		Дизельное топливо		Тепловая энергия	Мазут топочный	Уголь	Газ природный	Вода	Сокращение ФОТ	Снижение трудоемкости	Материальные ресурсы	Прочие материальные затраты	Всего
		на тягу поездов	на не-тяговые нужды	на тягу поездов	на не-тяговые нужды										
		млн. кВт·ч	млн. кВт·ч	тыс. т.	тыс. т.										
млн. руб.	млн. руб.	млн. руб.	млн. руб.	млн. руб.	млн. руб.	млн. руб.	млн. руб.	млн. руб.	млн. руб.	млн. руб.	млн. руб.	млн. руб.	млн. руб.	млн. руб.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

Предложения по экономии ТЭР разрабатываются в соответствии с целевыми показателями, установленными долгосрочной программой развития и сводной программой повышения инвестиционной и операционной эффективности ОАО «РЖД».

На III этапе Департамент экономики в десятидневный срок с момента предоставления Департаментом технической политики и филиалами предложений по экономии ТЭР подготавливает на планируемый год проект заданий по экономии ТЭР по филиалам от реализации ОТМ.

Планируемый расход ТЭР i -го вида на планируемый период определяется по выражению:

$$W_i^{\text{расч.план}} = W_i^{\text{план.СП}} - \mathcal{E}_i^{\text{ОТМ}}, \quad (4.1)$$

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»:

$$\mathcal{E}_i^{\text{ОТМ}} = \mathcal{E}_i^{\text{ИПРС}} + \mathcal{E}_i^{\text{ИПФ}} + \mathcal{E}_i^{\text{ОМ}}, \quad (4.2)$$

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

Потенциал экономии ТЭР за счет реализации ОМ определяется на основании данных о прогнозном расходе ТЭР за базовый период, прогнозируемом изменении производственных мощностей и совершенствовании технологических процессов в планируемом году, на основании результатов энергетических обследований и мероприятий, утвержденных начальником соответствующей железной дороги по результатам комиссионного осмотра, а также других проверок по эффективности использования ТЭР за последние пять лет, предшествующие базовому периоду.

На основе полученной информации формируется разработочная таблица расчета потребности в ТЭР по филиалам (таблица 4.2).

Проект заданий филиалам по экономии ТЭР формируется в натуральном выражении с поквартальной разбивкой по видам ТЭР, в разрезе региональных дирекций и согласовывается в установленном порядке ЦЭУ и соответствующими филиалами.

Департамент экономики ежегодно, в сроки, установленные регламентом бюджетного управления:

оценивает и согласовывает целевые показатели, представленные филиалами, при соответствии и сбалансированности их с проектом заданий по экономии ТЭР;

проводит подготовку и составляет по форме согласно таблице 4.3 сводный проект заданий по экономии ТЭР в разрезе филиалов на планируемый год для последующего его утверждения на итоговом заседании правления ОАО «РЖД».

На IV этапе осуществляется утверждение целевых показателей по экономии ТЭР на уровне Правления ОАО «РЖД». После этого региональные дирекции в течение 5 рабочих дней с момента получения задания по экономии ТЭР осуществляют декомпозицию целевых показателей по экономии ТЭР до уровня линейного структурного подразделения по форме согласно таблице 4.3.

Линейные структурные подразделения в 5-дневный срок с момента получения от региональных дирекций проекта задания по экономии ТЭР подтверждают целевые показатели экономии ТЭР, установленные на планируемый год региональной дирекцией.

Департамент технической политики совместно с филиалами ежегодно, в установленном в ОАО «РЖД» порядке обеспечивают внесение и согласование в АИС «Энергоэффективность» программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности филиалов и их структурных подразделений на планируемый год, обеспечивающих достижение установленных целевых показателей по использованию ТЭР.

Корректировка годового плана по экономии ТЭР на нетяговые нужды филиалов осуществляется в связи с:

- 1) корректировкой ИПРС и инвестиционных проектов филиалов;
- 2) корректировкой бюджетов филиалов ОАО «РЖД»;
- 3) изменением объемов выполняемых работ и производственных мощностей (передача объектов) в планируемом году;

Таблица 4.2 – Разработочная таблица расчета потребности в ТЭР на нетяговые нужды

Наименование филиала / региональной дирекции / линейного структурного подразделения	Расход ТЭР												± План к факту		Изменение расхода ТЭР в плановом периоде от						План экономии ТЭР		
	Всего		по видам деятельности						инвестиции		ВХО				ввода дополнительных мощностей			вывода мощностей					
			перевозки		ПВД		прочие						абс. вел.	%	ВСЕГО	в том числе		ВСЕГО	в том числе		ОМ	ИПФ	ИПРС
	баз. период (факт)	план. период (план)	баз. период (факт)	план. период (план)	баз. период (факт)	план. период (план)	баз. период (факт)	план. период (план)	баз. период (факт)	план. период (план)	баз. период (факт)	план. период (план)				ИПФ	ИПРС		ИПФ	ИПРС			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23

Таблица 4.3 – Задания филиалам ОАО «РЖД» по экономии ТЭР

Филиалы	Электроэнергия, млн. кВт·ч		Дизельное топливо, тыс. т		Мазут, тыс. т	Уголь, тыс. т	Бензин, тыс. т	Природный газ, тыс. куб. м	Тепловая энергия, тыс. Гкал	Всего ТЭР	
	тяга поездов	нетяговые нужды (без потерь)	тяга поездов	нетяговые нужды						т у.т.	млн. руб.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ВСЕГО	в натур. ед.										

4) существенным изменением температуры окружающего воздуха относительно средней температуры, для которой производился расчет потребления котельно-печного топлива;

5) другими существенными изменениями, не предусмотренными при формировании годовых планов по экономии ТЭР филиалов и произошедшими в течение планируемого периода по независящим от филиалов причинам.

Департамент технической политики в соответствии с порядком формирования и реализации ИПРС проводит корректировку проекта, и доводит ее результаты до причастных филиалов и Департамента экономики.

Филиалы, в соответствии с Порядком заполнения и представления отчета о реализации плана организационно-технических мероприятий по достижению целевых показателей энергосбережения и повышения энергетической эффективности, ежеквартально, формируют и предоставляют отчеты о результатах выполнения планов ОТМ, в том числе эффективности использования ресурсосберегающих технических средств и технологий, внедренных по инвестиционному проекту «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте» в базовом году, с внесением и согласованием в АИС «Энергоэффективность» отчетных данных об экономии ТЭР, полученной подведомственными структурными подразделениями.

Департамент технической политики совместно с Департаментом экономики в установленные сроки обеспечивают:

автоматизированный мониторинг результативности реализации планов ОТМ структурных подразделений филиалов ОАО «РЖД», формирование и размещение в АИС «Энергоэффективность» актуальных данных о достижении подразделениями компании целевых показателей энергоэффективности потребления ТЭР;

ежеквартальное рассмотрение результатов выполнения филиалами Программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности ОАО «РЖД» на заседаниях ЦКЭР;

анализ представленных филиалами отчетов о результатах выполнения планов ОТМ за отчетный период с последующим принятием решений по корректировке годового плана по экономии ТЭР на нетяговые нужды.

Департамент экономики в сроки, установленные регламентом бюджетного управления, готовит предложение о корректировке заданий филиалам по экономии ТЭР для последующего их утверждения, установленным в ОАО «РЖД» порядке.

Департамент технической политики совместно с филиалами обеспечивает внесение изменений в АИС «Энергоэффективность» по филиалам и их подведомственным структурным подразделениям.

Схема корректировки заданий филиалам ОАО «РЖД» по экономии топливно-энергетических ресурсов на нетяговые нужды приведена на рисунке 4.2.

Из представленных в алгоритме на рисунке 4.1 действий наибольшую сложность с научной и методологической точек зрения представляют прогнозирование расхода ТЭР в производственных процессах линейных СП и определение обоснованного потенциала экономии ТЭР за счет реализации ОМ.

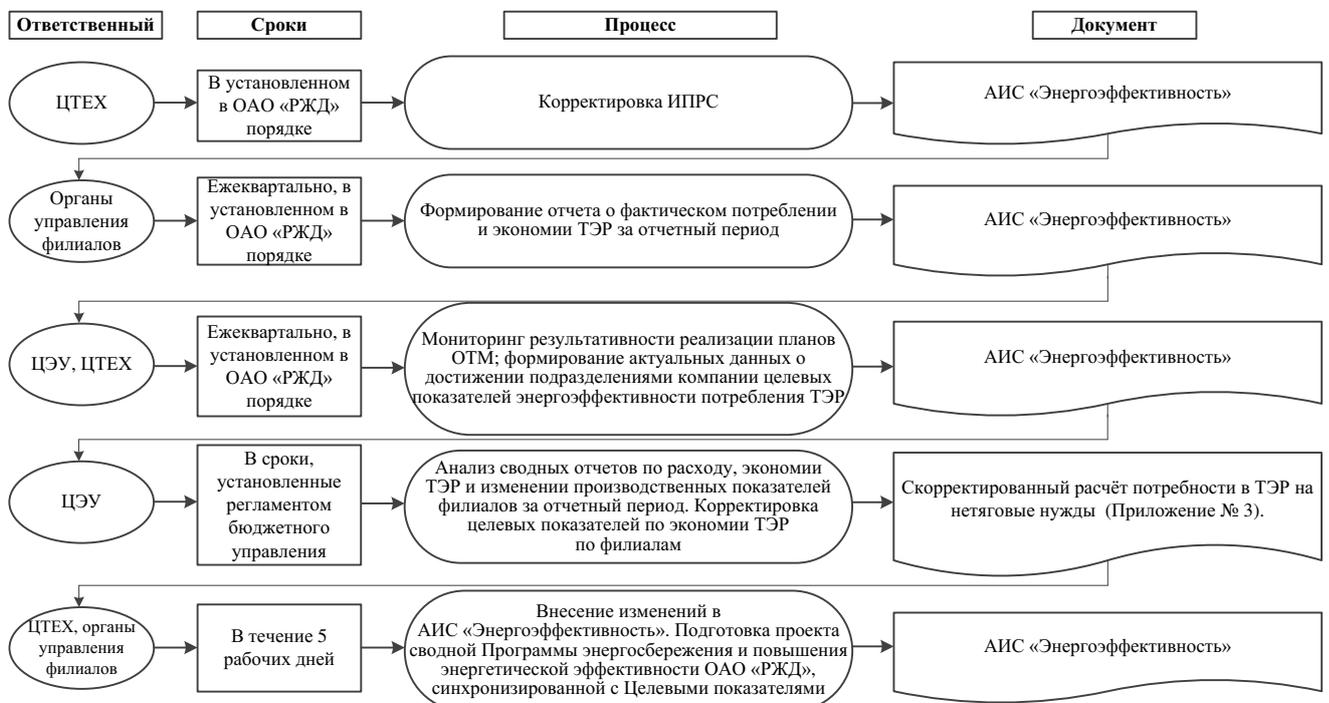


Рисунок 4.2 – Схема корректировки заданий филиалам ОАО «РЖД» по экономии ТЭР

Для нормирования расхода электрической энергии в производственных процессах линейных СП разработана методика прогнозирования расхода электроэнергии на нетяговые нужды с применением ИНС, в основу которой заложены методы и модели, изложенные в главе 3.

4.2 Разработка методики прогнозирования расхода электроэнергии на нетяговые нужды с применением искусственных нейронных сетей

Для расчета прогнозных значений расхода электроэнергии на нетяговые нужды разработана «Методика планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды с использованием искусственных нейронных сетей», которая утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2626р от 06.12.2011 г. и внедрена на сети железных дорог [187]. Распоряжение о внедрении методики приведено в приложении В.

Алгоритм разработанной методики, представленный на рисунке 4.3, включает в себя шесть основных этапов.

1. Формирование первичных исходных данных и отбор факторов для включения в модель.

Нормирование и прогнозирование расхода электрической энергии в непрерывочных видах деятельности осуществляется на уровне СП или отдельных цехов, отделений и производственных участков в составе СП.

Сбор исходных данных необходимо выполнять по каждому принятому к рассмотрению объекту моделирования. При выделении объекта моделирования в составе СП следует учитывать, что объем его производственной деятельности должен быть отражен в существующей системе отчетности ОАО «РЖД».

При планировании расхода электрической энергии на нетяговые нужды принимаются к рассмотрению производственные и климатические факторы, которые рассмотрены в п. 2.2. Обязательными факторами должны являться объем производственной деятельности $V_{\text{произв}}$ и температура воздуха t . Отбор факторов осуществляется согласно методологии, предложенной в п. 2.3.

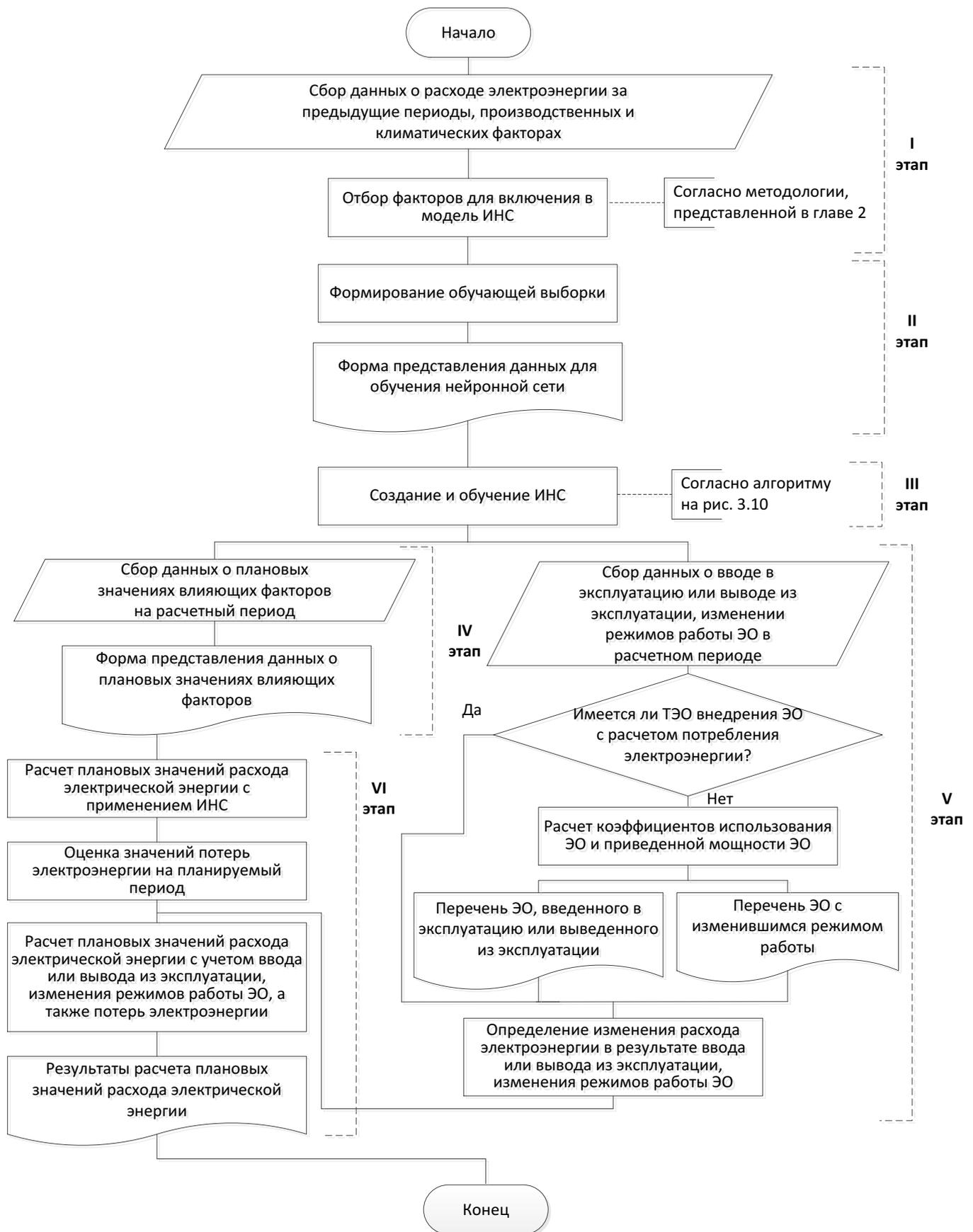


Рисунок 4.3 – Алгоритм методики прогнозирования расхода электроэнергии на нетяговые нужды с применением ИНС

2. Обработка первичных исходных данных и формирование обучающей выборки.

На основе исходных данных, полученных на этапе 1, формируется выборка для обучения нейронной сети по форме таблицы 4.4. При необходимости ошибочные данные устраняются.

3. Создание и обучение нейронной сети.

При решении задачи прогнозирования расхода электрической энергии в методике используется сеть обратного распространения с одним скрытым слоем. Входной слой служит лишь для подачи входных сигналов в сеть. На скрытом и выходном слоях производится обработка поступающих сигналов. При этом может использоваться одна из двух активационных (передаточных) функций: сигмоидная (логистическая) или радиально-симметричная.

Таблица 4.4 – Выборка для обучения ИНС

Период	Производственные факторы			Климатические факторы			Расход электрической энергии W , кВт·ч
	Фактор 1	...	Фактор n	Фактор 1	...	Фактор m	

Загружаемые данные автоматически делятся на обучающую и тестовую выборки в пропорции 80 % / 20 %. При загрузке данных выполняется их минимальная обработка – по каждому фактору определяется минимальное и максимальное значения для установки граничных значений факторов.

Порядок обучения и выбора гиперпараметров ИНС приведен на рисунке 3.8. Как показано в [211], при рассмотрении различных вариантов ИНС «...варьируются следующие параметры: скорость обучения η меняется от 30 до 60 с шагом 5; коэффициент обратной связи меняется от 0,1 до 0,5 с шагом 0,2. При этом проверяются два вида передаточных функций. Первый вариант сетей – сети, имеющие сигмоидную функцию на обоих слоях (скрытом и выходном). В этом

случае параметр активационной функции a меняется в пределах от 0,04 до 0,2 с шагом 0,03 и от 0,2 до 0,6 с шагом 0,08. Второй вариант – сети, имеющие на скрытом слое сигмоидную активационную функцию с параметром a , меняющимся от 0,02 до 0,3 с шагом 0,02, а на выходном слое – радиально-симметричную функцию с параметром a , меняющимся от 1 до 8 с шагом 2...».

Сравнение нейронных сетей и выбор наилучшей из них осуществляется согласно критерию (3.11).

4. Сбор данных о прогнозных значениях влияющих факторов на расчетный период.

На данном этапе осуществляется сбор информации об ожидаемых значениях влияющих факторов на расчетный период и представление данных по форме, аналогичной таблице 4.4, за исключением столбца «Расход электрической энергии W , кВт·ч».

5. Определение изменения расхода электроэнергии в результате ввода или вывода из эксплуатации, изменения режимов работы электрооборудования.

Опытная эксплуатация методики показала, что основная проблема для пользователей заключается в сложности учета в обучающей или тестовой выборке ввода или вывода из эксплуатации электрооборудования (ЭО), изменении режимов его работы. В настоящей работе предлагается усовершенствовать данный процесс выведением его в отдельный этап алгоритма планирования (рисунок 4.3), выполняемый параллельно с четвертым этапом.

На данном этапе оценивается дополнительный расход электроэнергии, появляющийся в результате ввода в эксплуатацию электрооборудования, например, при внедрении энергосберегающих устройств. Также возможно изменение режимов работы электрооборудования, например, в результате внедрения организационных мероприятий, влияющих на коэффициент его использования.

В случае, если ввод в эксплуатацию ЭО осуществляется в рамках ИПФ или ИПРС, ожидаемое изменение расхода электроэнергии определяется согласно ТЭО данного мероприятия. Во всех остальных случаях можно воспользоваться методом, основанным на расчете приведенной мощности ЭО. С этой целью осуществляется сбор данных согласно таблицам 4.5 и 4.6.

Таблица 4.5 – Перечень ЭО, введенного в эксплуатацию или выведенного из эксплуатации

Дата ввода в эксплуатацию/вывода из эксплуатации	Наименование ЭО	Место установки (объект моделирования)	Кол-во единиц	Установленная мощность единицы оборудования P_n , кВт	Коэффициент использования нагрузки k_n	Коэффициент использования установленной мощности k_m
Введенное в эксплуатацию оборудование						
Выведенное из эксплуатации оборудование						

Таблица 4.6 – Перечень ЭО с изменившимся режимом работы

Дата изменения режима работы	Наименование ЭО	Место установки (объект моделирования)	Кол-во единиц	Установленная мощность единицы оборудования P_n , кВт	Коэффициент использования нагрузки k_n		Коэффициент использования установленной мощности k_m	
					до изменения режима работы	после изменения режима работы	до изменения режима работы	после изменения режима работы

В указанных таблицах под установленной мощностью ЭО понимается его номинальная активная мощность P_n , т. е. мощность, заявленная в паспортных данных.

Коэффициент использования нагрузки k_n может быть определен по справочным данным, приведенным в методике [187], однако это неизбежно приводит к ошибкам, связанным с несоответствием фактического режима работы ЭО среднестатистическому. Поэтому целесообразно определять коэффициент использования нагрузки исходя из фактического времени работы ЭО за смену, которое, в свою очередь, можно получить из технологических карт производственных процессов или в результате выполнения «фотографии рабочего дня»:

$$k_n = \frac{\sum t_{\text{ЭО}}}{\sum T_{\text{см}}}, \quad (4.3)$$

где $t_{\text{ЭО}}$ – общее время работы ЭО за смену, ч;

$T_{\text{см}}$ – длительность смены объекта моделирования, ч.

Коэффициент использования установленной мощности k_m учитывается в том случае, когда в процессе работы задействуется не вся номинальная мощность ЭО, а ее часть, и рассчитывается по выражению:

$$k_m = \frac{P_{\text{факт}}}{P_n}, \quad (4.4)$$

где $P_{\text{факт}}$ – фактически используемая мощность ЭО, которая может быть определена по паспортным данным ЭО или в результате измерений.

Дополнительный расход электроэнергии в результате ввода в эксплуатацию ЭО с установленной мощностью P_n определяется по формуле [332]:

$$W_{i \text{ пр. доп. моц}} = k_n k_m P_n T, \quad (4.5)$$

где T – продолжительность рабочего времени отчетного периода с учетом даты ввода в эксплуатацию ЭО, ч.

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:

$$\Delta W = P_n \left(k_n^{\text{отч}} k_m^{\text{отч}} T^{\text{отч}} - k_n^{\text{баз}} k_m^{\text{баз}} T^{\text{баз}} \right), \quad (4.6)$$

где $k_n^{\text{отч}}, k_m^{\text{отч}}, k_n^{\text{баз}}, k_m^{\text{баз}}$ – коэффициенты использования нагрузки и установленной мощности в отчетном и базовом периоде соответственно;

$T^{\text{отч}}, T^{\text{баз}}$ – продолжительность рабочего времени отчетного и базового периода с учетом даты изменения режимов работы ЭО, ч.

6. Расчет прогнозных значений расхода электроэнергии.

Прогнозирование расхода электрической энергии с применением ИНС ведется на основе разработанной математической модели. Для этого в предварительно обученной нейросетевой модели необходимо задать расчетный период и для соответствующего периода заполнить информацию о прогнозных значениях влияющих факторов, а затем на основе сформированной математической модели определяется прогнозное значение расхода электрической энергии.

Результирующее прогнозное значение расхода электроэнергии определяется с учетом составляющей, связанной с изменением расхода электроэнергии в результате ввода или вывода из эксплуатации, изменения режимов работы ЭО, определяемой по формулам (4.5) и (4.6).

Следует отметить, что расход электрической энергии прогнозируется без потерь (небаланса), которые формируются в сетях нетяговых железнодорожных потребителей. Учет суммарного расхода электрической энергии осуществляется за счет оценки небаланса по данным Трансэнерго.

Результаты прогнозирования приводятся по форме таблицы 4.7.

При получении актуальных данных о расходе ТЭР и влияющих факторах за новые расчетные периоды осуществляется дообучение нейронной сети.

Таблица 4.7 – Результаты расчета прогнозных значений расхода электроэнергии

Расчетный период	Расход электрической энергии, кВт·ч			
	без учета потерь		с учетом потерь	
	предыдущий период (факт. значение)	расчетный период (расч. значение)	предыдущий период (факт. значение)	расчетный период (расч. значение)

Дообучение ИНС осуществляется ответственными специалистами СП и не подразумевает изменения основной структуры ИНС (состава и количества влияющих факторов, числа нейронов на скрытом слое, используемых активационных функций). При дообучении изменяются веса ИНС w_i на основе новой информации о расходе электроэнергии и влияющих факторах.

Дообучение ИНС следует проводить один раз в квартал. Данные необходимо представлять в форме таблицы 4.4.

Алгоритм дообучения ИНС следующий:

- открыть существующую ИНС;
- добавить новые данные о фактических значениях влияющих факторов и расходе электроэнергии;
- в процессе дообучения приложение корректирует веса синапсов, придавая им наиболее подходящие значения, в то время как внутренние параметры нейросети (скорость обучения, вид и параметры активационных функций, коэффициент обратной связи, количество нейронов на скрытом слое) не меняются;
- в случае, если после дообучения ошибка моделирования снижается, то дообученная сеть автоматически принимается в качестве рабочей, а ее параметры сохраняются в том же файле.

Расчет прогнозного расхода электрической энергии на последующие периоды необходимо выполнять с применением дообученной ИНС.

Для эффективной реализации предложенной методики [187] разработан программный комплекс [242] (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012617381), который входит в состав утвержденной методики в качестве электронного приложения к ней. Электронное приложение предназначено для использования ответственными специалистами СП.

Алгоритм электронного приложения приведен на рисунке 4.4 [211].

В режиме обучения разработанный программный комплекс анализирует множество сетей, меняя внутренние параметры каждой в диапазонах, указанных в подразделе «Создание и обучение нейронной сети» п. 4.2. Перебор вариантов ИНС осуществляется в автоматическом режиме.

Внешний вид основного окна электронного приложения приведен на рисунке 4.5.

Результаты прогнозирования расхода электрической энергии представляются в форме таблицы Microsoft Excel и могут быть переданы для дальнейшей обработки и анализа.

Выполнена опытная апробация разработанных методики и программного комплекса для различных объектов в неперевозочных видах деятельности для различных расчетных периодов (сутки, месяц, квартал).

В 2011 г. выполнена апробация предложенных подходов для прогнозирования расхода электроэнергии для СП Южно-Уральской дирекции по ремонту тягового подвижного состава (ТР) [216]. Как показано в главе 1, данные СП характеризуются неудовлетворительной погрешностью планирования расхода электроэнергии методом «от достигнутого уровня». Так, в 2009 г. в двух СП наблюдалась значительная погрешность планирования (ТЧР-23 и ТЧР-26 – (-21,1) % и (-14,8) % соответственно). В 2010 г. практически для всех СП имело место неэффективное планирование с погрешностями, превышающими в отдельных случаях 40 %. В целом для ТР расхождение между планируемым и фактическим значением электропотребления за 2009 – 2010 гг. составило 25,2 %.

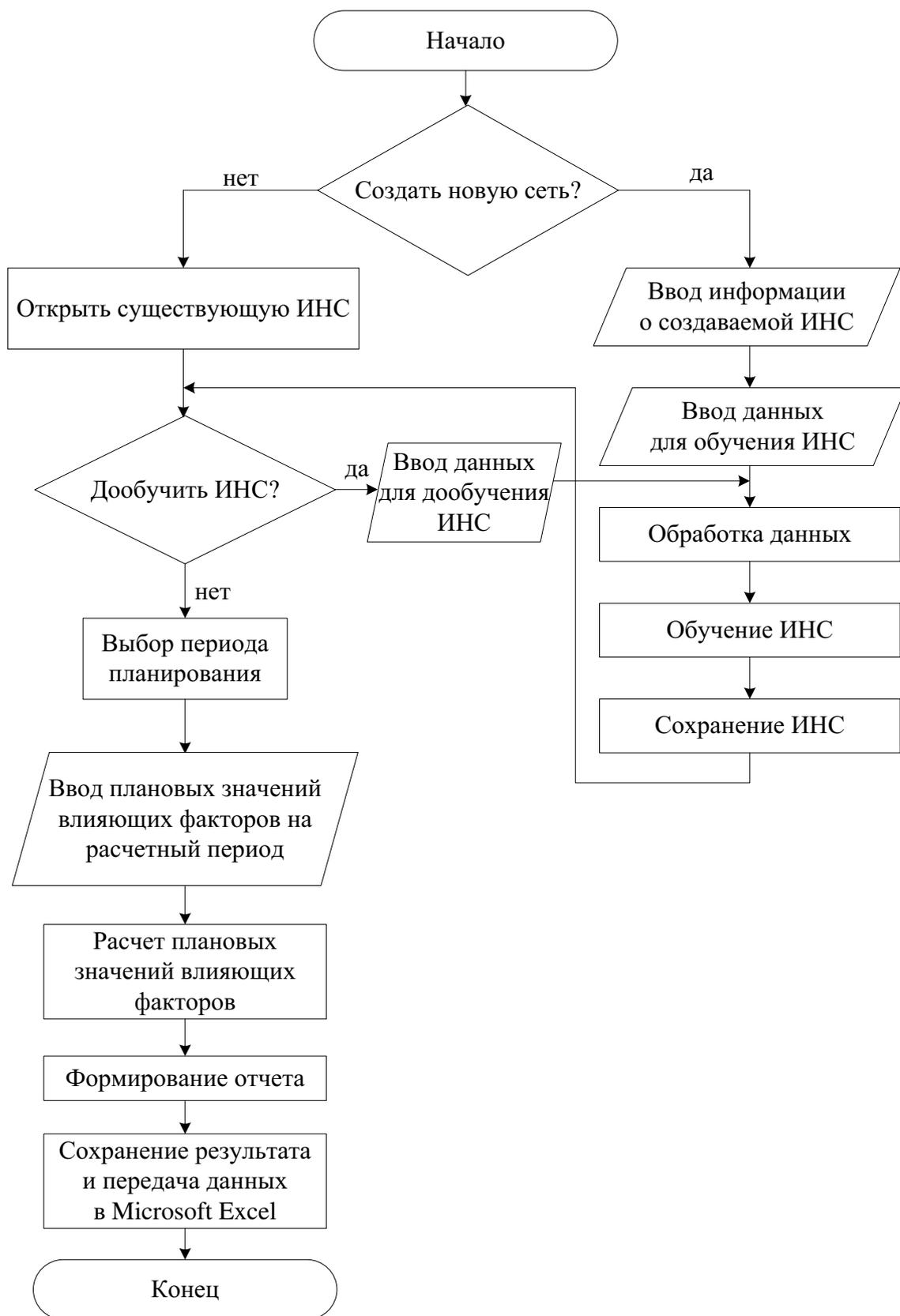


Рисунок 4.4 – Алгоритм электронного приложения к методике прогнозирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды

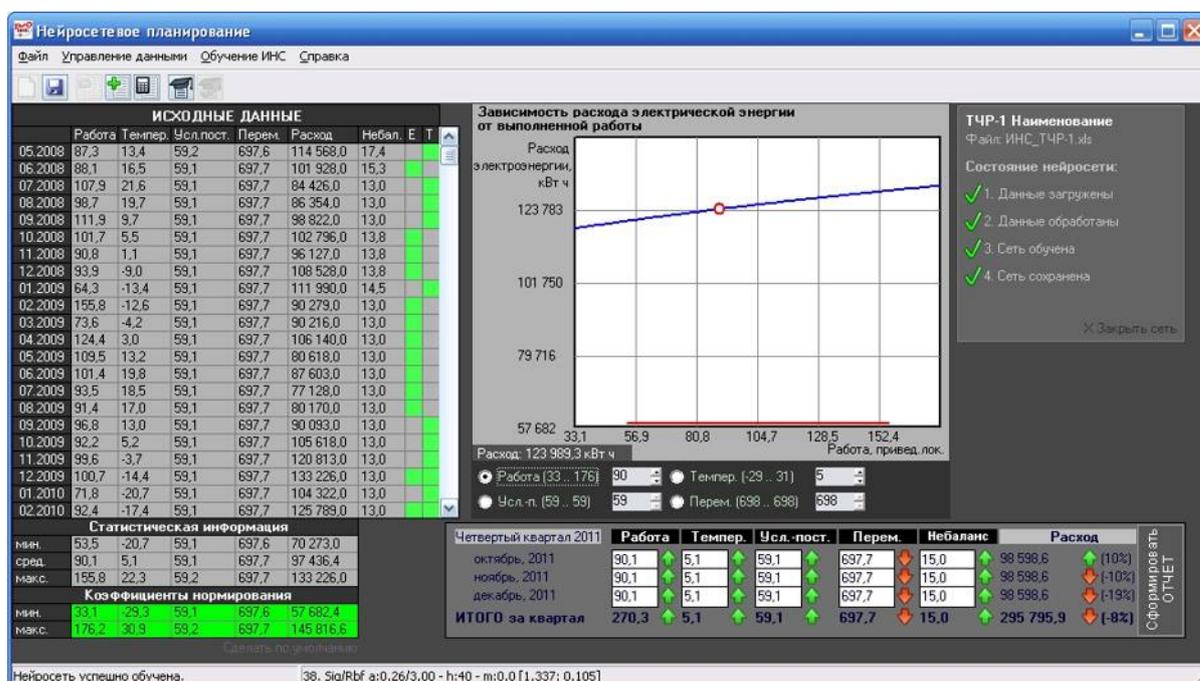


Рисунок 4.5 – Внешний вид основного окна электронного приложения

На основе предложенной методики сформированы нейросетевые модели электропотребления указанных объектов, показатели точности которых приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Параметры нейросетевых моделей СП ТР Южно-Уральской ж.д.

Наименование СП	Показатели точности согласно (3.11)		
	K_T	MAPE	CV
ТЧР-21	1,203	12,6	0,077
ТЧР-22	3,067	15,9	0,149
ТЧР-23	1,039	10,9	0,062
ТЧР-25	1,269	14,1	0,069
ТЧР-26	1,814	7,7	0,054

Для всех перечисленных моделей на входе используется сигмоидная активационная функция, а на выходе – радиально-симметричная (для ТЧР-25 и ТЧР-26) или сигмоидная (ТЧР-21, ТЧР-22, ТЧР-23).

Динамика фактического расхода электроэнергии и расхода, смоделированного ИНС, для ТЧР-26 приведена на рисунке 4.6.

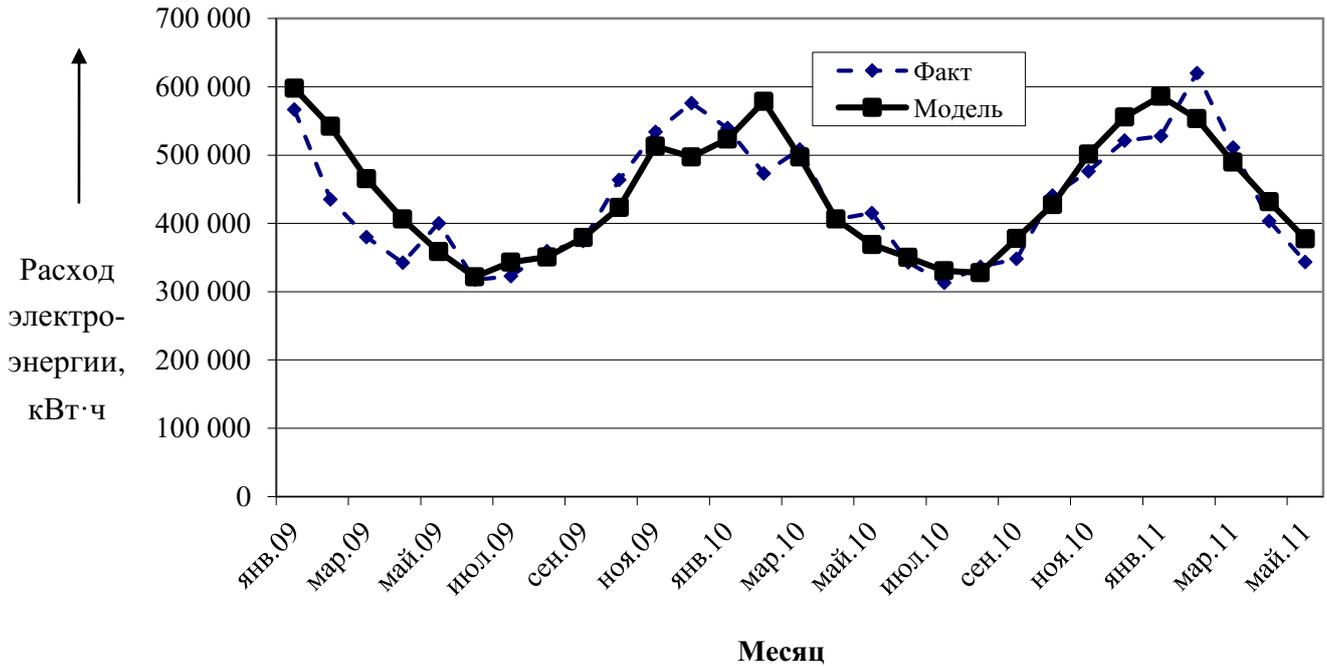


Рисунок 4.6 – Динамика расхода электрической энергии по ТЧР-26

С использованием нейросетевых моделей рассчитаны плановые значения расхода электрической энергии на нетяговые нужды на третий квартал 2011 г.

Сводная информация с результатами планирования приведена на рисунке 4.7 [216].

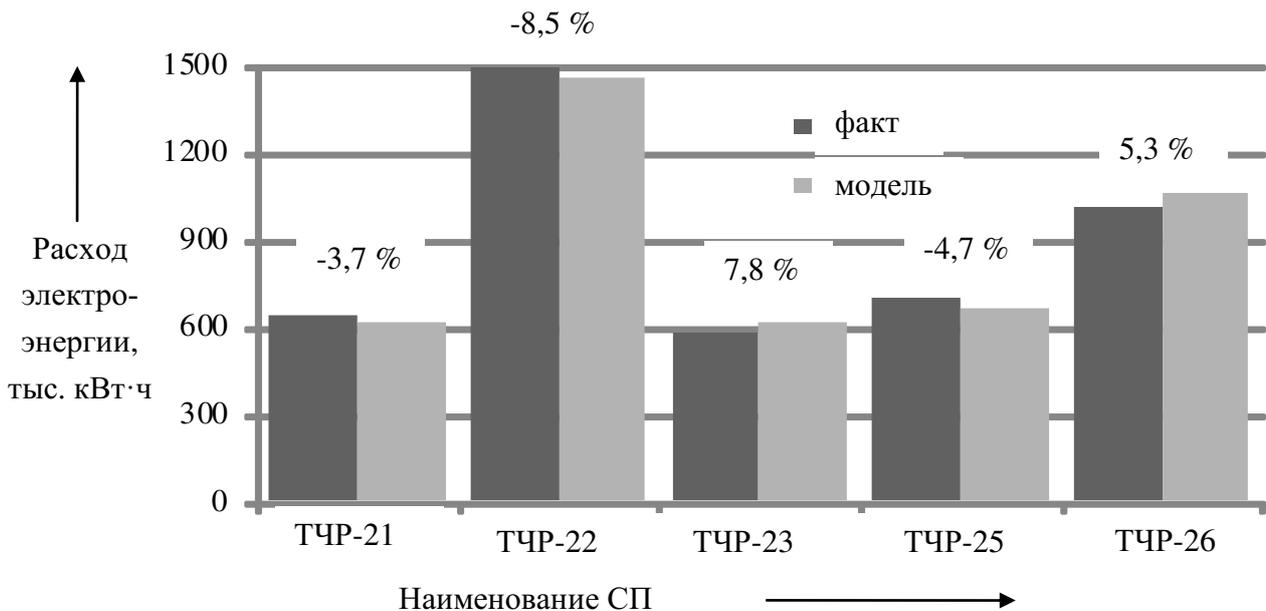


Рисунок 4.7 – Результаты планирования расхода электроэнергии для СП Южно-Уральской ТР на третий квартал 2011 г.

В целом при планировании расхода электроэнергии на третий квартал погрешности разработанной модели не превысили 8,5 %, а в основном составляют около 5 %. Результирующая ошибка за третий квартал в целом по ТР имеет удовлетворительное значение (-1,9 %).

В 2013 г. предложенные подходы использованы для планирования расхода электроэнергии следующих объектов: РП Депо Свердловской ж.д. и пост ЭЦ Сыропятское Западно-Сибирской ж.д. [215]. Параметры нейросетевых моделей приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Параметры нейросетевых моделей РП Депо Свердловской ж.д. и пост ЭЦ Сыропятское Западно-Сибирской ж.д.

Наименование СП	Тип активационной функции		Показатели точности согласно (3.11)		
	на входе	на выходе	K_T	MAPE	CV
РП Депо	сигмоидная	сигмоидная	1,920	6,58	0,031
ЭЦ Сыропятское	сигмоидная	радиально-симметричная	1,797	4,51	0,056

На основе указанных моделей выполнено посуточное планирование расхода электроэнергии в октябре 2013 г. График, иллюстрирующий изменение фактического и планируемого электропотребления в течение указанного периода, приведен на рисунке 4.8.

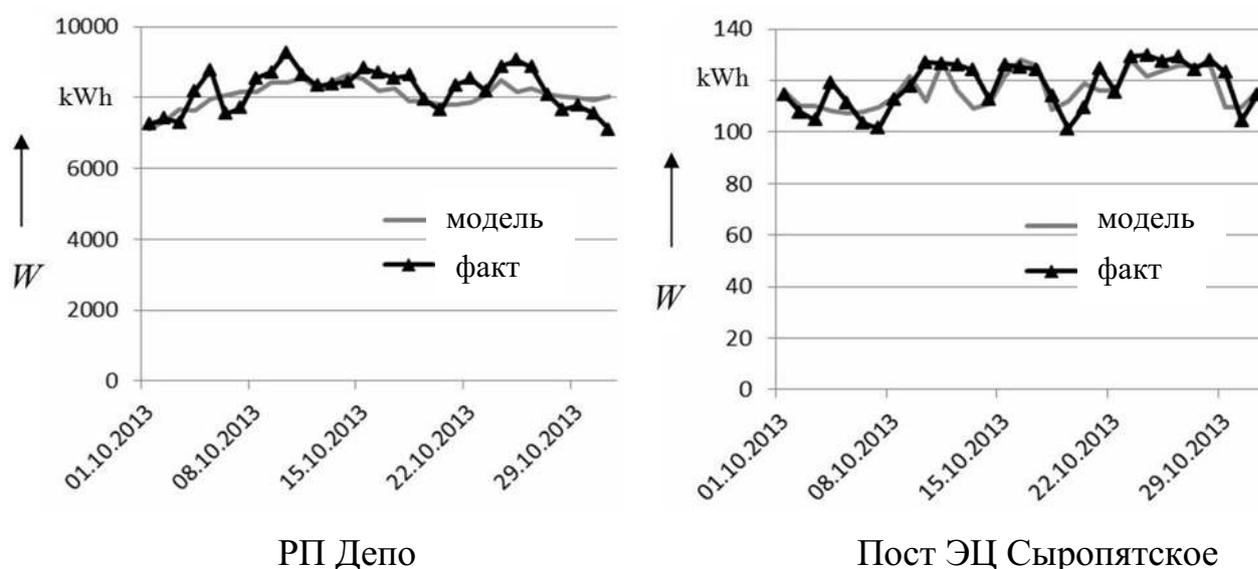


Рисунок 4.8 – Динамика фактического и планируемого расхода электроэнергии для объектов железнодорожного транспорта

Результаты апробации показывают, что средняя относительная погрешность для посуточного прогнозирования расхода электроэнергии не превышает 7 %, а в целом за месяц расхождение между планируемым и фактическим электропотреблением составило для РП Депо (-1,83) %, а для поста ЭЦ Сыропятское (-1,29) %, что является удовлетворительным результатом и позволяет рекомендовать предложенные методы для внедрения на сети железных дорог. Положительные результаты апробации подтверждаются актом об использовании результатов научных исследований и разработок в производстве (приложение Г).

4.3 Разработка методики определения обоснованного потенциала экономии топливно-энергетических ресурсов за счет реализации организационных мероприятий

В соответствии с действующей системой бюджетного управления ОАО «РЖД» Департаментом экономики ежегодно формируются задания по экономии ТЭР для филиалов, которые должны реализовываться за счет средств этих филиалов. По своему характеру эти значения представляют собой временной ряд вида $\mathcal{E}_t^{\text{OM}} = f(t)$, содержащий определенную тенденцию.

Анализ выборок заданий по экономии ТЭР по филиалам ОАО «РЖД» показал, что возможны три варианта тренда временных рядов.

Первый вариант – нисходящий тренд. В данном случае потенциал экономии \mathcal{E}^{OM} ежегодно снижается согласно линии тренда. Это объясняется тем, что потенциал экономии за счет собственных возможностей филиала постепенно исчерпывается.

Второй вариант – тренд отсутствует. В данном случае потенциал экономии ТЭР будет равен математическому ожиданию за предыдущие периоды. Очевидно, что такой филиал еще имеет резервы экономии.

Третий вариант – восходящий тренд. Это наиболее сложный для исследования случай, который свидетельствует о значительном потенциале экономии ТЭР; в то же время данный тренд не может продолжаться длительное время.

Реальный график изменения потенциала экономии ТЭР может включать в себя все три вышеперечисленных варианта (рисунок 4.9), характеризующиеся этапами активного внедрения организационных и малозатратных мероприятий силами филиала, постепенного исчерпания возможностей экономии и выхода на стабильный уровень энергопотребления.

В настоящее время практически все филиалы находятся на второй-третьей стадии графика, характеризующегося постепенным исчерпанием возможностей экономии ТЭР и выходом на стабильный уровень (рисунок 4.10).

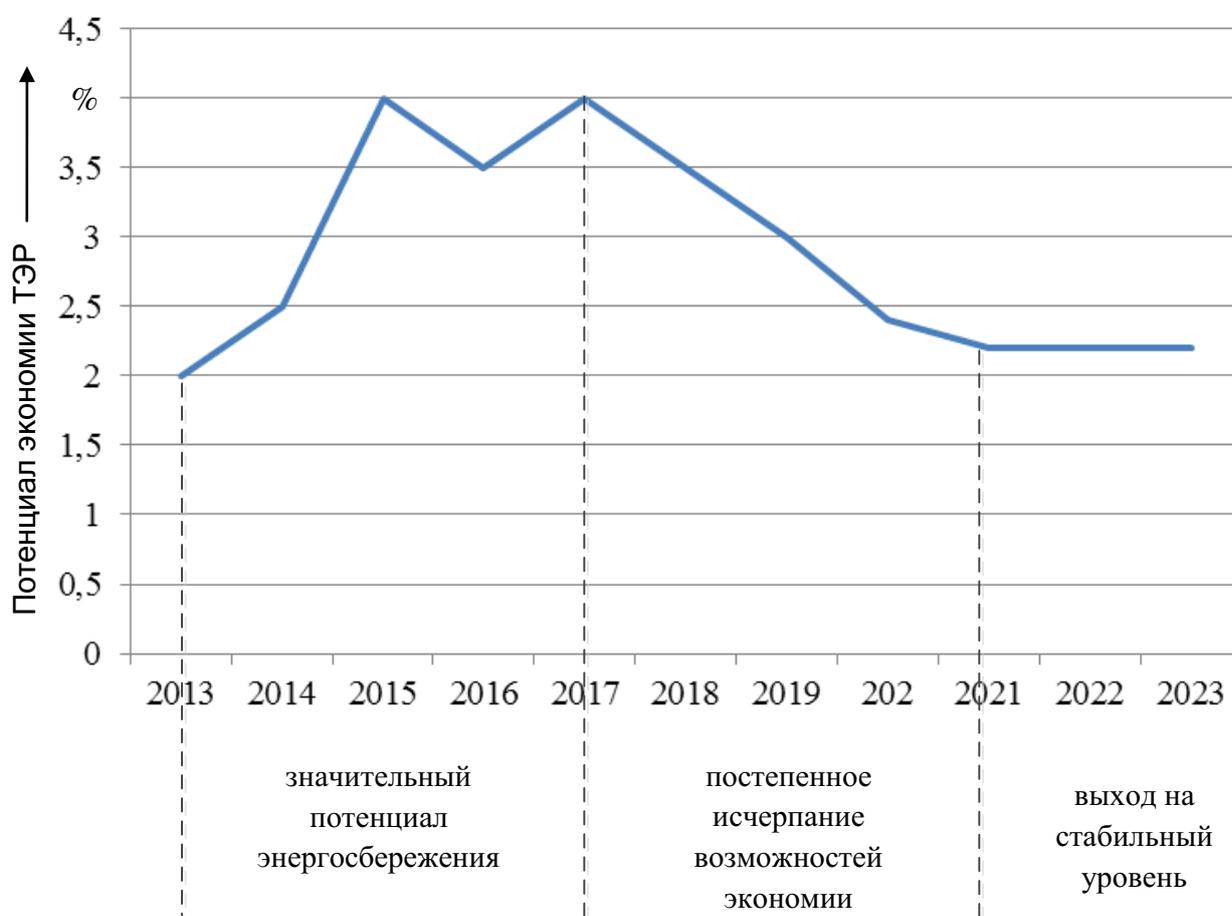


Рисунок 4.9 – Пример временного графика изменения потенциала экономии ТЭР

Определение обоснованного потенциала экономии на основании имеющейся статистики о заданиях по экономии ТЭР крайне затруднительно по следующим причинам:

1) реорганизация филиалов, объединение или реформирование, в результате чего статистика за предыдущие годы в отдельных случаях несопоставима;

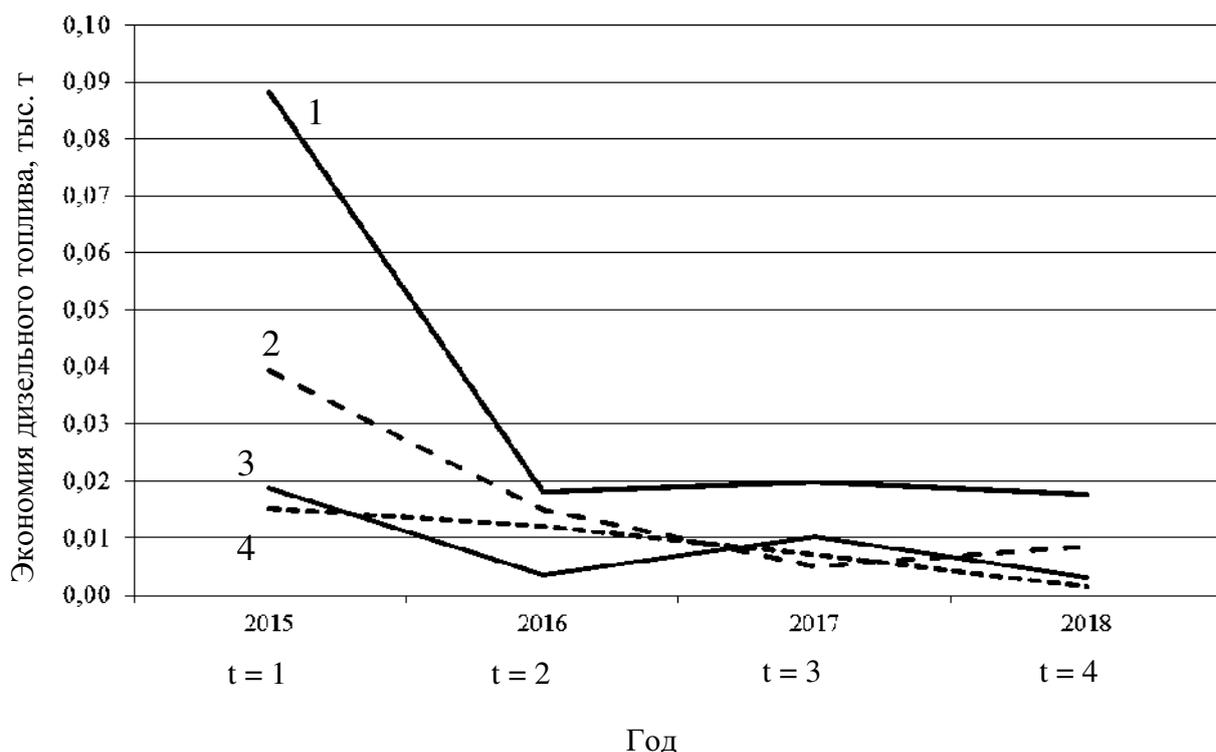


Рисунок 4.10 – Примеры временных рядов для заданий по экономии дизельного топлива: 1 – филиал А; 2 – филиал В; 3 – филиал С; 4 – филиал D

2) разделение в существующей отчетности значений экономии, получаемой за счет реализации ИПРС, инвестиционных проектов филиалов ОАО «РЖД» и организационных мероприятий, реализуемых за счет эксплуатационных средств текущего периода, произошло лишь с 2013 – 2014 гг., а за предыдущие годы такая статистика отсутствует;

3) в ряде случаев отдельные значения экономии ТЭР резко выделяются среди остальной выборки, что с точки зрения теории обработки результатов многократных наблюдений может трактоваться как промахи;

4) недостаточный объем имеющихся исходных данных, что не позволяет оценить закон распределения и сформировать надежную модель на основе одного из методов, рассмотренных в главе 3.

Кроме того, необходимо отметить, что определение заданий по экономии ТЭР для филиалов в большинстве случаев осуществляется с применением эвристических методов на основе экспертных оценок ответственных специалистов, что еще больше затрудняет использование этих данных для формирования моделей, основанных на ИНС, ННС или SVM. Таким образом, имеющаяся статистика

о заданиях по экономии ТЭР может являться лишь вспомогательной информацией для определения обоснованного потенциала экономии ТЭР за счет внедрения ОМ.

Предлагаемая методика ставит целью переход от эвристических методов определения обоснованного потенциала экономии ТЭР за счет внедрения ОМ к методам, основанным на совместном анализе следующих показателей:

- временные тенденции изменения заданий по экономии ТЭР;
- ввод или вывод из эксплуатации энергопотребляющего оборудования;
- потенциал экономии, достигаемый в результате реализации организационных и малозатратных мероприятий, разработанных по итогам последнего энергетического обследования филиала.

При этом полномочия по определению обоснованного потенциала экономии ТЭР за счет внедрения ОМ предлагается делегировать на уровень филиалов и СП в соответствии со вторым принципом предлагаемой методологии организации ресурсосберегающих производственных систем.

Сбор первичных исходных данных для оценки обоснованного потенциала экономии ТЭР осуществляется в соответствии с таблицей 4.10.

Расчет обоснованного потенциала экономии ТЭР осуществляется в три этапа.

1. Анализ временных тенденций изменения заданий по экономии ТЭР.

Для анализа временных тенденций изменения заданий по экономии ТЭР i -го вида ($\mathcal{E}_i^{\text{OM}}$) для филиала, внедряемых за счет эксплуатационных расходов, формируется выборка их значений за предшествующие планируемому периоды. На основе полученной выборки строится график временного ряда (пример приведен на рисунке 4.10); при этом по оси абсцисс откладывается порядковый номер периода ($t = 1, 2, 3$ и т.д.), а по оси ординат – значения заданий по экономии ТЭР i -го вида. Последнее значение номера периода t является значением в базовом периоде.

Следует отметить, что в силу разных причин выборка значений заданий по экономии ТЭР $\mathcal{E}_i^{\text{OM}}$ может содержать значения, существенно отличающихся от основной тенденции, что затрудняет аппроксимацию временного ряда $\mathcal{E}_i^{\text{OM}} = f(t)$.

Таблица 4.10 – Исходные данные для оценки обоснованного потенциала экономии ТЭР

№ п/п	Наименование показателя	Обозначение показателя	Единица измерения	Источник представления данных
1	2	3	4	5
1	Расход ТЭР i -го вида, в т.ч.:	W_i	–	Данные статистической отчетности форм ТХО-3, ТХО-4, 4-топливо, ЭО-10, ЭО-10у
	электроэнергия	$W_э$	млн. кВт·ч	
	дизельное топливо	$W_{дг}$	тыс. т	
	уголь	W_y	тыс. т	
	топочный мазут	$W_{тм}$	тыс. т	
	газ природный	$W_г$	тыс. куб. м	
	бензин автомобильный	$W_б$	тыс. т	
	тепловая энергия	$W_{тэ}$	тыс. Гкал	
2	Прогнозируемый расход ТЭР i -го вида вводимыми в эксплуатацию дополнительными мощностями:	–	соответ. ед. измерения	Акт ОС-1, техническая документация на оборудование, план изменения объемов работы филиала
	с учетом внедряемого инновационного оборудования	$W_{i \text{ ин. доп. мощ}}$		
	без учета внедряемого инновационного оборудования	$W_{i \text{ пр. доп. мощ}}$		
3	Прогнозируемый расход ТЭР i -го вида выводимыми из эксплуатации мощностями:	–	соответ. ед. измерения	Акт ОС-1, техническая документация на оборудование
	с учетом инновационного оборудования	$W_{i \text{ ин. вывод. мощ}}$		
	без учета инновационного оборудования	$W_{i \text{ пр. вывод. мощ}}$		
4	Задание по экономии ТЭР i -го вида от реализации организационных мероприятий, внедряемых за счет эксплуатационных расходов филиалов ОАО РЖД»	$\mathcal{E}_i^{\text{ОМ}}$	соответ. ед. измерения	Протокол заседания правления ОАО «РЖД», АИС «Энергоэффективность»

Продолжение таблицы 4.10

1	2	3	4	5
5	Потенциал экономии i -го вида ТЭР, достигаемый в результате реализации организационных и малозатратных мероприятий, разработанных по итогам последнего энергетического обследования, рассчитанный на весь срок действия энергетического паспорта или программы энергосбережения и повышения энергоэффективности	$\mathcal{E}_i^{\text{ЭО}}$	соответ. ед. измерения	Энергетический паспорт, программа энергосбережения и повышения энергоэффективности филиала
6	Планируемая экономия ТЭР i -го вида от реализации мероприятий инвестиционного проекта «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте»	$\mathcal{E}_i^{\text{ИПРС}}$	соответ. ед. измерения	Форма «Сводные данные об экономии ресурсов от реализации инвестиционного проекта «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте», формируемая ЦТЕХ
7	Ожидаемая экономия ТЭР i -го вида за планируемый период, достигаемая в результате реализации мероприятий, внедряемых в рамках инвестиционных программ филиалов	$\mathcal{E}_i^{\text{ИПФ}}$	соответ. ед. измерения	Информация, предоставляемая филиалами в свободной форме
8	Дополнительный потенциал экономии ТЭР i -го вида в планируемом периоде, выявленный по итогам комиссионных проверок.	$\mathcal{E}_i^{\text{пров.}}$	соответ. ед. измерения	Протоколы проверок

К числу основных причин появления в указанной выборке таких значений можно отнести незапланированную корректировку бюджета филиала ОАО «РЖД» в силу различных экономических обстоятельств, необходимость решения установленных Правлением ОАО «РЖД» бюджетных задач, выявление дополнительного потенциала экономии ТЭР в результате проверок Желдораудита, Желдорконтроля, комиссионного осмотра начальника дороги и т.п.

Для устранения влияния промахов целесообразно применять специальные методы.

Рассмотрим несколько методов на примере Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом (ЦМ) при оценке заданий по экономии ТЭР на 2018 год: метод экспоненциального сглаживания, метод Боллинджера, метод Романовского.

Выбор того или иного метода для дальнейшего использования предлагается осуществлять с учетом анализа следующих показателей:

1. Индекс детерминации R^2 , который показывает степень близости аппроксимирующей кривой $f(t)$ к выборке $\mathcal{E}_t^{\text{OM}}$ после устранения промахов. Данный коэффициент должен стремиться к 1. Порядок расчета индекса детерминации приведен ниже в формуле (4.25) [239].

2. Наблюдаемое значение критерия Вилкоксона Z , которое показывает степень близости выборок $\mathcal{E}_t^{\text{OM}}$ до и после устранения промахов. Чем меньше данное значение, тем ближе находятся выборки друг к другу. Выбор непараметрического критерия обусловлен тем, что число наблюдений в выборках невелико, в результате чего невозможно определить их закон распределения.

Другими словами, в ходе устранения промахов необходимо добиться максимального индекса детерминации R^2 при минимальном значении Z .

Критерий Вилкоксона, который служит для определения изменения относительной частоты выборок, основан на нахождении статистики W , которая определяется через сумму рангов $\mathcal{E}_t^{\text{OM}}$ до устранения R_1 и после устранения промахов R_2 относительно общего вариационного ряда $\mathcal{E}_t^{\text{OM}}$ [243]:

$$\begin{cases} w_1 = nm + \frac{n(n+1)}{2} - R_1; \\ w_2 = nm + \frac{m(m+1)}{2} - R_2; \\ W = \min(w_1, w_2). \end{cases} \quad (4.7)$$

Наблюдаемое значение критерия Вилкоксона определяется по формуле:

$$Z = \frac{W - \frac{1}{2}nm}{\sqrt{\frac{1}{12}nm(n+m+1)}}, \quad (4.8)$$

где m, n – объем выборок значений $\mathcal{E}_t^{\text{OM}}$ до устранения и после устранения промахов соответственно.

Метод экспоненциального сглаживания. Экспоненциальное скользящее среднее (*Exponential Moving Average, EMA*) относится к частному случаю метода взвешенного скользящего среднего в тех случаях, когда последним значениям из статистической выборки придается больший вес.

Скорректированное значение экспоненциального скользящего среднего в расчетный период времени t определяется по выражению:

– для первого значения выборки

$$\mathcal{E}_{EMA_t}^{\text{OM}} = \alpha \cdot \mathcal{E}_t^{\text{OM}} + (1 - \alpha) \cdot \mathcal{E}_{EMA(t)}^{\text{OM}}, \quad (4.9)$$

– для второго и последующих значений выборки

$$\mathcal{E}_{EMA_t}^{\text{OM}} = \alpha \cdot \mathcal{E}_t^{\text{OM}} + (1 - \alpha) \cdot \mathcal{E}_{EMA(t-1)}^{\text{OM}}, \quad (4.10)$$

где α – весовой коэффициент в интервале от 0 до 1, отражающий скорость изменения значений выборки: чем выше его значение, тем больший удельный вес имеют новые наблюдения случайной величины, и тем меньший старые.

Следует отметить, что коэффициент α не является расчётным значением, а гиперпараметром, т. е. определяется путем его подбора с одновременным анали-

зом среднеквадратического отклонения фактического от скорректированного значения.

В качестве основного недостатка данного метода следует отметить то, что в результате корректировки все полученные значения будут отличаться от исходных данных, тем самым внося погрешность в прогнозное значение.

В качестве примера на рисунке 4.11 приведены результаты определения прогнозного значения экономии электроэнергии с использованием метода *ЕМА* для ЦМ на 2018 год.

Как видно из рисунка 4.11, кривые 2 и 3 выглядят более сглаженными, и в этом случае соответствующие коэффициенты детерминации имеют значения, приближенные к единице. Однако значения Z оказались достаточно большими (0,73 и 1,46 соответственно), что подтверждает тот факт, что при использовании данного метода скорректированная выборка существенно отличается от исходной.

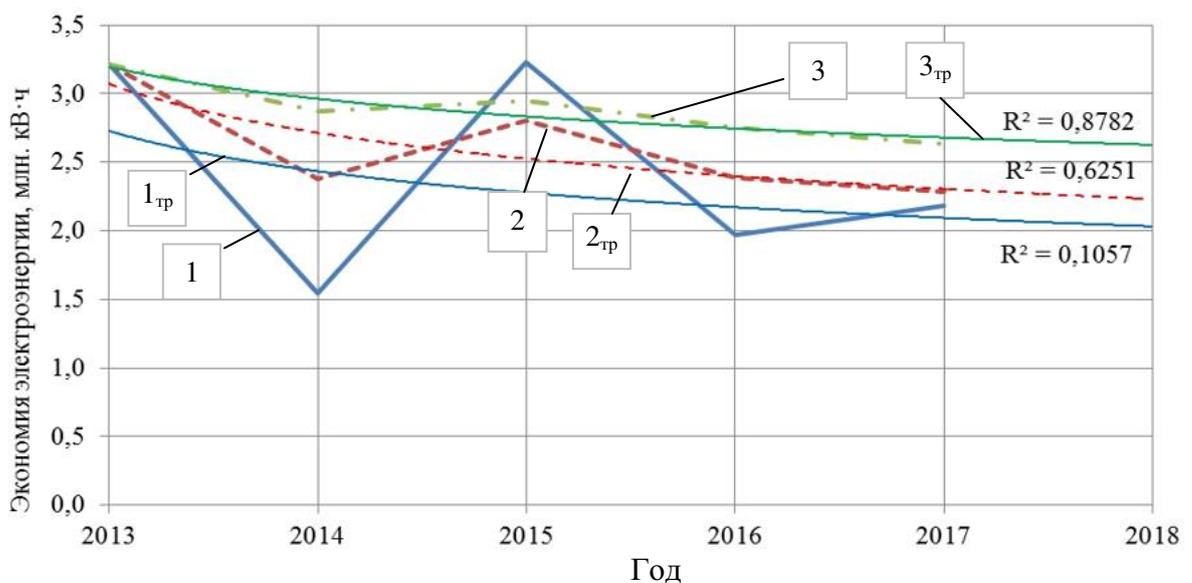


Рисунок 4.11 – Пример применения метода *ЕМА*:

1 – фактическая экономия; 2 – кривая *ЕМА* при $\alpha = 0,5$; 3 – кривая *ЕМА* при $\alpha = 0,8$ $1_{тр}$, $2_{тр}$, $3_{тр}$ – линии тренда для кривых 1, 2, 3 соответственно

Метод Боллинджера. Данный метод широко применяется в экономике, в частности, при анализе временных трендов на фондовых, товарных и срочных рынках. Согласно ему промахом можно считать значения, отклоняющиеся от ап-

проксимирующей кривой на определенную величину, связанную со средним квадратическим отклонением (СКО). При этом в различных источниках рекомендовано использовать удвоенное СКО [244]. При применении данного метода в решаемой задаче корректировке при необходимости могут подлежать второе и последующие значения выборки согласно следующему порядку.

Рассчитывается среднее арифметическое значение:

$$\overline{\mathcal{E}}^{\text{OM}} = \frac{\sum_{t=1}^n \mathcal{E}_t^{\text{OM}}}{n} \quad (4.11)$$

и среднее квадратическое отклонение выборки:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n^*} (\mathcal{E}_t^{\text{OM}} - \overline{\mathcal{E}}^{\text{OM}})^2}{n-1}}. \quad (4.12)$$

Вычисляется расхождение между фактическим значением выборки и трендовым значением для каждого второго и последующего значения $\mathcal{E}_t^{\text{OM}}$:

$$\Delta_t = \left| \mathcal{E}_t^{\text{OM}} - \mathcal{E}_1^{\text{OM}} T_{\text{cp}[1;n]}^{t-1} \right|, \quad (4.13)$$

где $T_{\text{cp}[1;n]}$ – среднегодовой темп изменения заданий по экономии ТЭР за период $t = [1;n]$:

$$T_{\text{cp}[1;n]} = \sqrt[n-1]{\frac{\mathcal{E}_n^{\text{OM}}}{\mathcal{E}_1^{\text{OM}}}}. \quad (4.14)$$

Если выполняется неравенство:

$$\Delta_t > 2\sigma, \quad (4.15)$$

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

В этом случае его заменяют трендовым значением:

$$\mathcal{E}_t^{\text{OM}} = \mathcal{E}_1^{\text{OM}} T_{\text{cp}[1;n]}^{t-1}. \quad (4.16)$$

Пример определения прогнозного значения экономии электроэнергии с использованием метода Боллинджера приведен на рисунке 4.12.

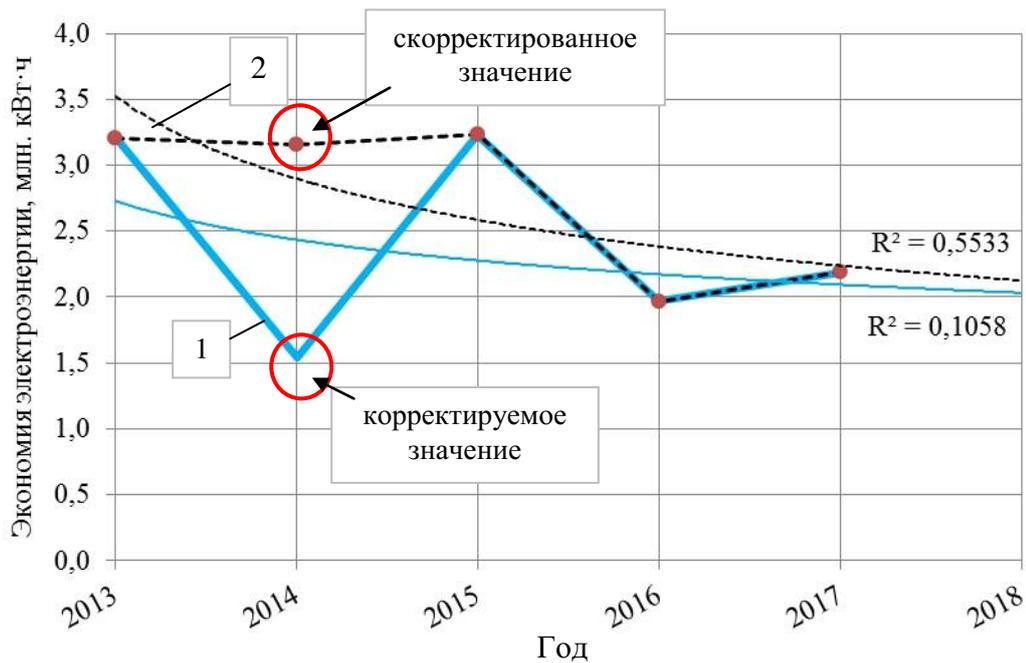


Рисунок 4.12 – Пример применения метода Боллинджера:

1 – фактическая экономия; 2 – кривая после корректировки методом Боллинджера

Как видно из рисунка 4.12, коэффициент детерминации для данного метода составил 0,553, что меньше, чем при методе ЕМА. При этом следует отметить, что корректировке подлежало только второе значение исходной выборки, что делает скорректированный тренд более схожим с фактическими данными заданий по экономии ($Z = 0,36$).

Метод Романовского. В основу метода заложен принцип проверки корректности полученной выборки на предмет наличия грубых погрешностей (промахов). Учитывая тот факт, что количество рассматриваемых в выборке периодов не более 20, в качестве инструмента проверки целесообразно применять критерий Романовского [188].

Корректировка значений фактической экономии выполняется следующим образом. Из исходной выборки удаляется сомнительное значение \mathcal{E}^{OM*} , и для полученной выборки по формулам (4.11) и (4.12) рассчитывается среднее арифмети-

ческое значение ($\overline{\mathcal{E}}^{OM*}$) и среднее квадратическое отклонение выборки (σ^*) с учетом того, что при расчете в качестве n принимается n^* т.е. количество значений в выборке без учета промахов. Далее определяется расчетное значение критерия Романовского по выражению:

$$\beta = \frac{|\mathcal{E}^{OM*} - \overline{\mathcal{E}}^{OM*}|}{\sigma^*}. \quad (4.17)$$

Полученное значение сравнивается с табличным критическим значением критерия Романовского $\beta_{кр}$, зависящим от принятой доверительной вероятности.

Если $\beta > \beta_{кр}$, то \mathcal{E}_i^{OM*} является промахом. В этом случае его следует заменить другим значением, которое определяется как среднее арифметическое между соседними значениями:

$$\mathcal{E}_i^{OM} = \frac{\mathcal{E}_{(t-1)}^{OM} + \mathcal{E}_{(t+1)}^{OM}}{2}. \quad (4.18)$$

Пример применения критерия Романовского для определения прогнозных значений экономии электроэнергии приведен на рисунке 4.13.

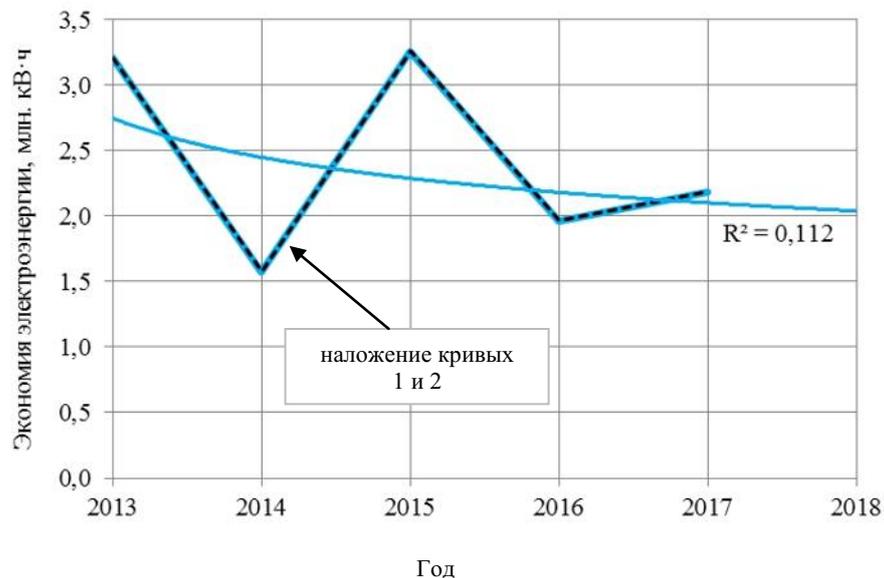


Рисунок 4.13 – Пример применения критерия Романовского:

1 – фактические задания по экономии ТЭР; 2 – скорректированный тренд

Как видно из рисунка 4.13, при оценке наличия промахов по критерию Романовского корректировка фактической кривой при оценке потенциала экономии

электроэнергии для ЦМ выполняться не будет. Данный метод целесообразно использовать при наличии значений, резко отличающиеся от линии тренда (как правило, более утроенного значения СКО). Представленный метод является менее чувствительным, чем методы экспоненциального сглаживания и Боллинджера.

Таким образом, применение различных методов устранения промахов в выборке заданий по экономии ТЭР позволяет существенно повысить коэффициент детерминации и, тем самым, улучшить точность математических моделей, описывающих временные тенденции изменения данного показателя.

Из числа рассмотренных методов наилучшие результаты демонстрирует метод Боллинджера, который позволяет достичь приемлемых значений индекса детерминации (0,5533) при сравнительно небольших изменениях исходной выборки ($z = 0,36$) [245]. Указанный метод был рекомендован для использования при разработке «Порядка формирования заданий филиалам ОАО «РЖД» по экономии топливно-энергетических ресурсов на нетяговые нужды».

По внешнему виду временной тенденции изменения заданий по экономии ТЭР следует определить аппроксимирующую функцию $\Xi_i^{OM} = f(t)$. В качестве аппроксимирующих функций рассматриваются степенная, логарифмическая и экспоненциальная.

Степенная линия тренда дает наибольшую сходимость, если значения исследуемой зависимости характеризуются постоянным изменением скорости роста при отсутствии в статистической выборке нулевых или отрицательных значений.

Аппроксимация тренда степенной функцией имеет вид:

$$\Xi_{ii}^{OM} = \alpha \cdot t^{\beta}, \quad (4.19)$$

где α и β – коэффициенты аппроксимирующей функции.

Для решения задачи аппроксимации необходимо прибегнуть к линеаризации функции (4.21), для чего требуется прологарифмировать левую и правую часть указанной функции с применением натурального логарифма \ln . Затем для

определения коэффициентов α и β решается система уравнений относительно $\ln \alpha$ и β :

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^n \ln \Theta_{it}^{\text{OM}} = n \cdot \ln \alpha + \beta \cdot \sum_{t=1}^n \ln t, \\ \sum_{t=1}^n (\ln \Theta_{it}^{\text{OM}} \cdot \ln t) = \ln \alpha \cdot \sum_{t=1}^n \ln t + \beta \cdot \sum_{t=1}^n (\ln t)^2 \end{cases} \quad (4.20)$$

Значения $\ln \alpha$ и β находится непосредственно из системы уравнений (4.20), а α определяется по формуле $\alpha = e^{\ln \alpha}$.

Логарифмическая линия тренда применяется при моделировании характеристик, значения которых вначале быстро меняются, а затем постепенно стабилизируются.

Аппроксимация тренда логарифмической функцией имеет вид:

$$\Theta_{it}^{\text{OM}} = \alpha + \beta \cdot \ln t. \quad (4.21)$$

Для определения коэффициентов α и β решается система уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^n \Theta_{it}^{\text{OM}} = n \cdot \alpha + \beta \cdot \sum_{t=1}^n \ln t, \\ \sum_{t=1}^n (\Theta_{it}^{\text{OM}} \cdot \ln t) = \alpha \cdot \sum_{t=1}^n \ln t + \beta \cdot \sum_{t=1}^n \ln t^2. \end{cases} \quad (4.22)$$

Экспоненциальную линию тренда следует использовать в том случае, если скорость изменения данных непрерывно возрастает.

Аппроксимация тренда экспоненциальной функцией имеет вид:

$$\Theta_{it}^{\text{OM}} = \alpha e^{\beta t}. \quad (4.23)$$

Для определения коэффициентов α и β решается система уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^n \ln \Theta_{it}^{\text{OM}} = n \cdot \ln \alpha + \beta \cdot \sum_{t=1}^n t, \\ \sum_{t=1}^n (\ln \Theta_{it}^{\text{OM}} \cdot t) = \ln \alpha \cdot \sum_{t=1}^n t + \beta \cdot \sum_{t=1}^n t^2. \end{cases} \quad (4.24)$$

Выбор аппроксимирующей функции определяется наибольшим значением индекса детерминации, определяемым по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (\mathcal{E}_{it}^{\text{OM}} - \mathcal{E}_{it}^{\text{OM аппр}})^2}{\sum_{t=1}^n (\mathcal{E}_{it}^{\text{OM}} - \mathcal{E}_{i \text{cp}}^{\text{OM}})^2}, \quad (4.25)$$

где $\mathcal{E}_{it}^{\text{OM аппр}}$ – задание по экономии ТЭР i -го вида за предшествующий планируемому период t , рассчитанное в соответствии с принятой функцией;

$\mathcal{E}_{i \text{cp}}^{\text{OM}}$ – среднее арифметическое значение выборки, полученной после устранения промахов.

2. Анализ потенциала экономии ТЭР, достигаемого в результате реализации организационных и малозатратных мероприятий, разработанных по итогам последнего энергетического обследования

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 по итогам энергетического обследования, за предшествующие планируемому временные периоды

При разделении суммарного потенциала экономии ТЭР i -го вида ($\mathcal{E}_i^{\text{ЭО}}$), определяемого по результатам энергетического обследования, на периоды $t = 1, 2, \dots, n$ принимается допущение о том, что темпы изменения данного показателя совпадают с темпами изменения заданий по экономии ТЭР i -го вида.

Тогда расчетное значение потенциала экономии ТЭР i -го вида, определяемого по результатам энергетического обследования, за период $t = 1$ определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{i1}^{\text{ЭО}} = \frac{\mathcal{E}_i^{\text{ЭО}}}{\sum_{j=0}^{n-1} (T_{i \text{cp}[1;n]})^j}. \quad (4.26)$$

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

$$\mathcal{E}_{it}^{\text{ЭО}} = \mathcal{E}_{i(t-1)}^{\text{ЭО}} \cdot T_{\text{исп}[1;n]}, \quad (4.27)$$

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 $\mathcal{E}_i^{\text{ЭО}}$, рассчитанных по формулам (4.26) и (4.27), определяется аппроксимирующая функция $\mathcal{E}_i^{\text{ЭО}} = f(t)$, тип которой должен совпадать с функцией, выбранной для заданий по экономии ТЭР.

3. Расчет плановых значений потенциала экономии ТЭР

Плановые значения $\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}}$ и $\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}}$ определяются путем подстановки в аппроксимирующие функции $\mathcal{E}_i^{\text{ЭО}} = f(t)$ и $\mathcal{E}_i^{\text{ЭО}} = f(t)$ значения t , соответствующего планируемому периоду ($t = n + 1$).

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

$$\mathcal{E}_{i(n+1)\text{пот}}^{\text{ЭО}} = k_{\text{корр}} \cdot \frac{\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}} + \mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}}}{2}. \quad (4.28)$$

Значения корректирующего коэффициента определяются Департаментом экономики исходя из стратегии ОАО «РЖД» по достижению целевых показателей экономии ТЭР в следующем диапазоне:

$$\frac{2 \times \min(\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}}, \mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}})}{\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}} + \mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}}} \leq k_{\text{корр}} \leq \frac{2 \times \max(\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}}, \mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}})}{\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}} + \mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}}}, \quad (4.29)$$

где $\min(\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}}, \mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ОМ}})$, – минимальное и максимальное значения соответствующих показателей.
 $\max(\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ЭО}}, \mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ОМ}})$

В случае планируемого ввода в эксплуатации дополнительных мощностей или вывода мощностей из эксплуатации, а также при наличии документально подтвержденного дополнительного потенциала экономии ТЭР, выявленного в результате комиссионных проверок, определяется скорректированный потенциал экономии ТЭР на расчетный период:

$$\mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ОМ}} \text{ пот. скор} = \mathcal{E}_{i(n+1)}^{\text{ОМ}} \text{ пот} \left(1 + \frac{W_{i \text{ пр. доп. мощ}} - W_{i \text{ пр. вывод. мощ}}}{W_{i \text{ расход}}^{\text{баз. (I-III)}} + W_{i \text{ расход}}^{\text{баз. IV}}} \right) + \mathcal{E}_{i \text{ пров}}, \quad (4.30)$$

где $W_{i \text{ пр. доп. мощ}}$ – прогнозируемый расход ТЭР i -го вида в планируемом периоде от ввода в эксплуатацию дополнительных мощностей без учета внедряемого инновационного оборудования;

$W_{i \text{ пр. вывод. мощ}}$ – прогнозируемый расход ТЭР i -го вида в планируемом периоде выводимыми из эксплуатации мощностей без учета инновационного оборудования;

$W_{i \text{ расход}}^{\text{баз. (I-III)}}$ – фактический расход ТЭР i -го вида в I-III кварталах базового года по данным соответствующей статистической отчетности;

$W_{i \text{ расход}}^{\text{баз. IV}}$ – прогнозируемый расход ТЭР i -го вида в IV квартале базового года;

$\mathcal{E}_{i \text{ пров}}$ – дополнительный потенциал экономии ТЭР i -го вида в планируемом периоде, выявленный по итогам комиссионных проверок.

Увеличение расхода ТЭР в результате ввода дополнительных мощностей возможно в следующих случаях:

- 1) передача объектов (за исключением инновационного оборудования) от других филиалов, реорганизация и т.д.;
- 2) планируемое увеличение объема работ филиала;

3) внедрение инновационного оборудования, новой техники, ввод в действие новых объектов и т.п.

4) передача инновационного оборудования на баланс других филиалов.

В составе $W_{i\text{ пр. доп. мощ}}$ следует учитывать только те дополнительные мощности, которые относятся к подпунктам 1) и 2) настоящего пункта. В этих случаях формируется дополнительное задание по экономии ТЭР.

Уменьшение расхода ТЭР в результате вывода мощностей возможно в следующих случаях:

1) передача объектов (за исключением инновационного оборудования) другим филиалам, консервация, вывод на аутсорсинг и т.д.;

2) планируемое уменьшение объема работ филиала;

3) передача инновационного оборудования другим филиалам.

В составе $W_{i\text{ пр. вывод. мощ}}$ следует учитывать только те выводимые мощности, которые относятся к подпунктам 1) и 2). Задание по экономии ТЭР в этих случаях уменьшается.

В целях автоматизации расчетов обоснованного потенциала экономии ТЭР за счет реализации ОМ разработано электронное приложение в программе Microsoft Excel «Расч таблица_Потенциал экономии от ОМ.xls» (далее – Расчетная таблица), с применением которого на основе выражений (4.11) – (4.30) определены расчетные значения потенциала экономии ТЭР для Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом на 2018 год.

Для ввода исходных данных используются вкладки «Исх.ЭЭ», «Исх.ДТ» и т.д. Расчетной таблицы. К ним относятся:

планируемый период;

порядковый номер года по энергопаспорту;

расход ТЭР в базовом году;

ввод дополнительных мощностей в планируемом периоде (в том числе ввод инновационного оборудования);

вывод из эксплуатации мощностей в планируемом периоде (в том числе вывод инновационного оборудования);

ожидаемая экономия от инвестиционных проектов;

задания по экономии за счет организационных мероприятий, за предшествующие планируемому периоды;

потенциал экономии по данным энергоаудита;

потенциал экономии по итогам проверок.

Ячейки, которые необходимо заполнить в Расчетной таблице, выделены бледно-розовым цветом.

Результаты формирования исходных данных приведены на рисунке 4.14.

Анализ временных тенденций выполняется автоматически с применением Расчетной таблицы на основе имеющихся исходных данных и включают в себя следующие основные этапы:

- 1) анализ и устранение промахов в выборке;
- 2) построение аппроксимирующих функций и выбор наилучшей из них по критерию индекса детерминации;
- 3) построение графических зависимостей.

Для построения графических зависимостей необходимо в соответствующем листе Расчетной таблицы выделить одну из ячеек в строчке, соответствующей рассматриваемому подразделению, и нажать кнопку «График».

В результате в последней вкладке «График» будет построена диаграмма временных трендов, которая содержит следующую информацию:

- 1) фактические задания по экономии ТЭР за предыдущие периоды (факт. задания по экономии, фиолетовая линия);
- 2) скорректированные после устранения промахов задания по экономии ТЭР (задания по экономии скорр., темно-зеленая линия);
- 3) аппроксимирующая тренд ОМ функция (степенная (задания по экономии скорр.), темно-зеленая штриховая линия);

№	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Q	R	S	T	U	V	W	X	
1						Расчетная таблица по оценке задания экономии электроэнергии на нетяговые нужды в ____ году																	
2																							
3	Планируемый период	2018	год		График																		
4	Порядковый номер года по энергопаспорту	5	(от 1 до 5)																				
7						млн. кВт·ч																	
8	Филиал (структурные подразделения)	Расход в базовом году		Ввод дополнительных мощностей в планируемом периоде		Вывод из эксплуатации мощностей в планируемом периоде		Ожидаемая экономия от инвест. проектов, в том числе:		Задания по экономии за счет организационных мероприятий, за предшествующие планируемому периоды					Потенциал экономии по данным энергоаудита	Потенциал экономии по итогам проверок на:	Потенциал экономии по тренду ОМ на:	Потенциал экономии по тренду ЭО на:	Коэффициент			Потенциал экономии от ОМ на:	
9		2017		2018		2018		2018		2013	2014	2015	2016	2017	$\sum_{2017}^{2018} \Delta_{\text{ЭО}}$	2018	2018	2018	k _{min}	k _{max}	k _{корр}	2018	
10	$W_{\text{ЭЭС}}^{\text{ЭЭС}}$	$W_{\text{ЭЭС}}^{\text{ЭЭС}}$	$W_{\text{Доп.Мощ.}}$	в т.ч. инноваци-ые	$W_{\text{Вывод.Мощ.}}$	в т.ч. инноваци-ые	$\Delta_{\text{ИПС}}$	$\Delta_{\text{ИПФ}}$	$\Delta_{\text{ЭО}}^{\text{ЭО}}$	$\Delta_{\text{ЭО}}^{\text{ЭО}}$	$\Delta_{\text{ЭО}}^{\text{ЭО}}$	$\Delta_{\text{ЭО}}^{\text{ЭО}}$	$\Delta_{\text{ЭО}}^{\text{ЭО}}$	$\Delta_{\text{ЭО}}^{\text{ЭО}}$								$\Delta_{\text{ЭО}}^{\text{ЭО}}$	$\Delta_{\text{ЭО}}^{\text{ЭО}}$
89	ЦМ	41,916	22,258	2,079	0,011	0,226	0,000	0,000	0,000	3,209	1,574	3,262	1,967	3,012	4,653	0,000	2,591	0,907	0,519	1,481	1,000	1,799	

а

№	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Q	R	S	T	U	V	W	X	
1						Расчетная таблица по оценке задания экономии дизельного топлива на нетяговые нужды в ____ году																	
2																							
3	Планируемый период	2018	год		График																		
4	Порядковый номер года по энергопаспорту	5	(от 1 до 5)																				
7						тыс. т																	
8	Филиал	Расход в базовом году		Ввод дополнительных мощностей в планируемом периоде		Вывод из эксплуатации мощностей в планируемом периоде		Ожидаемая экономия от инвест. проектов, в том числе:		Задания по экономии, за счет организационных мероприятий, за предшествующие планируемому периоды					Потенциал экономии по данным энергоаудита	Потенциал экономии по итогам проверок на:	Потенциал экономии по тренду ОМ на:	Потенциал экономии по тренду ЭО на:	Коэффициент			Потенциал экономии от ОМ на:	
9		2017		2018		2018		2018		2013	2014	2015	2016	2017	0,4793	0	0,2721	0,0656	0,389	1,611	1,290	2018	
89	ЦМ	5,9431	2,2734	0,1246	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1300	0,1600	0,4529	0,3999	0,2672								0,2211	

б

№	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Q	R	S	T	U	V	W	X	
1						Расчетная таблица по оценке задания экономии бензина на нетяговые нужды в ____ году																	
2																							
3	Планируемый период	2018	год		График																		
4	Порядковый номер года по энергопаспорту	5	(от 1 до 5)																				
7						тыс. т																	
8	Филиал	Расход в базовом году		Ввод дополнительных мощностей в планируемом периоде		Вывод из эксплуатации мощностей в планируемом периоде		Ожидаемая экономия от инвест. проектов, в том числе:		Задания по экономии, за счет организационных мероприятий, за предшествующие планируемому периоды					Потенциал экономии по данным энергоаудита	Потенциал экономии по итогам проверок на:	Потенциал экономии по тренду ОМ на:	Потенциал экономии по тренду ЭО на:	Коэффициент			Потенциал экономии от ОМ на:	
9		2017		2018		2018		2018		2013	2014	2015	2016	2017	0,0850	0,0000	0,0085	0,0082	0,981	1,019	1,000	2018	
89	ЦМ	0,2735	0,0938	0,0063	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0500	0,0500	0,0151	0,0178	0,0140								0,0085	

в

Рисунок 4.14, лист А – Исходные данные для расчета потенциала экономии от ОМ

№	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Q	R	S	T	U	V	W	X	
1																							
2						Расчетная таблица по оценке задания экономии мазута на нетяговые нужды в _____ году																	
3	Планируемый период	2018	год																				
4	Порядковый номер года по энергопаспорту	5	(от 1 до 5)	График																			
7						тыс. т																	
8	Финнал	Расход в базовом году		Ввод дополнительных мощностей в планируемом периоде		Вывод из эксплуатации мощностей в планируемом периоде		Ожидаемая экономия от инвест. проектов, в том числе:		Задания по экономии, за счет организационных мероприятий, за предшествующие планируемому периоды					Потенциал экономии по данным энергоаудита	Потенциал экономии по итогам проверок на:	Потенциал экономии по тренду ОМ на:	Потенциал экономии по тренду ЭО на:	Коэффициент			Потенциал экономии от ОМ на:	
9		2017		2018		2018		2018		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2018	2018	2018				2018	
10		$W_{\text{баз}}^{\text{экоэф}}$	$W_{\text{факт}}^{\text{экоэф}}$	$W_{\text{дод.мощ.}}$	в т.ч. инновационные	$W_{\text{вывод.мощ.}}$	в т.ч. инновационные	$\Sigma \text{ИПРС}_{\text{м}}$	$\Sigma \text{ИПФ}_{\text{м}}$	$\Sigma_{\text{м}(-4)}^{\text{ОМ}}$	$\Sigma_{\text{м}(-3)}^{\text{ОМ}}$	$\Sigma_{\text{м}(-2)}^{\text{ОМ}}$	$\Sigma_{\text{м}(-1)}^{\text{ОМ}}$	$\Sigma_{\text{м}(0)}^{\text{ОМ}}$	$\Sigma_{\text{м}}^{\text{ЭО}}$	$\Sigma_{\text{пр.}}^{\text{ЭО}}$	2018	2018	2018	k_{min}	k_{max}	$k_{\text{кор}}$	$\Sigma_{\text{м}(-4)}^{\text{ОМ}}$
89	ЦМ	0,03003	0,06380	0,07781	0,07781	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00500	0,01600	0,02335	0,00314	0,00126	0,02620	0,00000	0,00223	0,00240	0,963	1,037	1,000	0,00231	

Г

№	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Q	R	S	T	U	V	W	X	
1																							
2						Расчетная таблица по оценке задания экономии природного газа на нетяговые нужды в _____ году																	
3	Планируемый период	2018	год																				
4	Порядковый номер года по энергопаспорту	5	(от 1 до 5)	График																			
7						тыс. м куб																	
8	Финнал	Расход в базовом году		Ввод дополнительных мощностей в планируемом периоде		Вывод из эксплуатации мощностей в планируемом периоде		Ожидаемая экономия от инвест. проектов, в том числе:		Задания по экономии, за счет организационных мероприятий, за предшествующие планируемому периоды					Потенциал экономии по данным энергоаудита	Потенциал экономии по итогам проверок на:	Потенциал экономии по тренду ОМ на:	Потенциал экономии по тренду ЭО на:	Коэффициент			Потенциал экономии от ОМ на:	
9		2017		2018		2018		2018		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2018	2018	2018				2018	
10		$W_{\text{баз}}^{\text{экоэф}}$	$W_{\text{факт}}^{\text{экоэф}}$	$W_{\text{дод.мощ.}}$	в т.ч. инновационные	$W_{\text{вывод.мощ.}}$	в т.ч. инновационные	$\Sigma \text{ИПРС}_{\text{пр.г}}$	$\Sigma \text{ИПФ}_{\text{пр.г}}$	$\Sigma_{\text{пр.г}(-4)}^{\text{ЭО}}$	$\Sigma_{\text{пр.г}(-3)}^{\text{ЭО}}$	$\Sigma_{\text{пр.г}(-2)}^{\text{ЭО}}$	$\Sigma_{\text{пр.г}(-1)}^{\text{ЭО}}$	$\Sigma_{\text{пр.г}(0)}^{\text{ЭО}}$	$\Sigma_{\text{пр.г}}^{\text{ЭО}}$	$\Sigma_{\text{пр.г}}^{\text{ЭО}}$	2018	2018	2018	k_{min}	k_{max}	$k_{\text{кор}}$	$\Sigma_{\text{пр.г}(-4)}^{\text{ЭО}}$
89	ЦМ	643,752	411,647	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	50,000	20,000	128,563	27,116	35,022	50,000	0,000	51,851	8,583	0,284	1,716	0,690	20,850	

Д

№	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Q	R	S	T	U	V	W	X	
1																							
2						Расчетная таблица по оценке задания экономии тепловой энергии на нетяговые нужды в _____ году																	
3	Планируемый период	2018	год																				
4	Порядковый номер года по энергопаспорту	5	(от 1 до 5)	График																			
7						тыс. Гкал																	
8	Финнал	Расход в базовом году		Ввод дополнительных мощностей в планируемом периоде		Вывод из эксплуатации мощностей в планируемом периоде		Ожидаемая экономия от инвест. проектов, в том числе:		Задания по экономии, за счет организационных мероприятий, за предшествующие планируемому периоды					Потенциал экономии по данным энергоаудита	Потенциал экономии по итогам проверок на:	Потенциал экономии по тренду ОМ на:	Потенциал экономии по тренду ЭО на:	Коэффициент			Потенциал экономии от ОМ на:	
9		2017		2018		2018		2018		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2018	2018	2018				2018	
10		$W_{\text{баз}}^{\text{экоэф}}$	$W_{\text{факт}}^{\text{экоэф}}$	$W_{\text{дод.мощ.}}$	в т.ч. инновационные	$W_{\text{вывод.мощ.}}$	в т.ч. инновационные	$\Sigma \text{ИПРС}_{\text{пр.г}}$	$\Sigma \text{ИПФ}_{\text{пр.г}}$	$\Sigma_{\text{пр.г}(-4)}^{\text{ЭО}}$	$\Sigma_{\text{пр.г}(-3)}^{\text{ЭО}}$	$\Sigma_{\text{пр.г}(-2)}^{\text{ЭО}}$	$\Sigma_{\text{пр.г}(-1)}^{\text{ЭО}}$	$\Sigma_{\text{пр.г}(0)}^{\text{ЭО}}$	$\Sigma_{\text{пр.г}}^{\text{ЭО}}$	$\Sigma_{\text{пр.г}}^{\text{ЭО}}$	2018	2018	2018	k_{min}	k_{max}	$k_{\text{кор}}$	$\Sigma_{\text{пр.г}(-4)}^{\text{ЭО}}$
89	ЦМ	22,4970	16,2590	2,1580	2,1580	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	2,0790	1,4250	1,9370	0,7376	1,3678	3,5000	0,0000	1,052	0,583	0,713	1,287	0,720	0,58859	

е

Рисунок 4.14, лист Б – Исходные данные для расчета потенциала экономии от ОМ

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Q	R	S	T	U	V	W	X	
1																							
2						Расчетная таблица по оценке задания экономии угля на нетяговые нужды в _____ году																	
3	Планируемый период	2018	год		График																		
4	Порядковый номер года по энергопаспорту	5	(от 1 до 5)																				
7																							
8	Филиал	Расход в базовом году		Ввод дополнительных мощностей в планируемом периоде		Выход из эксплуатации мощностей в планируемом периоде		Ожидаемая экономия от инвест. проектов, в том числе:		Задания по экономии, за счет организационных мероприятий, за предшествующие планируемому периоды					Потенциал экономии по данным энергоаудита	Потенциал экономии по итогам проверок на:	Потенциал экономии по тренду ЭО на:	Потенциал экономии по тренду ЭО на:	Коэффициент			Потенциал экономии от ЭО на:	
9		2017		2018		2018		2018		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2018	2018			k _{min}	k _{max}	k _{кор}	2018
10		$W_{у}^{эко}$	$W_{у}^{экспл}$	$W_{у}^{доп.мощ}$	в т.ч. инновационные	$W_{у}^{выход.мощ}$	в т.ч. инновационные	$\Sigma ИПРС_{у}$	$\Sigma ИПФ_{у}$	$\Sigma ЭО_{y(i-4)}$	$\Sigma ЭО_{y(i-3)}$	$\Sigma ЭО_{y(i-2)}$	$\Sigma ЭО_{y(i-1)}$	$\Sigma ЭО_{y(i)}$	$\Sigma ЭО_{у}$	$\Sigma ЭО_{(i/n-1)}$							$\Sigma ЭО_{(i/n-1)}$
89	ЦМ	5,120	3,480	0,004	0,000	0,451	0,000	0,000	0,200	0,260	0,053	0,175	0,136	0,850	0,000	0,119	0,144			0,906	1,094	1,003	0,125

Ж

Рисунок 4.14, лист В – Исходные данные для расчета потенциала экономии от ЭО

4) значение потенциала экономии ТЭР по результатам энергетического обследования (потенциал по энергоаудиту, красная линия);

5) среднее значение между аппроксимирующей тренд ОМ функцией и значением потенциала экономии ТЭР по результатам энергетического обследования за последний временной период (светло-зеленая штриховая линия).

Примеры полученных графических зависимостей для электрической энергии приведены на рисунке 4.15.

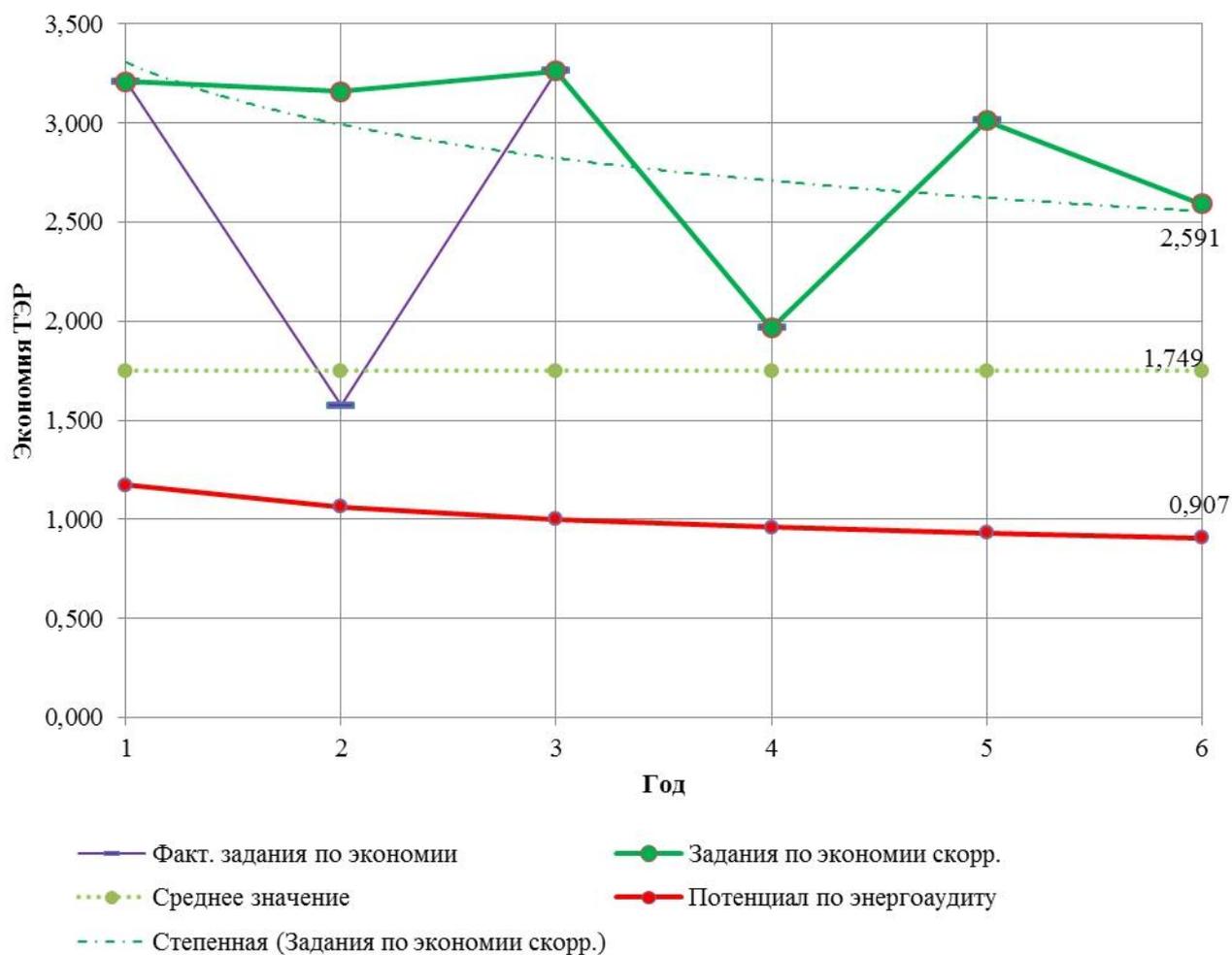


Рисунок 4.15 – Временные тренды заданий по экономии электроэнергии

Расчет плановых значений потенциала экономии ТЭР выполняется автоматически с применением Расчетной таблицы. При этом определяются:

- 1) потенциал экономии по тренду ОМ на 2018 год;
- 2) потенциал экономии по тренду ЭО на 2018 год.

Для примера указанные значения для ЦМ приведены в ячейках S89 и T89 на рисунке 4.14.

Потенциал экономии ТЭР в планируемом периоде за счет реализации организационных мероприятий, внедряемых за счет эксплуатационных расходов структурных подразделений ОАО «РЖД», выбирается из диапазона между указанными значениями с учетом корректирующего коэффициента $k_{\text{корр}}$ (приведен в ячейке W89 на рисунке 4.14). По умолчанию он принимается равным 1. Это означает, что задание по экономии ТЭР выбирается равным среднему арифметическому значению между потенциалами экономии по тренду ОМ и по тренду ЭО. Исходя из необходимости решения установленных Правлением ОАО «РЖД» бюджетных задач данный коэффициент может выбираться из диапазона $k_{\text{min}} \leq k_{\text{корр}} \leq k_{\text{max}}$, определяемого по формуле (4.29) (ячейки U89 и V89 на рисунке 4.14).

В случае ожидаемого ввода в эксплуатации дополнительных мощностей или вывода мощностей из эксплуатации, а также при наличии документально подтвержденного дополнительного потенциала экономии ТЭР, выявленного в результате проверок Желдораудита, Желдорконтроля, комиссионного осмотра начальника дороги и других проверяющих органов, рассчитывается скорректированный потенциал экономии ТЭР на расчетный период по формуле (4.30). Окончательное значение потенциала экономии ТЭР на расчетный период приведено в ячейке X89 на рисунке 4.14.

Результаты сравнения расчетных значений потенциала экономии ТЭР с фактически достигнутыми значениями приведены в таблице 4.11.

Как видно из полученных результатов, расхождение между расчетными значениями потенциала экономии ТЭР на нетяговые нужды и фактически достигнутыми значениями на 2018 год не превышает 5 %.

Положительные результаты апробации подтверждаются актом об использовании результатов научных исследований и разработок в производстве (приложение Д).

Таблица 4.11 – Результаты сравнения 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

4.4 Основные результаты и выводы

Разработана усовершенствованная организационная структура процесса нормирования и прогнозирования расхода ТЭР на железнодорожном транспорте, представленная в виде алгоритма. Предлагаемая структура стала основой для разработки «Порядка формирования заданий филиалам ОАО «РЖД» по экономии топливно-энергетических ресурсов на нетяговые нужды», утвержденного распоряжением ОАО «РЖД» №2754/р от 24.12.2018 г.

Для расчета прогнозных значений расхода ТЭР на уровне структурного подразделения предложено использовать разработанную в третьей главе методологию математического моделирования расхода ТЭР, на основе которой разработана «Методика планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды с использованием искусственных нейронных сетей», которая утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2626р от 06.12.2011 г. и внедрена на сети железных

дорог, а в дальнейшем усовершенствована в части учета ввода или вывода из эксплуатации электрооборудования, изменения режимов его работы. Для эффективной реализации методики разработан программный комплекс (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012617381), который входит в состав утвержденной методики в качестве электронного приложения к ней.

Выполнена апробация методики и программного комплекса для различных отчетных периодов (сутки, месяц, квартал) для структурных подразделений различной хозяйственной принадлежности, которая показала удовлетворительную сходимость результатов прогнозирования с экспериментальными данными с погрешностью, не превышающей 2 %.

Разработана методика определения обоснованного потенциала экономии ТЭР на нетяговые нужды за счет реализации организационных мероприятий, которая является частью утвержденного «Порядка формирования заданий филиалам ОАО «РЖД» по экономии топливно-энергетических ресурсов на нетяговые нужды» и основана на совместном анализе следующих показателей: временные тенденции изменения заданий по экономии ТЭР; ввод или вывод из эксплуатации энергопотребляющего оборудования; потенциал экономии, достигаемый в результате реализации организационных и малозатратных мероприятий, разработанных по итогам последнего энергетического обследования филиала. В целях автоматизации расчетов обоснованного потенциала экономии ТЭР за счет реализации организационных мероприятий разработано электронное приложение.

Выполнена апробация предложенной методики для Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом, результаты которой показали, что расхождение между расчетными значениями потенциала экономии ТЭР на нетяговые нужды и фактически достигнутыми значениями на 2018 год не превышает 5 %, что позволяет говорить о достаточной эффективности предлагаемых подходов к оценке потенциала экономии ТЭР.

Положительные результаты апробации предлагаемых решений подтверждаются актами об использовании результатов научных исследований и разработок в производстве (приложения Г, Д).

5 НАУЧНЫЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Для достижения целевых показателей экономии ТЭР, которые устанавливаются федеральными органами исполнительной власти для ОАО «РЖД», сформирована и реализуется Программа энергосбережения и повышения энергетической эффективности ОАО «РЖД». Основой для данной программы являются результаты обязательного энергетического обследования, технические мероприятия, реализуемые за счет ИПРС и ИПФ, а также организационные и малозатратные мероприятия, реализуемые за счет эксплуатационных расходов филиалов. Ежегодно в рамках указанной программы в ОАО «РЖД» осуществляется внедрение ресурсосберегающих ОТМ на сумму около 7 млрд руб.

Ежеквартальный мониторинг эффективности использования мероприятий, внедренных в рамках программы, а также декомпозиция целевых показателей СП филиалов ОАО «РЖД» и корректировка программ этих подразделений проводятся в автоматизированной информационной системе «Энергоэффективность» (далее – АИС «Энергоэффективность», в которой работают более 6200 пользователей – сотрудников линейных предприятий и аппарата управления ОАО «РЖД»). АИС «Энергоэффективность» разработана ОАО «НИИАС», а куратором и распорядителем системы является ЦТех. Система функционирует на шести уровнях [246] (рисунок 5.1).

Функциями распорядителя системы являются:

- корректировка нормативно-справочной информации;
- управление новостными материалами;
- управление подтверждением целевых показателей.



Рисунок 5.1 – Уровни АИС «Энергоэффективность»

К функциям пользователя корпоративного уровня относятся:

- просмотр заданий по экономии ТЭР всех подразделений ОАО «РЖД»;
- распределение заданий по экономии ТЭР между филиалами ОАО «РЖД»;
- снятие подтверждения заданий по экономии ТЭР у филиалов;
- просмотр планов ОТМ всех подразделений ОАО «РЖД»;
- рассогласование планов ОТМ любого из подразделений ОАО «РЖД»;
- согласование планов ОТМ, прошедших полное согласование на уровнях НТЭЦ/НТП соответствующей железной дороги и уровне соответствующего филиала;
- редактирование годового перечня типовых организационно-технических мероприятий;
- просмотр отчётов любого подразделения ОАО «РЖД»;

– согласование отчетов ОТМ, прошедших полное согласование на уровнях НТЭЦ/НТП соответствующей железной дороги и уровне соответствующего филиала;

– рассогласование отчёта любого подразделения ОАО «РЖД»;

– пересчет агрегированного отчёта ОАО «РЖД»;

– построение сводных отчетов и аналитика.

Функциями пользователя уровня «Филиал» являются:

– распределение ежегодных целевых показателей экономии ТЭР подчиненным подразделениям;

– подтверждение заданий по экономии ТЭР, назначенных на корпоративном уровне;

– просмотр планов и отчетов ОТМ подчиненных подразделений;

– рассогласование планов ОТМ подчиненных подразделений.

Функциями пользователя уровня «НТЭЦ или НТП» являются:

– просмотр планов и отчетов ОТМ подчиненных подразделений;

– рассогласование планов ОТМ подчиненных подразделений.

Функциями пользователя уровня «Территориальное подразделение» являются:

– просмотр и подтверждение установленных вышестоящим подразделением для данного подразделения целевых показателей экономии ТЭР;

– распределение целевых показателей экономии ТЭР для подчиненных подразделений;

– просмотр планов и отчетов ОТМ подчиненных подразделений;

– рассогласование планов ОТМ подчиненных подразделений.

Наиболее сложные задачи возложены на пользователя уровня «Структурное подразделение». К ним относятся:

– просмотр и подтверждение целевых показателей (заданий по экономии ТЭР);

– планирование ОТМ;

– формирование отчета об ОТМ.

Таким образом, ЦТех совместно с филиалами обеспечивает внесение и согласование в АИС «Энергоэффективность» программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности филиалов и их СП на планируемый период, обеспечивающих достижение установленных целевых показателей. Филиалы и СП, в свою очередь, ежеквартально отчитываются о фактически полученном эффекте от реализации указанных мероприятий.

Наибольшей проблемой, снижающей эффективность функционирования данной системы, является отсутствие единого подхода к оценке энергетической эффективности внедряемых ресурсосберегающих решений.

Обязанность по расчету энергетической эффективности внедряемых ОТМ и формированию соответствующего отчета возложена на пользователя уровня «Структурное подразделение», а проверка отчетов подчиненных СП – на пользователя уровня «Территориальное подразделение».

В связи с отсутствием методологической базы в большинстве случаев расчеты на уровне СП выполняются без приведения условий базового периода к отчетному, что приводило к значительным погрешностям из-за неучета изменений климатических и производственных факторов, а также не позволяло объективно оценивать результативность внедрения энергосберегающих ОТМ и давать обоснованные рекомендации по их дальнейшему внедрению. Такой подход не соответствует современным мировым тенденциям, а также требованиям ГОСТ Р 56743-2015.

В настоящей главе поставлена задача разработки усовершенствованных научно-организационных и практических принципов оценки энергетической эффективности организационных, технических и технологических решений, внедряемых на железнодорожном транспорте, которые будут являться основой для создания единого подхода к оценке результативности использования ТЭР в ОАО «РЖД».

5.1 Анализ и классификация организационных, технических и технологических решений, применяемых при организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте, и методов оценки их энергетической эффективности

Анализ реализации программ повышения энергоэффективности ОАО «РЖД» в период с 2011 по 2015 год показал, что энергосберегающая деятельность достаточно активно осуществляется как в части повышения эффективности перевозочного процесса, так и в части повышения эффективности использования ТЭР в неперевоочных видах деятельности (на нетяговые нужды) (рисунок 5.2).

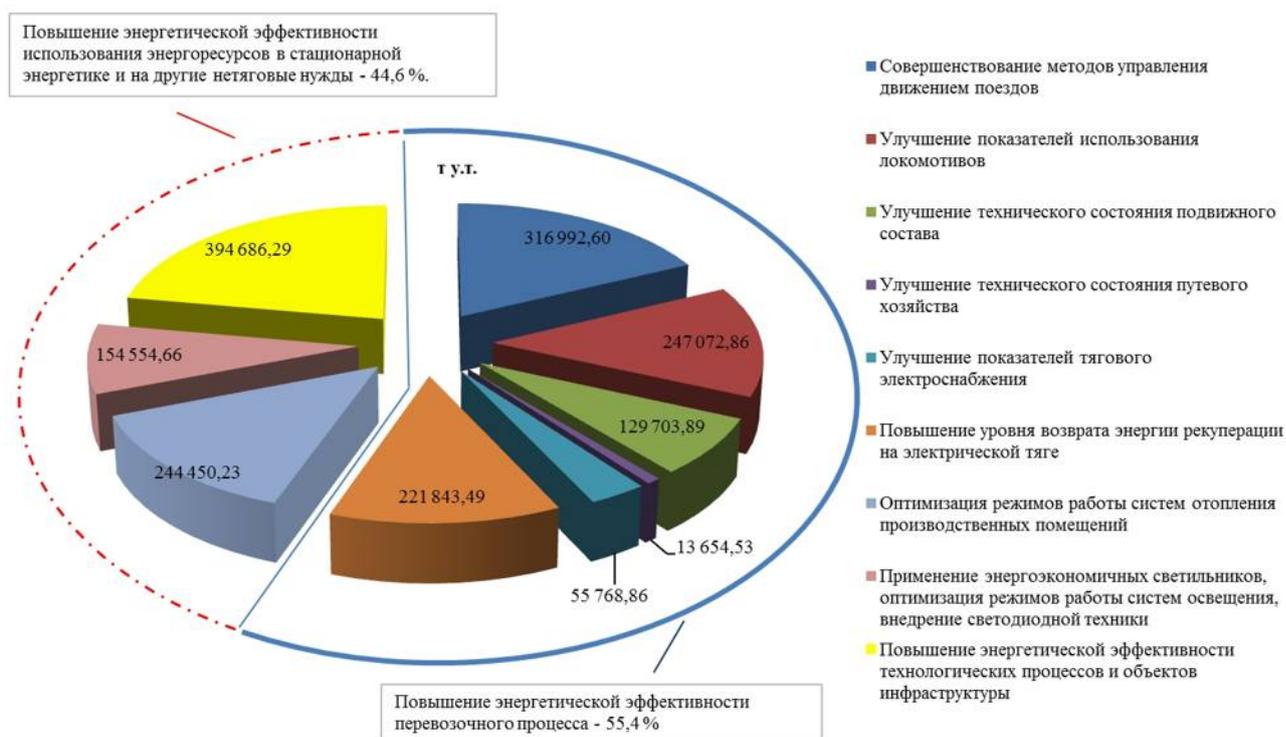


Рисунок 5.2 – Структура мероприятий, реализованных в рамках Программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности ОАО «РЖД» (по достигнутому эффекту)

Повышение энергетической эффективности перевозочного процесса достигается за счет совершенствования методов управления движением поездов, улучшения показателей использования локомотивов, улучшения технического состоя-

ния подвижного состава, путевого хозяйства и показателей тягового электро-снабжения, а также повышения уровня возврата энергии рекуперации на электрической тяге.

Значительный потенциал энергосбережения реализован в неперевозочных видах деятельности. В то же время недостаточное финансирование в последние годы привело к значительному технологическому отставанию технических средств стационарной энергетики железнодорожного транспорта. Эксплуатация физически и морально устаревших энергоустановок с низкими эксплуатационными КПД привела не только к повышенному потреблению ТЭР, но и к дополнительным финансовым затратам на их содержание и ремонт. Поэтому техническое переоснащение и модернизация энергетического оборудования инфраструктуры железных дорог является одной из первоочередных задач, стоящих перед ОАО «РЖД».

Повышение энергетической эффективности потребления ТЭР на нетяговые нужды достигается за счет реализации следующих направлений:

- оптимизация режимов работы систем отопления производственных помещений;
- применение энергоэкономичных светильников, оптимизация режимов работы систем освещения, внедрение светодиодной техники;
- повышение энергетической эффективности технологических процессов и объектов инфраструктуры.

В настоящее время в ОАО «РЖД» применяется 128 типовых мероприятий по энергосбережению и повышению энергоэффективности, внедряемых во всех бизнес-процессах компании. Структура энергосберегающих мероприятий в зависимости от области их применения приведена на рисунке 5.3.

Наибольшее количество мероприятий внедряется в стационарной энергетике (электроэнергия – 13,3 %, тепловая энергия – 35,9 %), тяге поездов и системе тягового электроснабжения (16,4 % и 15,6 % соответственно).

Необходимость решения задачи оценки энергетической эффективности ОТМ возникает в двух случаях:

1. Оценка потенциальной энергетической эффективности мероприятий для формирования технико-экономического обоснования (ТЭО) внедрения мероприятия и оценки целесообразности его применения.

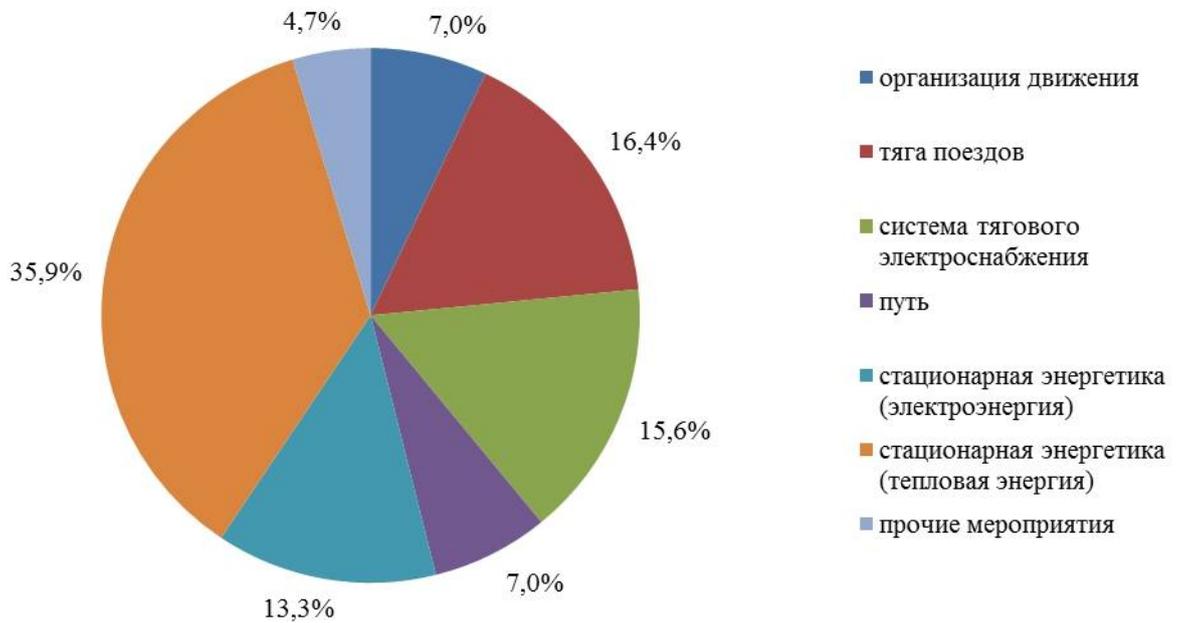


Рисунок 5.3 – Структура энергосберегающих мероприятий в зависимости от сферы их применения

Поскольку в данном случае отсутствует информация о фактическом расходе ТЭР после внедрения мероприятия, оценка ведется расчетным методом исходя из паспортных характеристик применяемого оборудования. В ряде случаев расчет ведется исходя из результатов опытных или лабораторных испытаний.

Настоящий вопрос является достаточно проработанным применительно к объектам железнодорожного транспорта. За последнее время разработаны и используются нормативные документы, направленные на оценку экономической целесообразности реализации мероприятий [247 – 249].

2. Оценка фактической энергетической эффективности мероприятий.

Указанная процедура выполняется ежеквартально пользователями АИС «Энергоэффективность» уровня «Структурное подразделение» для мероприятий, внедренных за предшествующий отчетному период.

Для оценки фактической энергетической эффективности ОТМ в ОАО «РЖД» разработан ряд методик [250 – 254]. Основным нормативным документом является методика [250], которая содержит основные принципы определения планового и фактического эффекта в денежном выражении от использования внедренных в ОАО «РЖД» ресурсосберегающих мероприятий. При этом указано, что расчет потребности в ресурсах «базовых» и «новых» технических средств (технологий) выполняется с помощью методик, которые разрабатываются и утверждаются для каждой группы ресурсосберегающих технических средств отдельно [250, п. 10].

Таким образом, для обеспечения эффективного функционирования системы оценки фактической результативности ОТМ, внедряемых в производственных процессах на железнодорожном транспорте, необходимо разработать нормативные документы, регламентирующие порядок расчета экономии ТЭР для каждого из внедряемых мероприятий. На сегодняшний день разработано недостаточное количество таких методик [251 – 254], которые при этом не связаны друг с другом, то есть не являются элементами единой технической политики. Кроме того, большинство из них направлено на оценку эффективности внедрения мероприятий в перевозочном процессе, а для неперевозочных видов деятельности такие методики практически отсутствуют.

В связи с этим в большинстве случаев расчет фактической эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий на уровне СП выполняется достаточно вольно, без учета фактических значений расхода ТЭР, производственных и климатических факторов в подразделении. В ряде случаев расчет выполняется на основе ТЭО рассматриваемого мероприятия (например, при заявленной (ожидаемой) в ТЭО экономии ТЭР в 3 % фактическое значение эффекта рассчитывалось как 3 % от фактического расхода ТЭР). Это приводит к появлению недостоверных данных о фактической эффективности мероприятий, а также к значительному числу замечаний Желдорконтроля в ходе проверки энергосберегающей деятельности СП.

Таким образом, существует необходимость в разработке унифицированной методики оценки фактической энергетической эффективности внедрения ОТМ, основанной на единых методологических подходах, но с учетом специфики конкретных мероприятий.

Исследования различных методов оценки эффективности внедряемых на железнодорожном транспорте энергосберегающих мероприятий представлены в работах [255 – 258].

Анализ российского и международного опыта оценки эффективности энергосберегающих мероприятий в различных отраслях промышленности позволил выделить следующие основные подходы [260].

Наиболее простым вариантом является способ определения фактической экономии ТЭР, при котором снижение расхода ТЭР определяется как разница между расходом до внедрения мероприятия (базовый период) и после его внедрения (отчетный период) [261, 262]. Также известен способ сопоставления удельных расходов ТЭР в расчете на единицу производственной деятельности того или иного объекта до и после внедрения мероприятия.

Такой подход применен в методике [263].

Наиболее актуальным документом в данной области являются методические рекомендации [321], в соответствии с которыми можно выделить три типа энергопотребляющего оборудования: «... активное оборудование, потребляющее топливно-энергетические ресурсы; пассивное оборудование, служащее для передачи тепловой, электрической энергии и энергоносителей, включая трубопроводы промышленного и коммунального назначения, предназначенные для транспортирования энергоносителей и теплоносителей, линии электропередач, электрические сети промышленного и коммунального назначения; сооружения, к которым относятся ограждающие (строительные) конструкции и материалы...».

Для активного оборудования в [321] применяется следующая формула для оценки энергоэффективности: Экономия (нат. ед.) = (Показатель эффективности энергоиспользования до реализации мероприятия - Показатель эффективности

энергоиспользования после реализации мероприятия) · Объем производимой продукции за цикл.

Для пассивного оборудования применяется формула: Экономия (нат. ед.) = (Удельные потери энергоносителя, среды, энергии до реализации мероприятия - Удельные потери энергоносителя, среды, энергии после реализации мероприятия) · Объем транспортируемой, хранимой, производимой энергии в течение цикла.

Основным нормативным документом национального уровня, определяющим порядок оценки энергетической эффективности ОТМ, является ГОСТ Р 56743-2015, в соответствии с которым экономия ТЭР определяется по формуле: Экономия = (Потребление энергетических ресурсов в базовом периоде - Потребление энергетических ресурсов в отчетном периоде) ± Корректировки.

Корректировки в общем уравнении используются для пересчета объемов базового потребления ТЭР для приведения к сопоставимым условиям отчетного периода. С применением корректировок можно определить скорректированное (приведенное) базовое потребление ТЭР, например, с учетом увеличения объема производства в отчетном периоде (рисунок 5.4).

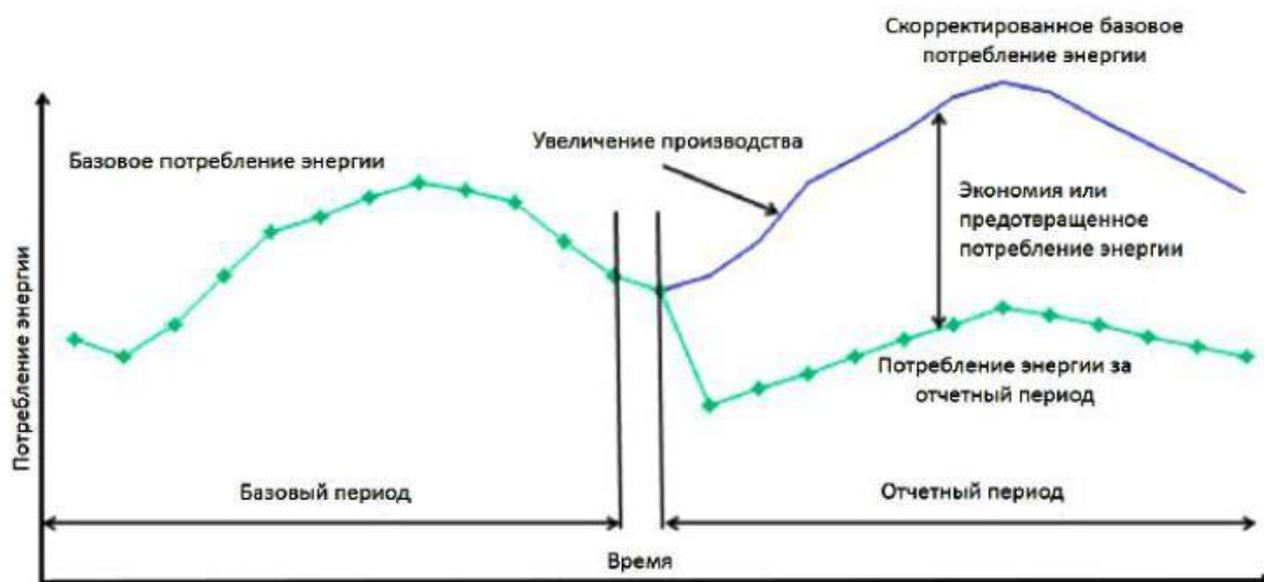


Рисунок 5.4 – Хронология потребления энергетических ресурсов
(из ГОСТ Р 56743-2015)

Национальный стандарт предусматривает два вида корректировок:

– стандартная корректировка – расчеты, которые выполняются по определенной формуле для учета изменений в выбранных независимых параметрах в границах измерений с начала базового периода;

– нестандартная корректировка – индивидуально разработанные математические модели расчета для учета изменений статических факторов в пределах границ измерений в отчетном периоде.

Из числа зарубежных подходов к оценке эффективности мероприятий можно выделить методы, предложенные организациями Efficiency Valuation Organization (EVO) (организация по оценке энергоэффективности, США) и American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) (Комитет Американского общества инженеров по нагреванию, охлаждению и кондиционированию, США).

В 1996 г. EVO впервые предложила международный протокол по измерению и верификации экономии International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP) [264], который затем был несколько раз переработан и на его основе в 2008 г. создано Руководство по измерению и верификации Государственной (федеральной) программы энергетического менеджмента США (Federal Energy Management Program (FEMP) M&V Guideline). Руководство по измерению и верификации США содержит более конкретные материалы в отношении методов, предложенных протоколом IPMVP, и по большей части ориентировано на государственный сектор [325].

В данных нормативных документах стандартная корректировка осуществляется методом линейной регрессии:

$$B_{\text{корр}} = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + C, \quad (5.1)$$

где $a_1 \dots a_n$ – коэффициенты уравнения регрессии; C – свободный член уравнения; x_1, \dots, x_n – факторы, влияющие на процесс энергопотребления.

Недостаток такого способа заключается в том, что он не может учитывать нелинейные зависимости между расходом ТЭР и влияющими факторами. Кроме

того, как показано в главе 2, регрессионные модели расхода ТЭР, как правило, имеют сравнительно невысокую точность.

Протоколы IPMVP и FEMP послужили основой для разработки национального стандарта ГОСТ Р 56743-2015. Например, хронология потребления ТЭР в данных документах представлена аналогично ГОСТ Р 56743-2015 (рисунок 5.5).

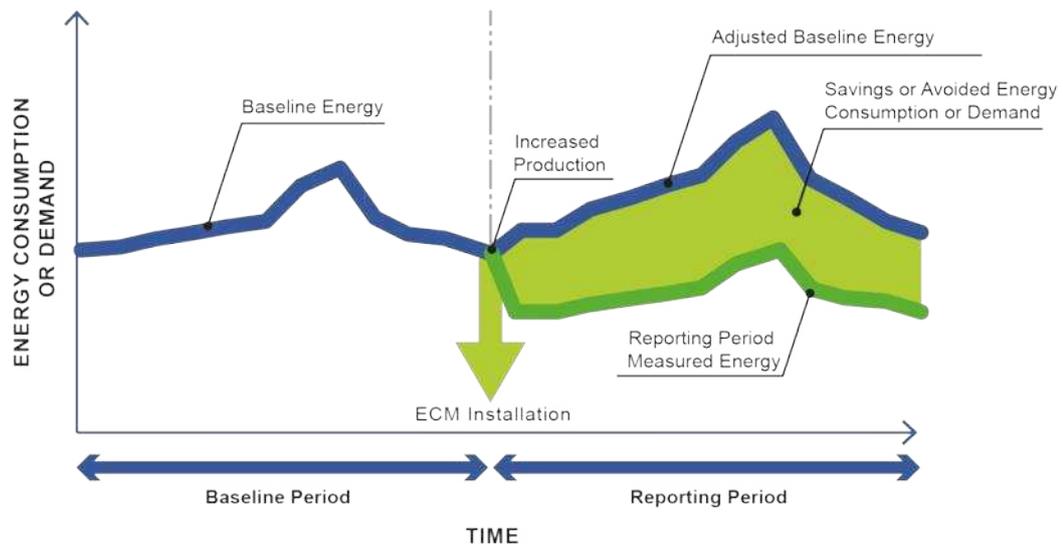


Рисунок 5.5 – Хронология потребления энергетических ресурсов
(из протоколов IPMVP и FEMP)

Методика ASHRAE во многом похожа на методику EVO и предусматривает три варианта оценки энергоэффективности [325]:

1. Измерение показателей «целого (всего) здания».
2. Измерение показателей «изолированной (локальной) модернизации»
3. Калибровочное моделирование всего здания.

Данные подходы основаны на балансе точности измерений и расходов на реализацию проекта.

Как показано в [325], применение данных нормативных документов в РФ в чистом виде невозможно, т.к. «... они основаны на законодательстве США, которое не совпадает с положениями российского законодательства о размещении заказов на поставки товаров, выполнение работ, оказание услуг для государственных»

ных и муниципальных нужд... более того, принципы организации самой энергетической отрасли в России и США существенно различаются...».

5.2 Разработка усовершенствованных методов оценки энергетической эффективности организационных, технических и технологических решений, применяемых при организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте

Принципы 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.

Указанный подход является основой для разработки «Унифицированной методики по расчету экономии топливно-энергетических ресурсов от реализации мероприятий программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности структурных подразделений ОАО «РЖД», утвержденной распоряжением Департамента технической политики ОАО «РЖД» №ЦТЕХ-45 от 28.06.2019 г. (приложение Е). Разработка методики выполнена ОмГУПСом согласно договору с ОАО «РЖД» № 417-18 при непосредственном участии автора.

ОТМ, внедряемые в производственных процессах ОАО «РЖД», в соответствии с предложенной классификацией могут быть разделены на четыре группы в зависимости от метода оценки энергоэффективности (рисунок 5.6). Предложенные группы ОТМ частично корреспондируются с методами А, В, С, D, изложенными в ГОСТ Р 56743-2015. Алгоритм оценки энергетической эффективности ресурсосберегающих ОТМ, внедряемых на железнодорожном транспорте, представлен на рисунке 5.7 [269, 329].

К первой группе относятся ОТМ, для которых фактическая экономия энерго-ресурсов определяется как разница между энергопотреблением в базовом и отчетном периодах [261]:

$$\Delta B = B^{\text{баз}} - B^{\text{отч}} . \quad (5.2)$$

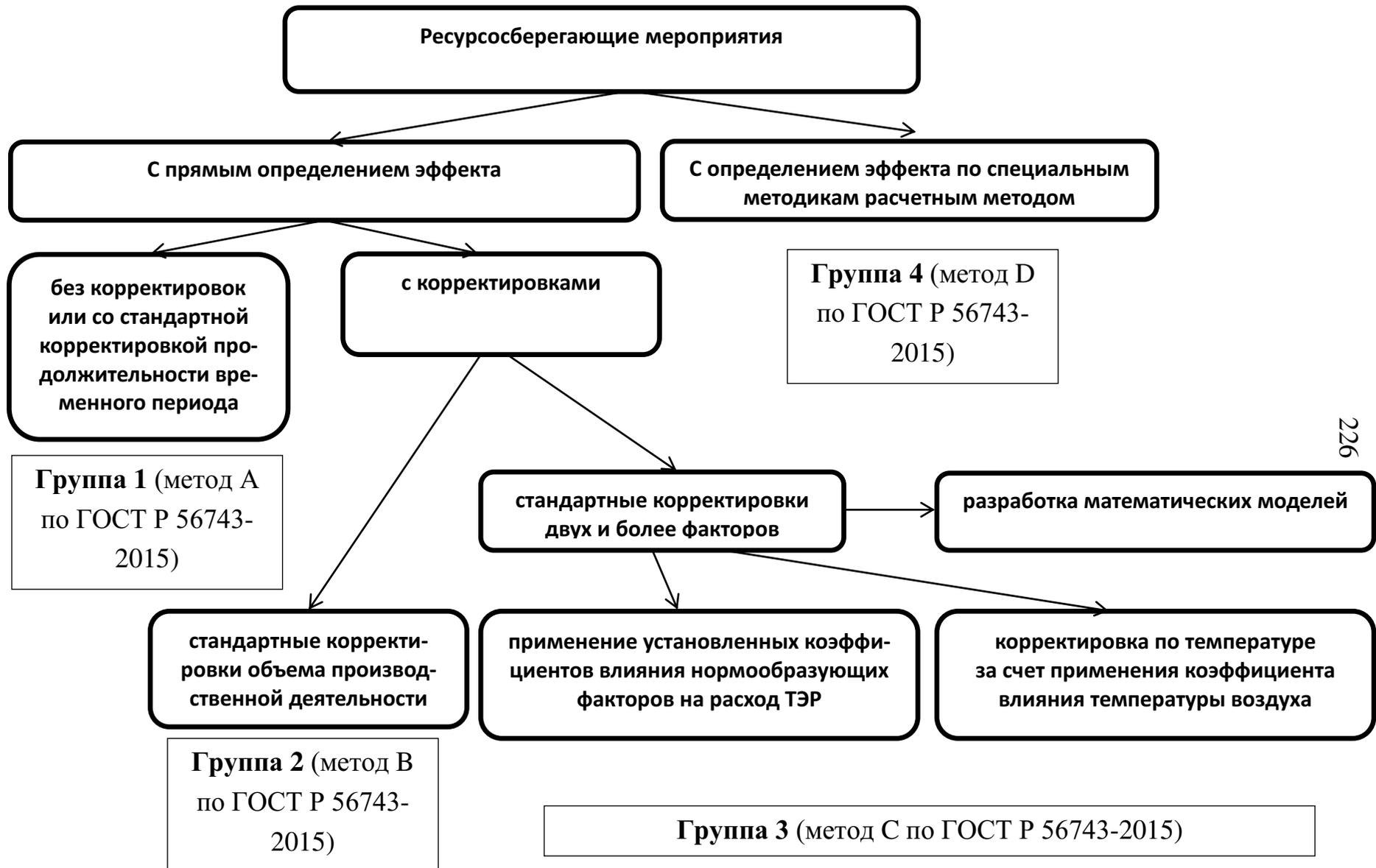


Рисунок 5.6 – Классификация ресурсосберегающих мероприятий, внедряемых в производственных процессах на железнодорожном транспорте, в зависимости от метода оценки энергоэффективности

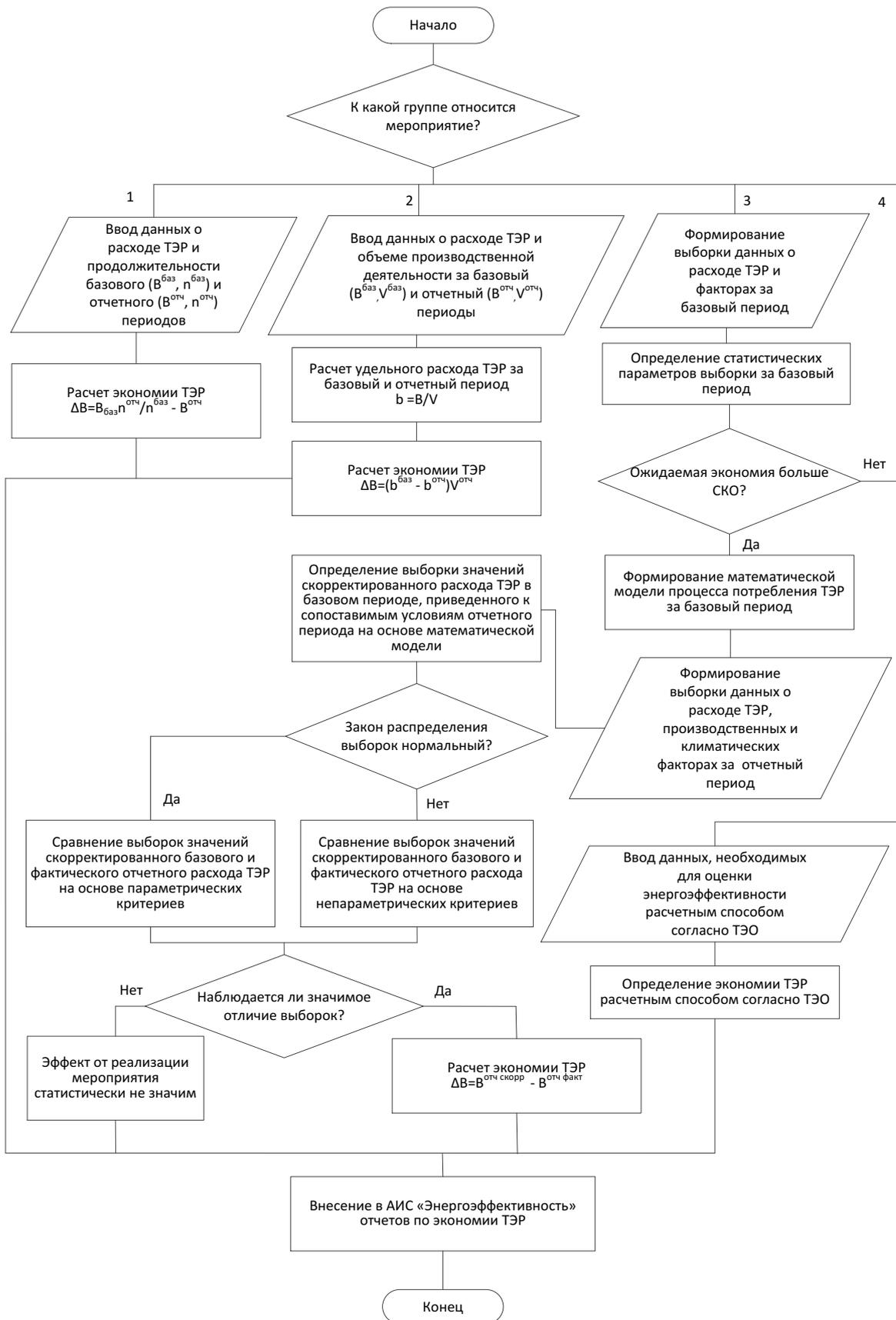


Рисунок 5.7 – Алгоритм оценки энергетической эффективности ресурсосберегающих ОТМ, внедряемых на железнодорожном транспорте

В этом случае корректировка не предусмотрена.

Разновидностью данного способа является метод, «...учитывающий приведение расхода ТЭР в базовом периоде к отчетному на основе определенных показателей. Например, в случае, если базовый и отчетный период не совпадают по продолжительности, корректировка возможна через отношение количества дней в соответствующих периодах...» [326]:

$$\Delta B = B^{\text{баз}} \frac{n^{\text{отч}}}{n^{\text{баз}}} - B^{\text{отч}}. \quad (5.3)$$

Недостатком такого способа является то, что он не учитывает влияние производственных факторов на объем электропотребления. Поэтому такой способ 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 существенно не зависит от влияющих производственных факторов.

Пример 1. Оценка эффекта от оптимизации режимов работы электрообогрева стрелочных переводов. Для обеспечения бесперебойного и безопасного движения поездов в зимний период на железнодорожном транспорте применяется электрообогрев стрелочных переводов, обеспечивающий удаление снега и наледи из критических зон и элементов стрелочных переводов.

В связи с тем, что при внедрении данного мероприятия имеется возможность оценки фактического расхода электроэнергии по индивидуальному прибору учета, расчет эффекта за счет оптимизации режимов работы электрообогрева стрелочных переводов в натуральном выражении за отчетный период (ΔW), тыс. кВт·ч, выполняется по формуле:

$$\Delta W = W_{\text{об}}^{\text{баз}} \frac{n_{\text{сн}}^{\text{отч}}}{n_{\text{сн}}^{\text{баз}}} - W_{\text{об}}^{\text{отч}}, \quad (5.4)$$

где $W_{об}^{баз}$, $W_{об}^{отч}$ – расход электроэнергии на электрообогрев стрелочных переводов в базовом и отчетном периоде соответственно, тыс. кВт·ч;

$n_{сн}^{баз}$, $n_{сн}^{отч}$ – количество дней с осадками в виде снега в базовом и отчетном периоде соответственно, сутки.

Ко **второй группе** относятся ОТМ, для которых осуществляется сопоставление удельных расходов ТЭР в расчете на единицу производственной деятельности до ($b^{баз}$) и после внедрения ($b^{отч}$) ресурсосберегающего устройства:

$$\Delta B = (b^{баз} - b^{отч}) V^{отч}, \quad (5.5)$$

где $V^{отч}$ – объем производственной деятельности после внедрения ресурсосберегающего ОТМ.

В этом случае корректировка производится за счет оценки объема производственной деятельности. Также возможна корректировка через продолжительность отчетного и базового периода, как в предыдущем методе.

Эффективное применение данного подхода требует, как и для предыдущей группы мероприятий, возможности изоляции производственного процесса и наличия индивидуального прибора учета ТЭР. Кроме того, для таких мероприятий принимается допущение о линейном характере зависимости расхода ТЭР от объема производственной деятельности и отсутствии условно-постоянной составляющей расхода ТЭР.

Пример 2. Внедрение передвижных компрессорных установок. Данная технология внедряется в путевых машинных станциях. Передвижная компрессорная установка монтируется на подвижной состав и применяется вместо дополнительного локомотива для обеспечения сжатым воздухом думпкаров и хоппер-дозаторов при реконструкции верхнего строения пути и всех видах ремонта пути.

Расход дизельного топлива в базовом периоде $B^{баз}$ определяется по данным форм ТХО-125, 4-топливо как суммарный расход топлива локомотивами, работающими в составе ремонтных поездов. При этом локомотивная компрессорная установка обеспечивает сжатым воздухом работу думпкаров и хоппер-дозаторов.

Расход дизельного топлива в отчетном периоде $B^{\text{отч}}$ складывается из следующих составляющих:

- суммарный расход топлива локомотивами, работающими в составе ремонтных поездов, который при этом не учитывает затраты на обеспечение сжатым воздухом работы думпкаров и хоппер-дозаторов;
- расход топлива передвижными компрессорными установками.

Расчет эффекта от внедрения передвижной компрессорной установки в натуральном выражении за отчетный период выполняется по формуле:

$$\Delta B = B^{\text{баз}} \frac{V_{\text{рем}}^{\text{отч}}}{V_{\text{рем}}^{\text{баз}}} - B^{\text{отч}}, \quad (5.6)$$

где $V_{\text{рем}}^{\text{баз}}$, $V_{\text{рем}}^{\text{отч}}$ – объем реконструкции верхнего строения пути и всех видов ремонта пути по данным формы 7-у в базовом и отчетном периоде соответственно.

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 отсутствует возможность изоляции зоны внедрения ресурсосберегающего мероприятия.

В этом случае корректировка может осуществляться следующими способами:

1. Применение ранее установленных и утвержденных коэффициентов влияния нормообразующих факторов на расход ТЭР [327].

Данный подход может применяться для оценки энергетической эффективности ОТМ, внедряемых в перевозочном процессе. В основном такие решения носят организационный характер, примером их могут быть повышение коэффициента участковой скорости, повышение средней массы грузовых поездов, меры по снижению порожнего пробега грузовых вагонов и одиночного следования локомотивов и т.д. Недостатком данного метода является применение усредненных коэффициентов влияния, которые для условий данного участка или локомотивного эксплуатационного депо могут существенно отличаться от фактических. Подробный порядок расчета описан в [151].

2. Выполнение корректировки по объему производственной деятельности согласно формуле (5.5) или по продолжительности отчетного и базового периода по формуле (5.3), а корректировки по температуре за счет применения коэффициента влияния температуры воздуха, рассчитываемого по методике, изложенной в [328]. Недостатком такого подхода является принятие допущения о неизменности подключенной тепловой или электрической нагрузки и режимов работы энергопотребляющего оборудования.

Пример 3. Перевод системы отопления на возобновляемые источники энергии. Данная технология предполагает внедрение системы отопления с комбинированным использованием возобновляемых источников энергии: солнца и ветра. Эффект от внедрения системы образуется за счет экономии ТЭР, потребляемых извне, которые будут замещаться энергией, вырабатываемой за счет использования возобновляемых источников энергии.

Эффект в натуральном выражении по соответствующим видам ТЭР в расчетный период от перевода системы отопления на возобновляемые источники энергии определяется по формуле:

$$\Delta B = B^{\text{баз}} \cdot k_t \cdot \frac{n^{\text{отч}}}{n^{\text{баз}}} - B^{\text{отч}}. \quad (5.7)$$

где k_t – коэффициент влияния на потребление ТЭР изменения температуры атмосферного воздуха в отчетном периоде относительно базового, который принимается по данным АИС «Энергоэффективность» (раздел «Справка о влиянии отклонения температуры атмосферного воздуха»).

3. Разработка математических моделей процесса использования ТЭР за базовый период. Данный способ является наиболее универсальным. Он основан на статистическом анализе выборок расхода ТЭР и соответствующих ему значений влияющих факторов. Данный способ позволяет выполнять оценку энергетической эффективности мероприятий в случае, когда на результат влияет множество производственных и климатических показателей.

Отличительной особенностью указанного метода является то, что оценка статистической значимости достигнутой в производственных процессах экономии

энергоресурсов осуществляется с учетом законов распределения выборок энергопотребления. Важной особенностью является то, что ожидаемый эффект от реализации мероприятия должен быть выше случайных колебаний расхода ТЭР. С этой целью в алгоритме на рисунке 5.7 вводится блок сравнения ожидаемого эффекта со средним квадратическим отклонением выборки.

В ходе реализации указанного метода осуществляются:

1) сбор данных о расходе ТЭР и влияющих факторах за базовый период, выполняется анализ влияния принятых к рассмотрению факторов на объем потребления ТЭР согласно порядку, изложенному в главе 2, и формирование математической модели процесса потребления ТЭР согласно порядку, изложенному в главе 3 [270 – 272];

2) приведение данных о расходе ТЭР за базовый период к сопоставимым условиям отчетного периода за счет стандартной корректировки с использованием математической модели;

3) сравнение выборок значений скорректированного базового и фактического расхода ТЭР в отчетном периоде, для чего необходимо оценить законы распределения выборок.

Для исследования возможных законов распределения случайных величин расхода (удельного расхода) ТЭР (на примере электроэнергии) выбраны объекты железнодорожного транспорта, принятые ранее к рассмотрению: для перевозочного процесса – ТЧЭ Карасук, ТЧЭ Барабинск, ТЧприг Омск; для неперевозочных видов деятельности – СЛД Аркаим, ШЧ Брянск-Льговский, МЧ Апатиты.

Оценка закона распределения выборок на первом этапе осуществлялась на основе критерия Пирсона «хи-квадрат» [171].

Наблюдаемая величина критерия Пирсона определяется по выражению:

$$\chi_{набл}^2 = \sum_{i=1}^L \frac{(\varphi_{набл i} - \varphi_{теор i})^2}{\varphi_{теор i}}, \quad (5.8)$$

где L – количество интервалов гистограммы; $\varphi_{набл i}$ – количество наблюдаемых значений, попавших в i -й интервал; $\varphi_{теор i}$ – количество теоретических значений, попавших в i -й интервал.

Количество интервалов гистограммы для выборки объема n рассчитывается по формуле:

$$L = 1 + 3,322 \lg n, \quad (5.9)$$

где n – объем выборки.

Критическое значение χ_m^2 принимается по справочным данным в зависимости от доверительной вероятности и числа степеней свободы. В настоящем исследовании принята доверительная вероятность 0,99.

Результаты анализа законов распределения случайной величины УРЭ в перевозочном процессе для выбранных объектов железнодорожного транспорта представлены в таблице 5.1 [273], а гистограммы законов распределения – на рисунках 5.8 – 5.10.

Таблица 5.1 – Исследование закона распределения случайной величины УРЭ в перевозочном процессе с применением критерия Пирсона

Объект исследования	Предполагаемый закон распределения	Величина статистического критерия	
		наблюдаемая $\chi_{набл}^2$	критическая χ_m^2
ТЧЭ Барабинск (пассажирское движение)	Нормальный	59,0	21,7
ТЧприг Омск (пригородное движение)	Нормальный	57,3	20,1
ТЧЭ Карасук (грузовое движение)	Логнормальный	538,4	23,2

Сравнение наблюдаемых и критических значений статистического критерия по УРЭ показало, что во всех случаях закон распределения близок к нормальному (логнормальному), однако наблюдаемая величина критерия «хи-квадрат» во всех случаях оказалась выше, чем критическая. Следовательно, согласно критерию Пирсона гипотеза о нормальном законе распределения УРЭ для перевозочного процесса отвергается.

В то же время сравнительная близость наблюдаемых и критических значений для ТЧЭ Барабинск и ТЧприг Омск и близость теоретической кривой нормального закона распределения и эмпирической гистограммы позволяет говорить о целесообразности применения других критериев.

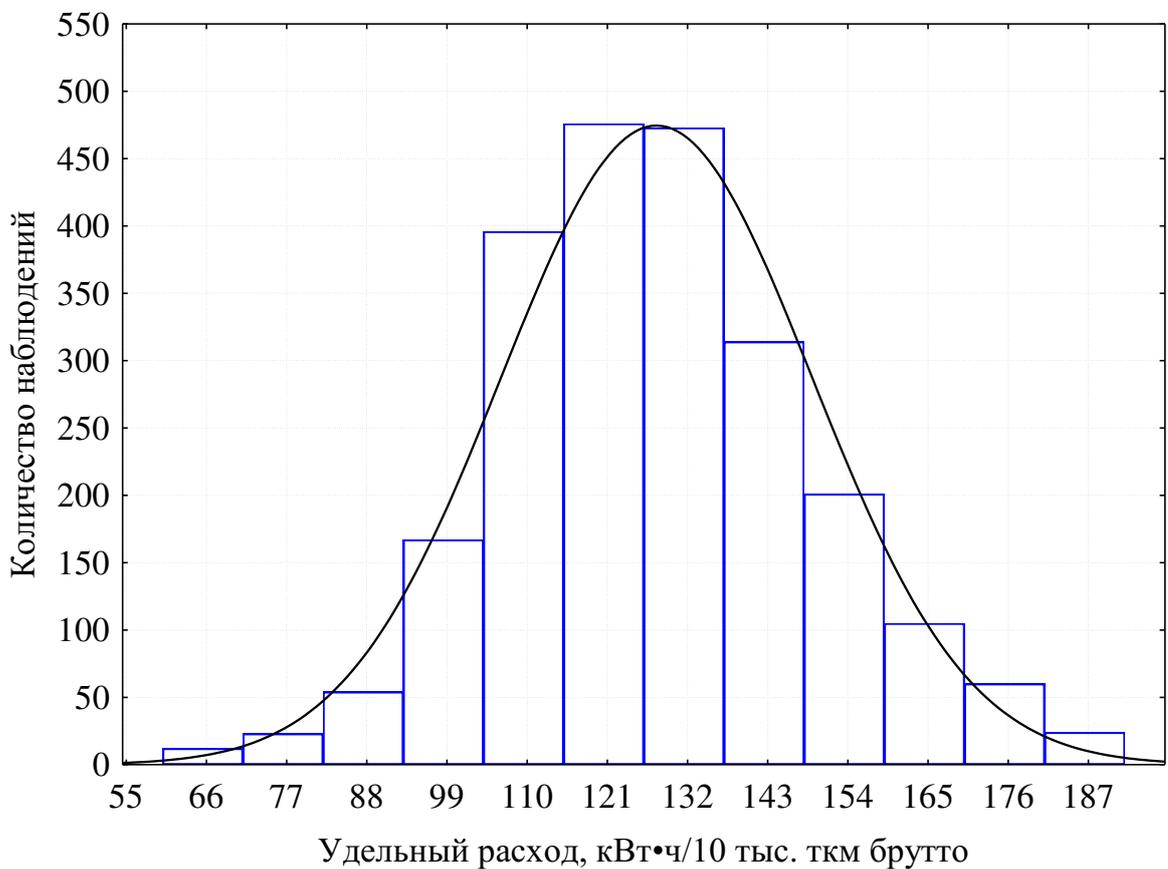


Рисунок 5.8 – Гистограмма закона распределения для ТЧЭ Барабинск

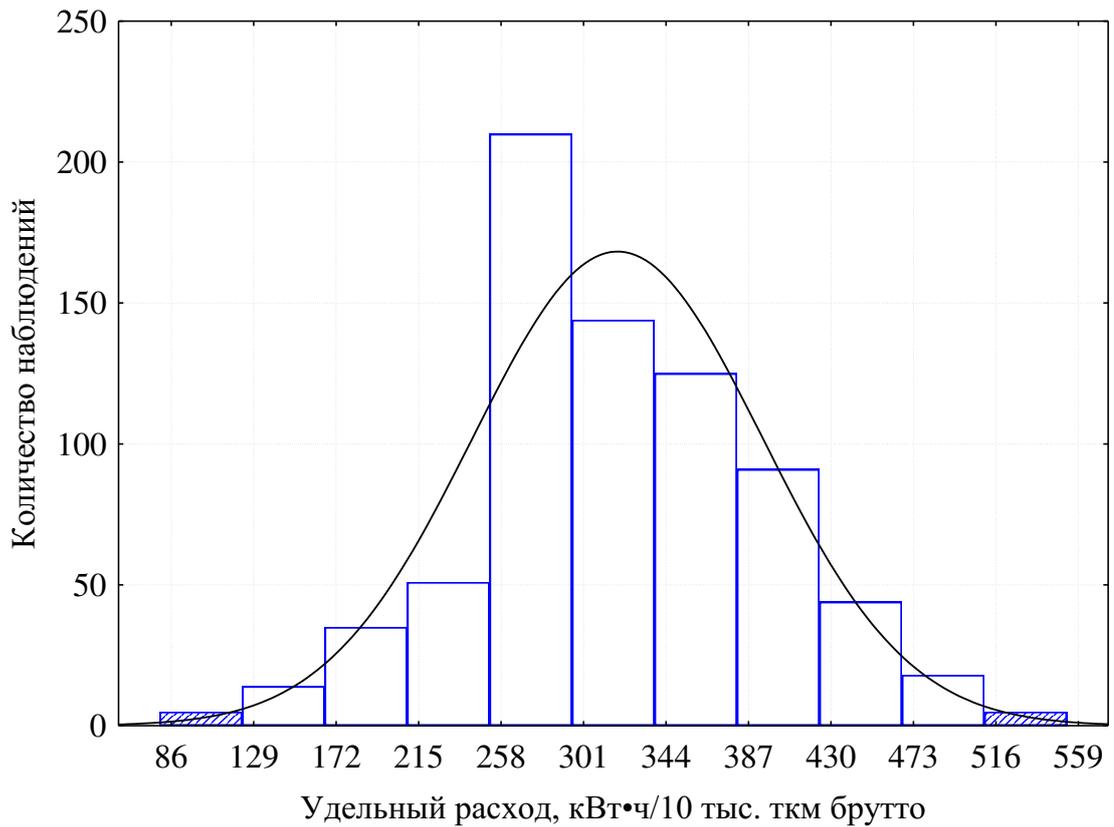


Рисунок 5.9 – Гистограмма закона распределения для ТЧприг Омск

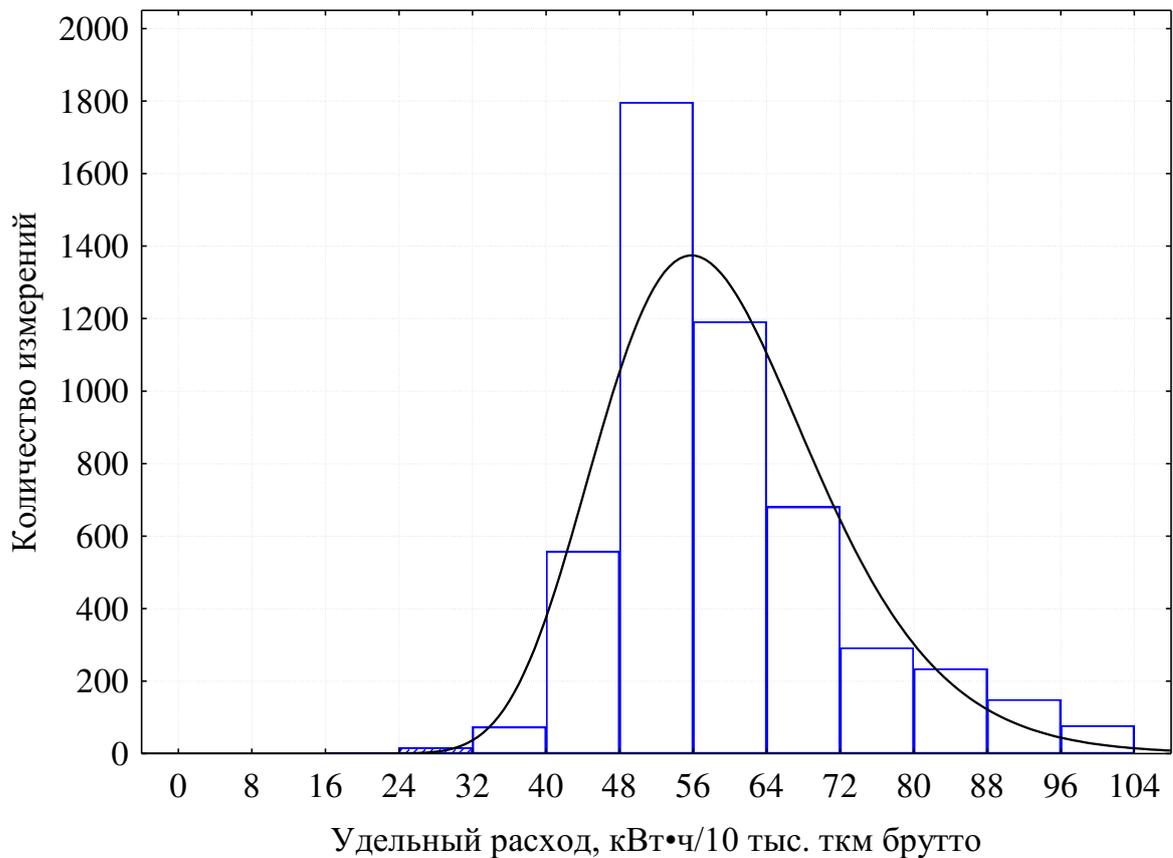


Рисунок 5.10 – Гистограмма закона распределения для ТЧЭ Карасук

В настоящей работе предлагается использовать критерий Колмогорова. В качестве нулевой гипотезы принимается принадлежность опытных данных нормальному распределению. В этом случае вычисляются статистики [274]:

$$\begin{aligned} D_n^+ &= \max_{1 \leq m \leq n} \left(\frac{m}{n} - \Phi(z_m) \right); \\ D_n^- &= \max_{1 \leq m \leq n} \left(\Phi(z_m) - \frac{m-1}{n} \right); \\ D_n &= \max(D_n^+, D_n^-) \end{aligned} \quad (5.10)$$

где $\Phi(z_m)$ – функция Лапласа;

z_m – аргумент функции Лапласа:

$$z_m = \frac{x - \bar{x}}{\sigma_x}, \quad (5.11)$$

где x , \bar{x} , σ_x – случайная величина, ее математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение.

При $n \geq 10$ критическое значение критерия Колмогорова можно определить по приближенной формуле [287]:

$$D_n(Q) = \sqrt{\frac{1}{2n} \left(y - \frac{2y^2 - 4y - 1}{18n} \right)} - \frac{1}{6n}, \quad (5.12)$$

где $y = -\ln(0,005Q)$.

В приведенных выражениях Q – заданный уровень значимости, %. При выбранной доверительной вероятности 0,99 $Q = 1$ %.

Если выполняется неравенство

$$D_n \geq D_n(Q), \quad (5.13)$$

то нулевая гипотеза согласно критерию Колмогорова должна быть отвергнута, то есть закон распределения не является нормальным. Результаты проверки с применением критерия Колмогорова приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Исследование закона распределения случайной величины УРЭ для объектов перевозочного процесса с применением критерия Колмогорова

Объект исследования	Предполагаемый закон распределения	Величина статистического критерия	
		D_n	$D_n(Q)$
ТЧЭ Барабинск (пассажирское движение)	Нормальный	0,0304	0,0338
ТЧприг Омск (пригородное движение)	Нормальный	0,0557	0,0595

Таким образом, неравенство (5.13) для обоих случаев не выполняется, следовательно, может быть принята гипотеза о нормальном законе распределения рассматриваемых случайных величин.

Результаты анализа законов распределения случайной величины расхода электроэнергии в неперевозочных видах деятельности для выбранных объектов железнодорожного транспорта представлены в таблице 5.3, а гистограммы законов распределения – на рисунках 5.11 – 5.13.

Таблица 5.3 – Исследование закона распределения случайной величины расхода электроэнергии для неперевозочных видов деятельности с применением критерия Пирсона

Объект исследования	Предполагаемый закон распределения	Величина статистического критерия	
		наблюдаемая $\chi_{набл}^2$	критическая χ_t^2
СЛД Аркаим	Логнормальный	5,39	13,28
ШЧ Брянск-Льговский	Равномерный	4,94	13,28
МЧ Апатиты	Равномерный	5,36	13,28

Для СП железнодорожного транспорта, функционирующих в неперевозочных видах деятельности, наблюдаются логнормальный и равномерный законы распределения случайной величины расхода электрической энергии.

Таким образом, из рассмотренных шести объектов железнодорожного транспорта для двух подтверждается нормальный закон распределения, а для остальных – иные законы.

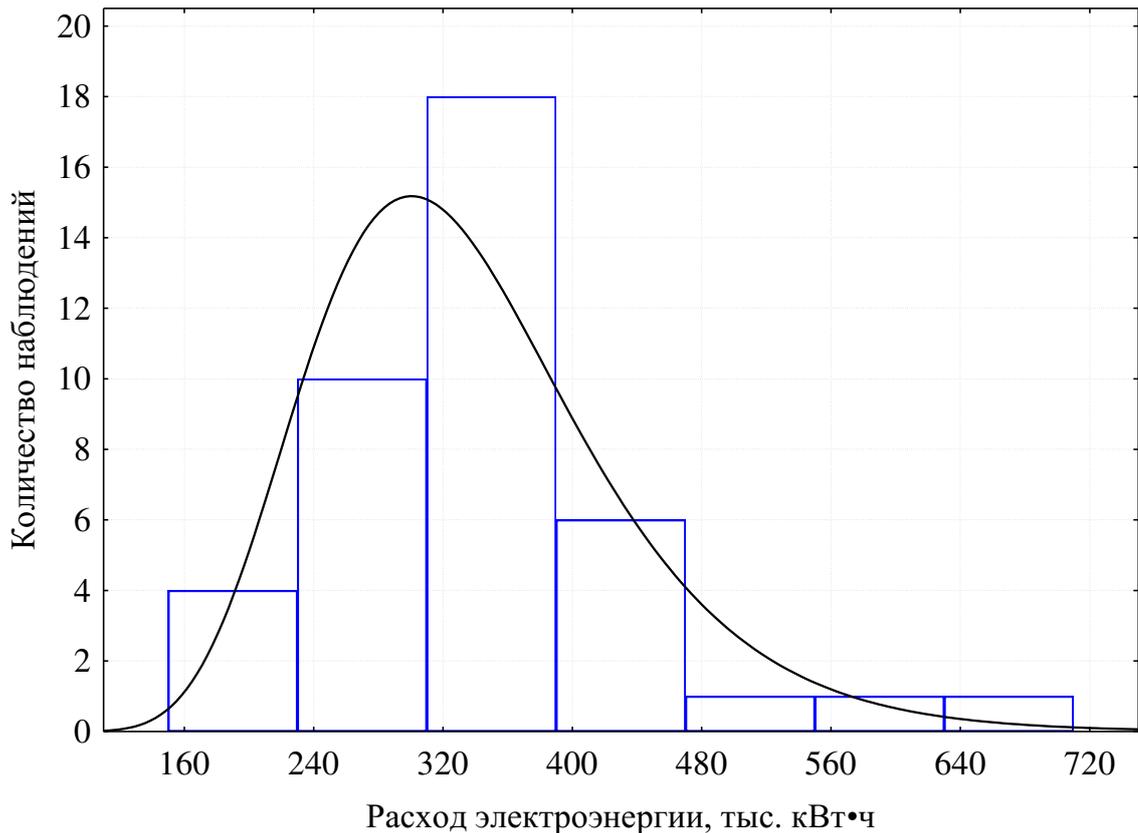


Рисунок 5.11 – Гистограмма закона распределения для сервисного локомотивного депо Аркаим

Следовательно, методы анализа выборок расхода электрической энергии, основанные на гипотезе о нормальном распределении (критерии t-Стьюдента, F-Фишера и другие), не могут быть применены абсолютно для всех производственных процессов железнодорожного транспорта. Поэтому, наряду с параметрическими, необходимо рассмотреть возможность применения непараметрических методов математической статистики [275 – 277].

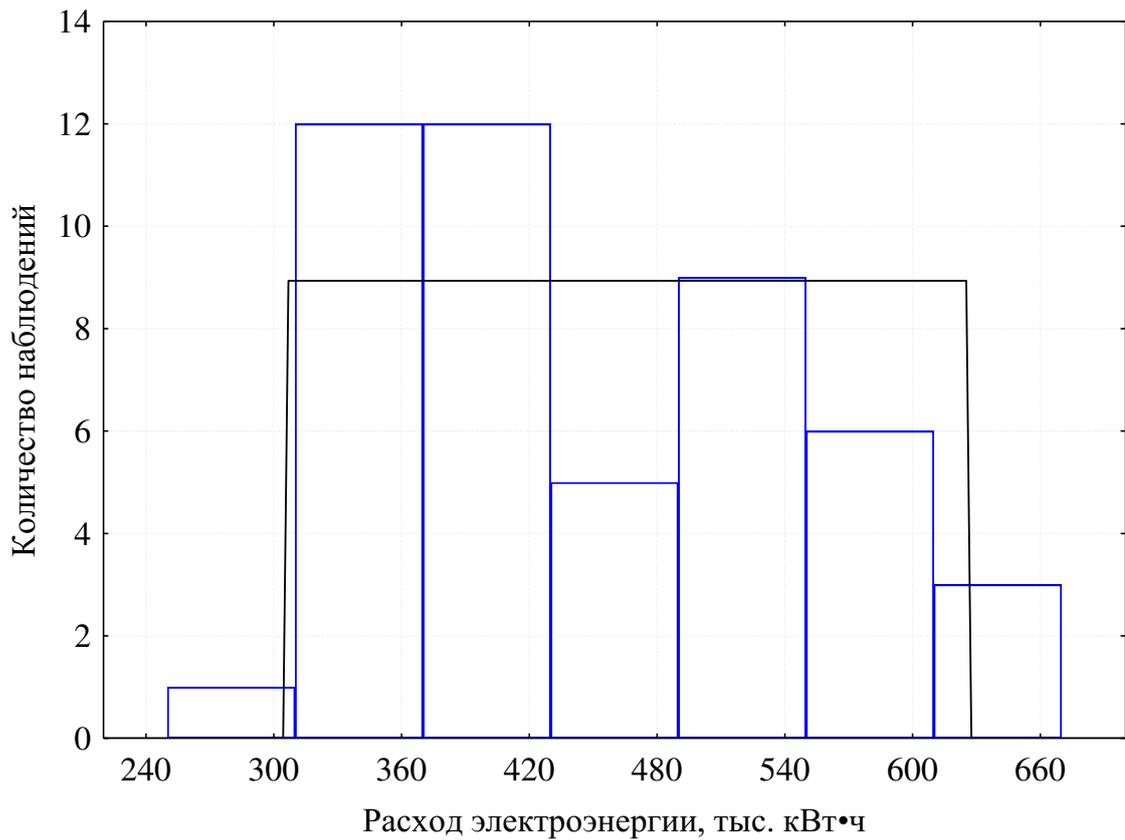


Рисунок 5.12 – Гистограмма закона распределения для дистанции сигнализации, централизации и блокировки Брянск-Льговский

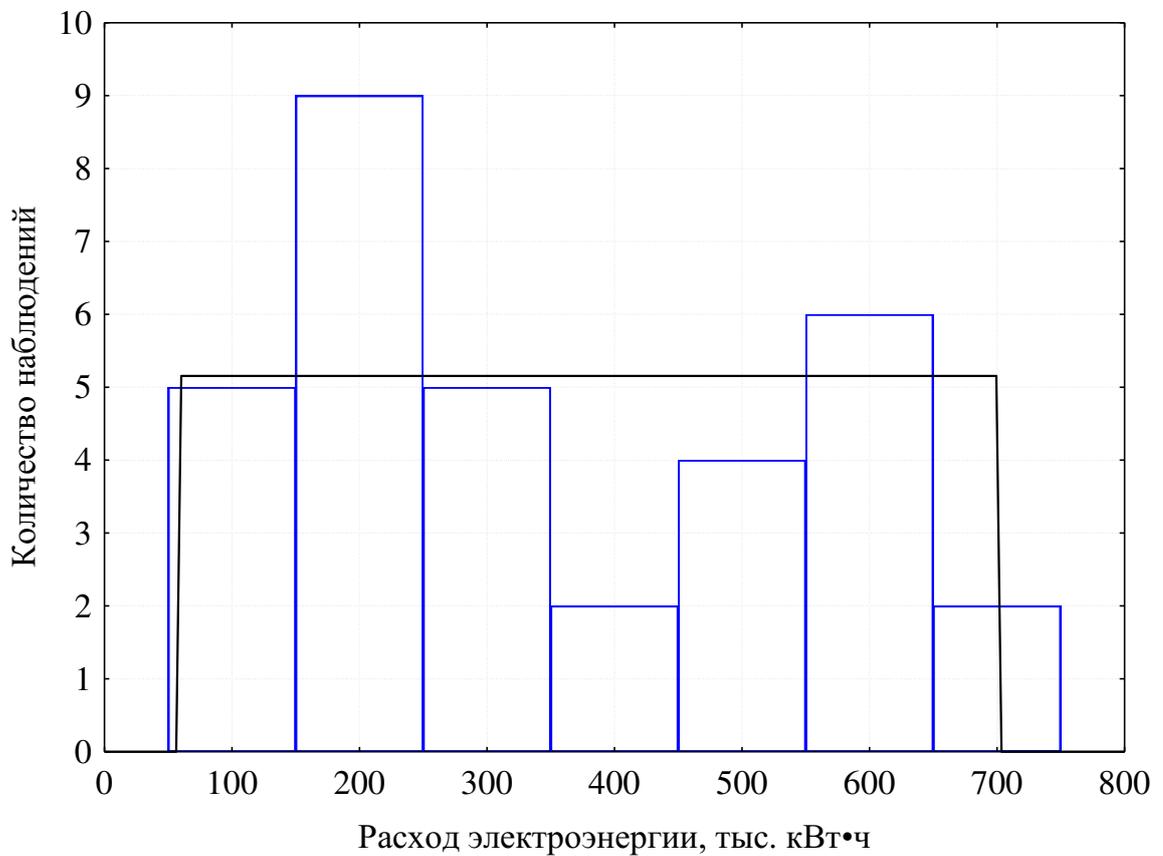


Рисунок 5.13 – Гистограмма закона распределения для дистанции погрузочно-разгрузочных работ Апатиты

Для сравнения скорректированного базового и фактического расхода электрической энергии в случае законов распределения, отличных от нормального, предлагается применять непараметрические критерии.

Алгоритм сравнения выборок с применением непараметрических критериев приведен на рисунке 5.14. Согласно данному алгоритму, на первом этапе оценивается смещение математического ожидания выборок в результате внедрения ОТМ, для чего применяется критерий Крамера – Уэлча:

$$T_{\text{набл}} = \frac{\sqrt{mn}(\bar{x} - \bar{y})}{\sqrt{nS_x^2 + mS_y^2}}, \quad (5.14)$$

где m, n – объем выборок значений скорректированного и фактического расхода ТЭР соответственно; \bar{x}, \bar{y} – их выборочные средние значения; S_x^2, S_y^2 – их выборочные дисперсии.

На втором этапе предусматривается оценка изменения частоты выборок в результате внедрения ОТМ. Расчет ведется с применением критерия Вилкоксона по ранее приведенным формулам (4.7) и (4.8).

На третьем этапе выполняется оценка изменения СКО выборок с применением критерия Лемана – Розенблатта:

$$A_{\text{набл}} = \frac{1}{mn(m+n)} \left[m \sum_{i=1}^m (r_i - i)^2 + n \sum_{j=1}^n (s_j - j)^2 \right] - \frac{4mn-1}{6(m+n)}, \quad (5.15)$$

Для расчета наблюдаемого значения критерия необходимо сформировать из выборок фактического и скорректированного базового расхода ТЭР единую (общую) выборку и ранжировать ее элементы. В этом случае r_i и s_j будут являться рангами x'_i и y'_j в указанной общей выборке.

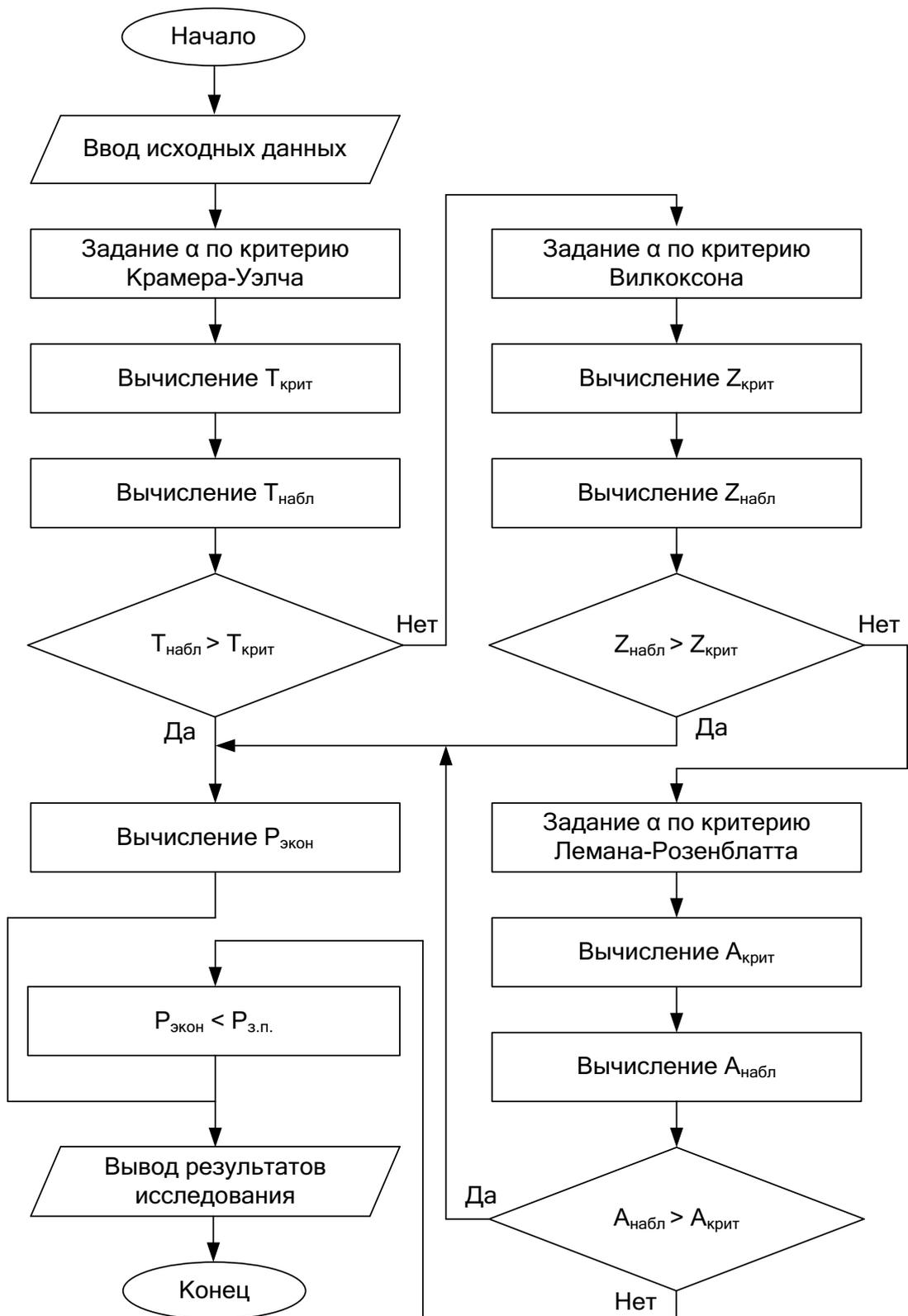


Рисунок 5.14 – Алгоритм сравнения выборок значений скорректированного и фактического расхода ТЭР, основанный на непараметрических методах математической статистики

В случае, если закон распределения выборок является нормальным, то целесообразно применять критерий Стьюдента для сравнения выборочных средних, наблюдаемое значение которого определяется по формуле:

$$t = (\bar{x} - \bar{y}) \left(\frac{S_x^2}{m} + \frac{S_y^2}{n} \right)^{-1/2}, \quad (5.16)$$

и критерий Фишера:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}, \quad (5.17)$$

где S_1^2, S_2^2 – наибольшее и наименьшее значение из S_x^2, S_y^2 .

Если наблюдаемые значения оказываются больше критических, то принимается гипотеза о различии рассматриваемых выборок, следовательно, внедрение ресурсосберегающего ОТМ привело к изменению расхода ТЭР, и, следовательно, к его экономии. В ином случае следует сделать вывод, что внедрение энергосберегающего мероприятия не привело к значимому снижению расхода ТЭР.

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.

Пример 4. Установка теплоотражающих панелей за отопительными приборами. Оценка эффекта от реализации данного мероприятия осуществляется исходя из ожидаемого снижения потерь тепловой энергии через наружную стену здания. Ожидаемый эффект не превышает случайных колебаний расхода тепловой энергии, поэтому экономия ТЭР определяется расчетным способом:

Потери теплоты через наружную стену до установки теплоотражающих панелей за отопительными приборами в базовый период определяется по формуле, Гкал:

$$Q_{\text{потери}}^{\text{баз}} = (t_{\text{ст/бат}}^{\text{ср}} - t_{\text{нар}}^{\text{ср}}) \cdot \frac{s \cdot h}{\frac{1}{\lambda_{\text{вн/огр}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{огр/нар}}} + \frac{L_{\text{ст}}^{\text{отд}}}{\lambda_{\text{ст}}^{\text{отд}}} + \frac{L_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{L_{\text{ст}}^{\text{наруж}}}{\lambda_{\text{ст}}^{\text{наруж}}}} \cdot n^{\text{баз}} \cdot N \cdot 24 \cdot 0,86 \cdot 10^{-3}. \quad (5.18)$$

Потери теплоты через наружную стену после установки теплоотражающих панелей за отопительными приборами в отчетный период определяется по формуле, Гкал:

$$Q_{\text{потери}}^{\text{отч}} = \lambda_{\text{экр}} \cdot (t_{\text{внут}}^{\text{ср}} - t_{\text{нар}}^{\text{ср}}) \cdot s \cdot h \cdot n^{\text{отч}} \cdot N \cdot 24 \cdot 0,86 \cdot 10^{-3}. \quad (5.19)$$

Эффект в натуральном выражении определяется по формуле, Гкал:

$$\Delta Q = Q_{\text{потери}}^{\text{баз}} - Q_{\text{потери}}^{\text{отч}}. \quad (5.20)$$

В формулах (5.18), (5.19) применяются следующие обозначения: N – количество теплоотражающих панелей за отопительными приборами; s и h – ширина и высота отопительных приборов; $t_{\text{ст/бат}}^{\text{ср}}$ – средняя температура воздуха между стеной и батареей; $t_{\text{внут}}^{\text{ср}}$ – температура воздуха внутри помещения; $t_{\text{нар}}^{\text{ср}}$ – температура атмосферного воздуха за отопительный сезон; $\lambda_{\text{вн/огр}}$ – коэффициент теплоотдачи от внутреннего воздуха к ограждению; $\lambda_{\text{огр/нар}}$ – коэффициент теплоотдачи от ограждения к атмосферному воздуху; $\lambda_{\text{экр}}$ – коэффициент теплопроводности материала отражающего экрана; $n^{\text{баз}}$ и $n^{\text{отч}}$ – продолжительность отопительного сезона в базовом и отчетном периоде; $\lambda_{\text{ст}}^{\text{отд}}$ – коэффициент теплопроводности материала стен (внутренней отделки); $\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности материала стен; $\lambda_{\text{ст}}^{\text{наруж}}$ – коэффициент теплопроводности материала стен (наружного утеплителя), $L_{\text{ст}}^{\text{отд}}$ – толщина внутренней отделки стен; $L_{\text{ст}}$ – толщина стен; $L_{\text{ст}}^{\text{наруж}}$ – толщина наружного утеплителя стен.

По результатам оценки фактически достигнутого эффекта ответственный исполнитель СП формирует отчет об экономии ТЭР и прикрепляет его в АИС «Энергоэффективность».

5.3 Апробация методов оценки энергетической эффективности организационных, технических и технологических решений, применяемых при организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте

Предлагаемый подход был апробирован в ходе выполнения договора № 275-13 «Сравнительный анализ эффективности внедрения инновационных систем экономии электроэнергии на объектах ОАО «РЖД», заключенным между ОмГУПС и ОАО «РЖД», в 2013 – 2014 гг. [272, 278]. В качестве объекта исследования принята распределительная подстанция Депо Свердловской железной дороги, на фидере РП-449-2 которой было смонтировано энергосберегающее устройство FORCE. Производитель устройства (Enross, Республика Корея) в технико-экономическом обосновании заявляет потенциальную экономию электроэнергии от 7 до 15 %.

Схема питания фидера РП-449-2 РП Депо и монтажная схема подключения энергосберегающего устройства приведены на рисунках 5.15 и 5.16.

Согласно разработанной классификации, рассматриваемое мероприятие относится к третьей группе. Оценка энергоэффективности должна выполняться с применением корректировки на основе формирования математической модели расхода ТЭР.

При нормальной схеме питания от фидера РП-449-2 получают питание три трансформаторных подстанции (ТП-4611, ТП-4659, ТП-4748), а также объекты, непосредственно подключенные к шинам 0,4 кВ РП-449 (рисунок 5.15).

Для разработки математической модели электропотребления организован сбор исходных данных о посуточном расходе электроэнергии по ф. 2 РП-449 и всем отходящим фидерам, а также о факторах, которые могут оказать влияние на расход электрической энергии: объеме производственной деятельности структурных подразделений, получающих питание от ф. 2 РП-449, температуре воздуха, продолжительности светового дня в период с мая по сентябрь 2013 года.

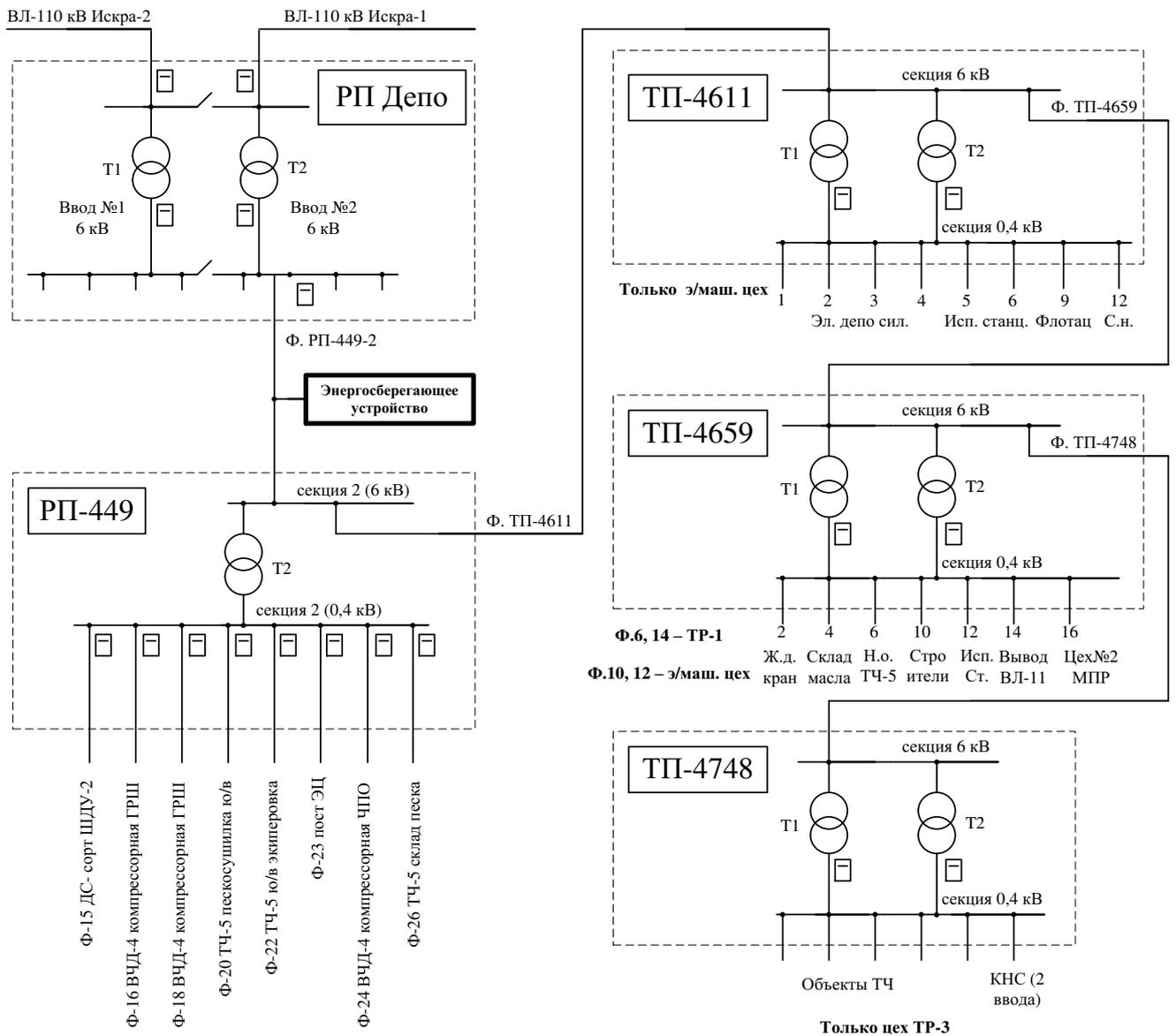


Рисунок 5.15 – Схема питания фидера РП-449-2 РП Депо

Динамика расхода электрической энергии за рассматриваемый период по всем присоединениям представлена на рисунке 5.17.

Наибольшая доля от общего расхода приходится на трансформаторные подстанции ТП-4611 (44,6 %), ТП-4659 (24,3 %), ТП-4748 (10,7 %). Эти подстанции питают объекты локомотивного ремонтного депо ТЧР-33 (соответственно электромашинный цех, цех ТР-1 и испытательную станцию, цех ТР-3). Из рисунка 5.17, а видно, что за рассматриваемый период наблюдается некоторое увеличение расхода электроэнергии по всем трем подстанциям, что обусловлено сезонным фактором. Так, коэффициенты корреляции между электропотреблением и продолжительно-

стью светового дня для указанных цехов находятся в интервале 0,34 – 0,4. Зависимость от температуры воздуха слабая и коэффициенты корреляции не превышают значения 0,13.

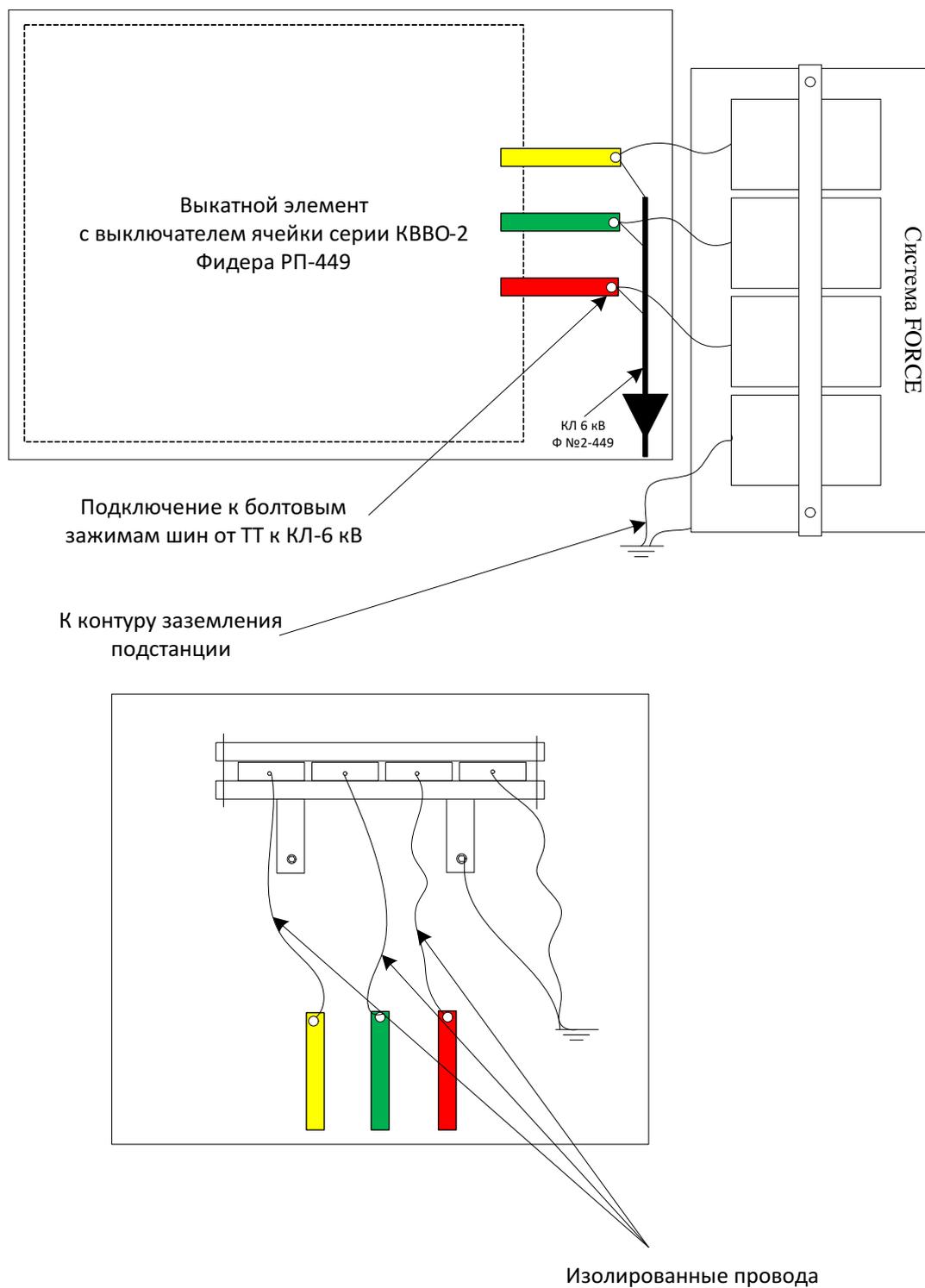
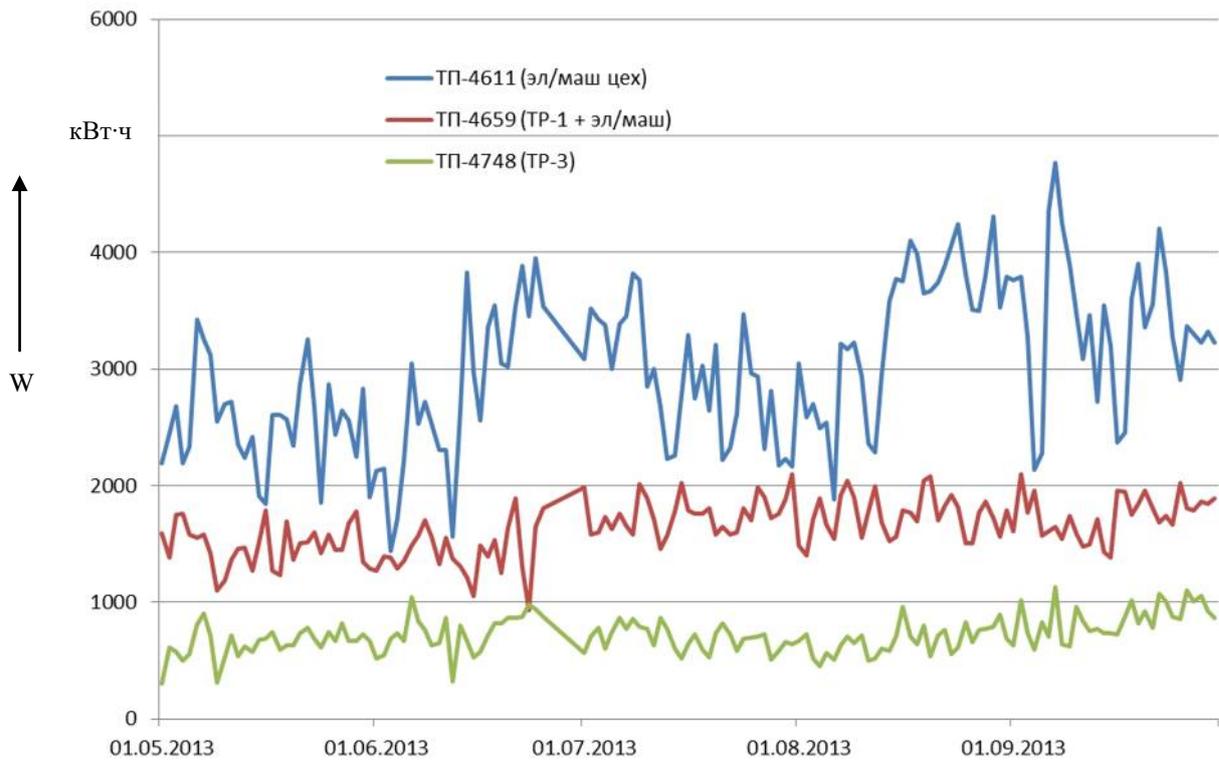
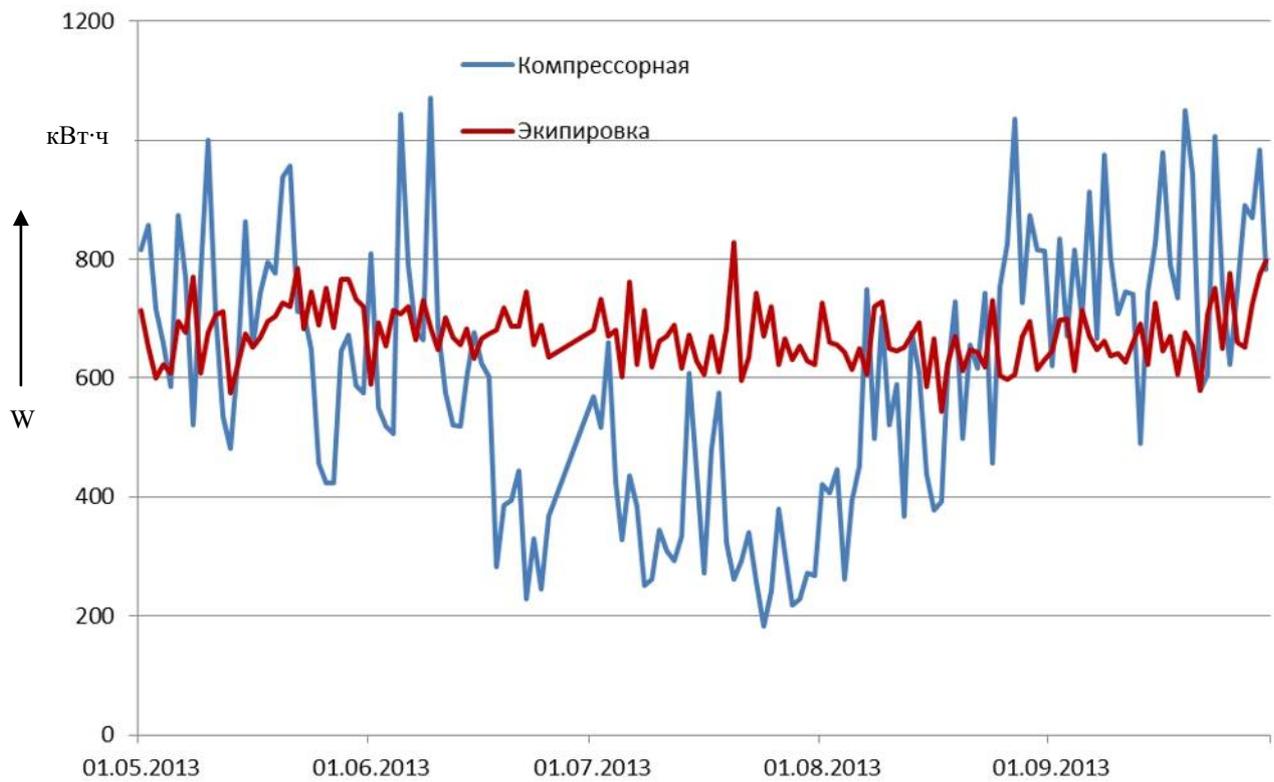


Рисунок 5.16 – Монтажная схема подключения энергосберегающего устройства

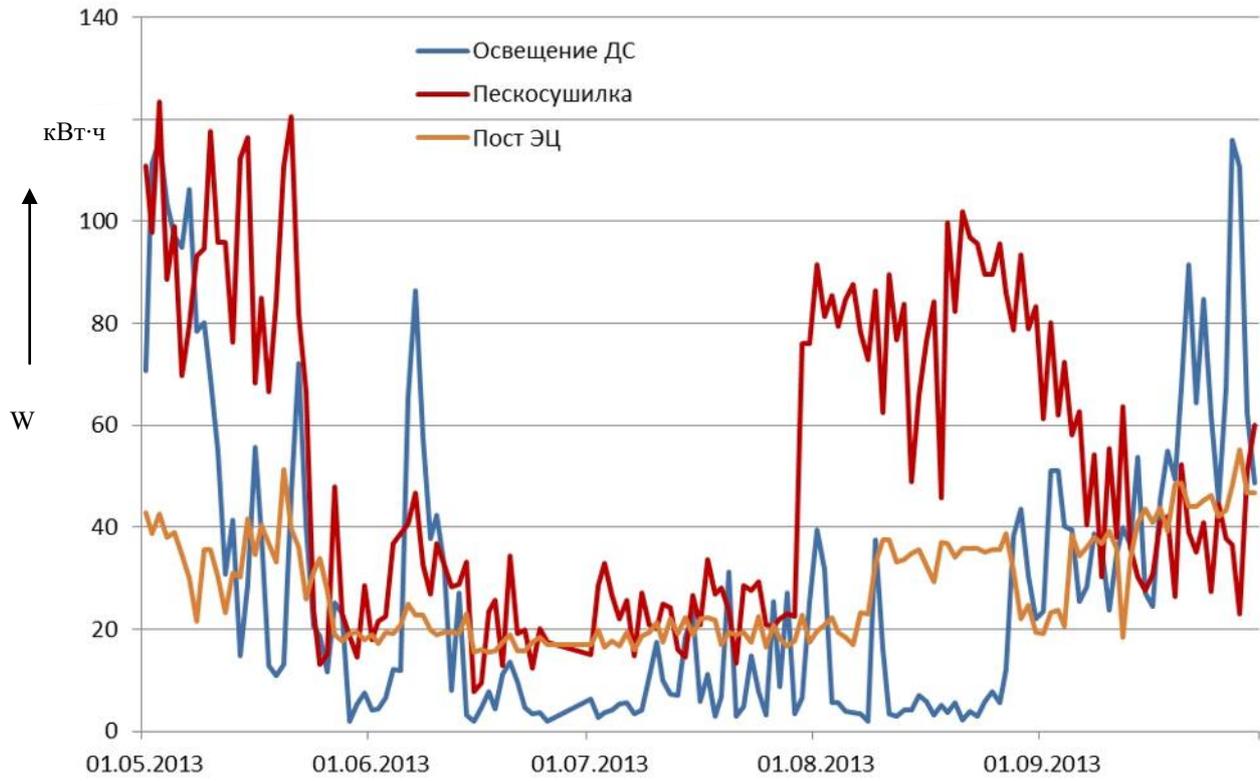


а)

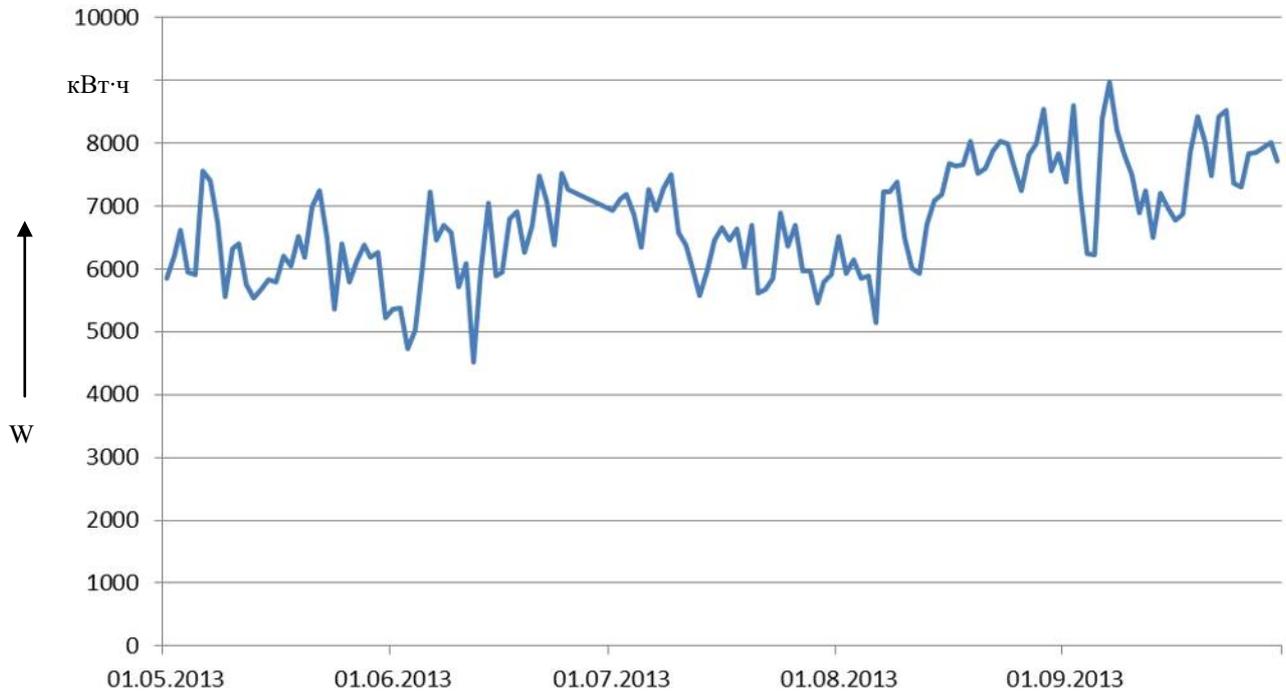


б)

Рисунок 5.17, лист 1 – Динамика расхода электрической энергии по потребителям ф. РП-449-2



в)



г)

Рисунок 5.17, лист 2 – Динамика расхода электрической энергии по потребителям
ф. РП-449-2

В то же время разброс расхода электроэнергии для ТП-4659 и ТП-4748 остается достаточно стабильным, а коэффициенты корреляции между расходом электроэнергии и объемом работ по цехам ТР-1 и ТР-3 сравнительно невелики и равны 0,2 и 0,06 соответственно. Однако для ТП-4611 наблюдается значительный размах расхода электроэнергии и сильная зависимость между электропотреблением и объемом работ электромашинного цеха (коэффициент корреляции 0,5, рисунок 5.18).

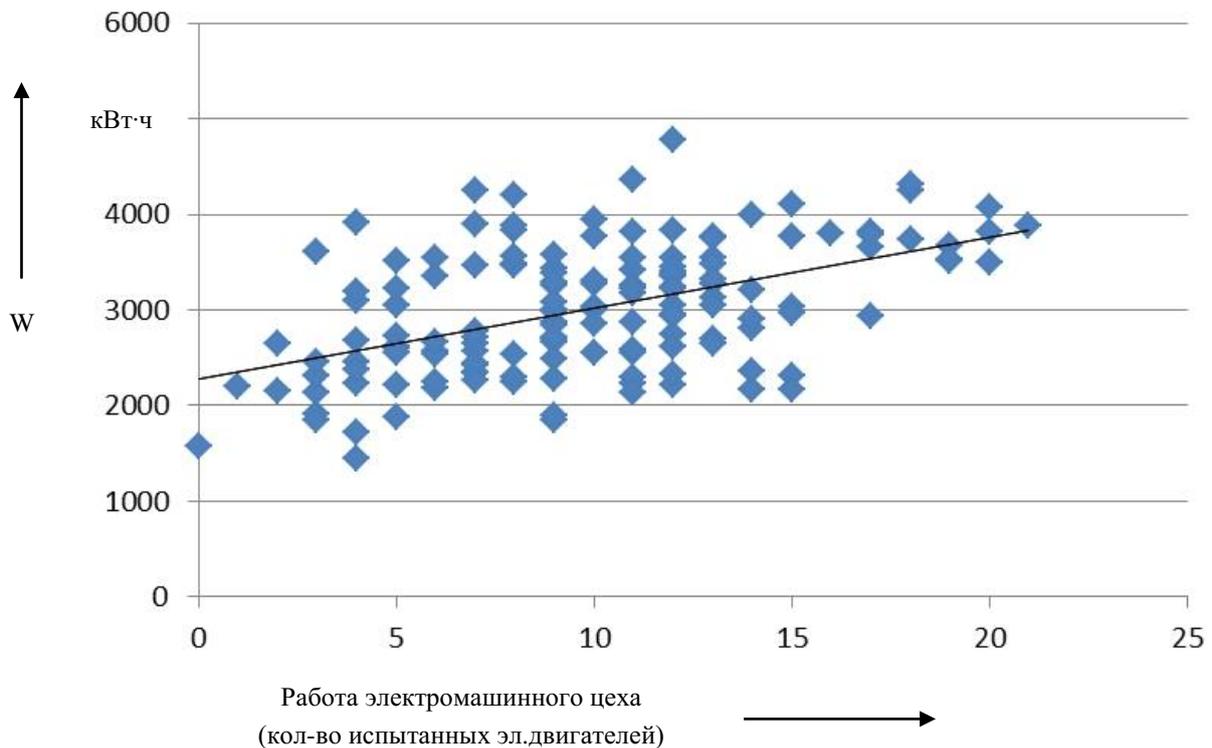


Рисунок 5.18 – Зависимость расхода электроэнергии от выполняемой работы в электромашинном цехе (ТП-4611)

Расход электрической энергии в производственном процессе объекта «Экипировка» ТЧР-33 является стабильным во времени (рисунок 5.17, б). Доля этой составляющей от общего электропотребления равна 10 %. Корреляция с сезонными факторами очень слабая ($r_{wx} \leq 0,1$). Для данного объекта расход электрической энергии принят постоянным и равным среднему за период исследования значению.

Остальные объекты, получающие питание от ф. РП-449-2, имеют различную хозяйственную принадлежность (компрессорная ВЧДЭ-4, пескосушилка ТЧР-33,

освещение ДС, пост ЭЦ – рисунок 5.17, в, г). Доля этих объектов в общем расходе электроэнергии равна 10,5 %. Для них наблюдается сильная зависимость расхода электроэнергии от температуры (рисунок 5.19).

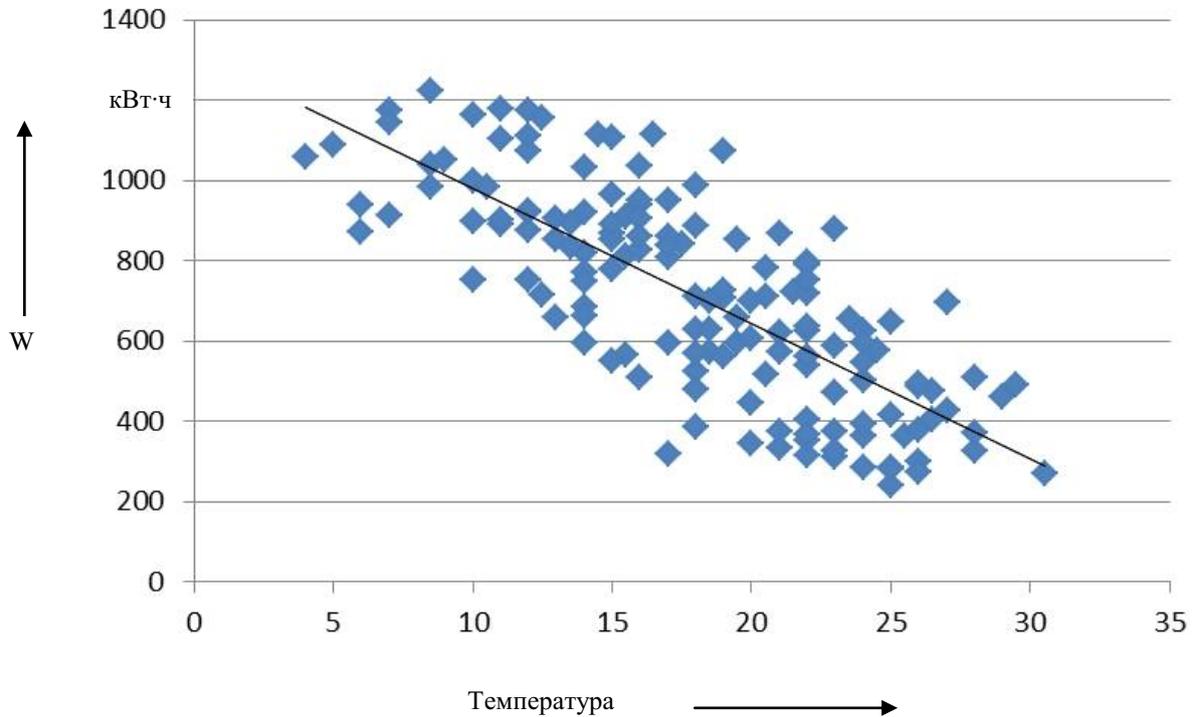


Рисунок 5.19 – Зависимость суммарного расхода электроэнергии по объектам «Компрессорная», «Пескосушилка», «Освещение ДС», «Пост ЭЦ» от температуры воздуха

Учитывая изложенное, разработаны математические модели процесса электропотребления фидера РП-449-2 с применением ИНС согласно методологии, изложенной в главах 3 и 4. Для этого была выполнена декомпозиция объекта на пять составляющих и сформированы следующие модели:

1. Зависимость суточного расхода электрической энергии по ТП-4611 (электромашинный цех) от продолжительности светового дня $T_{св.дня}$ и количества отремонтированных тяговых двигателей $V_{произв}$.

2. Зависимость суточного расхода электрической энергии по ТП-4659 (цех ТР-1) от продолжительности светового дня $T_{св.дня}$ и объема ремонта локомотивов ТР-1 $V_{произв}$.

3. Зависимость суточного расхода электрической энергии по ТП-4748 (цех ТР-3) от продолжительности светового дня $T_{св.дня}$ и объема ремонта локомотивов ТР-3 $V_{произв}$.

4. Зависимость суточного расхода электрической энергии по прочим объектам («Компрессорная», «Пескосушилка», «Освещение ДС», «Пост ЭЦ») от температуры воздуха t .

5. Расход электрической энергии по объекту «Экипировка» принят постоянным и равным 671 кВт·ч.

Как видно из рисунка 5.20, разработанная модель достаточно адекватно позволяют оценить расход электрической энергии, при этом результирующая относительная погрешность составила 1,2 %. Таким образом, указанные модели можно использовать для оценки технического эффекта от внедрения энергосберегающего мероприятия.

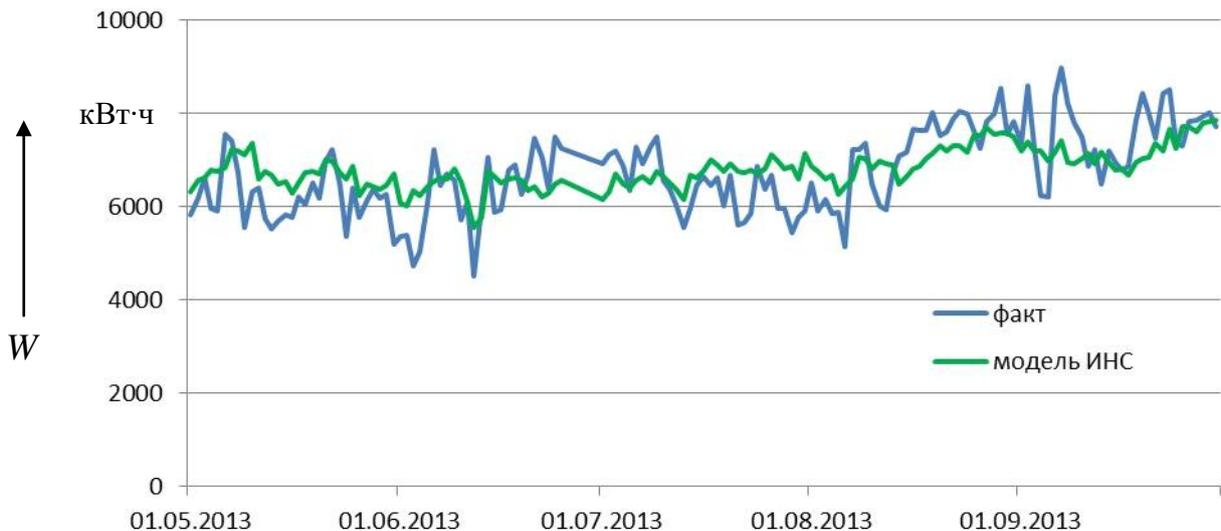


Рисунок 5.20 – Сравнение фактического и смоделированного с применением ИНС базового расхода электрической энергии по фидеру 449-2 РП Депо до внедрения энергосберегающего устройства

В течение октября 2013 г. осуществлялась приработка устройства, а начиная с 01.11.2013 г. выполнен ежесуточный сбор данных о расходе электроэнергии, объеме ремонта локомотивов, температуре воздуха и продолжительности дня после внедрения энергосберегающего устройства. Произведено сравнение

фактического и смоделированного расхода электрической энергии для двух разработанных моделей. Результаты сравнения представлены в таблице 5.4 и рисунке 5.21.

Таблица 5.4 – Сравнение фактических и смоделированных расходов электрической энергии после внедрения энергосберегающего мероприятия

Дата	Расход электроэнергии, кВт·ч		Экономия электроэнергии, кВт·ч
	фактический	смоделированный ИНС	
01.11.2013	7552,8	7490,5	-62,3
02.11.2013	7485,2	7903,6	418,4
03.11.2013	8049,2	7707,1	-342,1
04.11.2013	6906,6	7551,5	644,9
05.11.2013	6539,9	7520,4	980,5
06.11.2013	6373,0	7488,0	1115,0
07.11.2013	6671,5	7345,7	674,3
08.11.2013	7280,1	7354,9	74,7
09.11.2013	8079,6	7664,7	-414,9
10.11.2013	7258,5	7742,2	483,6
11.11.2013	7700,5	7457,8	-242,7
12.11.2013	7390,9	7608,8	217,9
13.11.2013	7608,3	7633,2	24,9
14.11.2013	7518,5	7612,6	94,0
15.11.2013	8048,1	7510,1	-538,0
16.11.2013	7079,6	7552,6	473,1
17.11.2013	7156,9	7668,7	511,8
18.11.2013	6771,1	7448,5	677,3
19.11.2013	6939,4	7647,1	707,7
20.11.2013	7005,6	7855,1	849,5
21.11.2013	7745,8	7855,6	109,8
22.11.2013	7102,0	7750,2	648,2
23.11.2013	6415,9	7837,3	1421,4
24.11.2013	6568,7	7497,0	928,3
25.11.2013	7431,4	7537,6	106,1
26.11.2013	6295,9	7626,4	1330,5
27.11.2013	7019,1	7754,5	735,4
28.11.2013	7368,1	7786,5	418,4
29.11.2013	8153,5	7605,6	-547,9
30.11.2013	6793,2	7765,8	972,5
01.12.2013	6919,4	7699,7	780,3
02.12.2013	7606,2	7817,1	210,9
03.12.2013	8811,1	7787,7	-1023,4
04.12.2013	7750,7	7803,5	52,9
05.12.2013	8476,5	8008,8	-467,8
06.12.2013	8781,7	7989,6	-792,1
07.12.2013	8567,1	8081,3	-485,9
08.12.2013	7853,8	7959,6	105,7
Итого, кВт·ч			10851,2
Итого, %			3,9

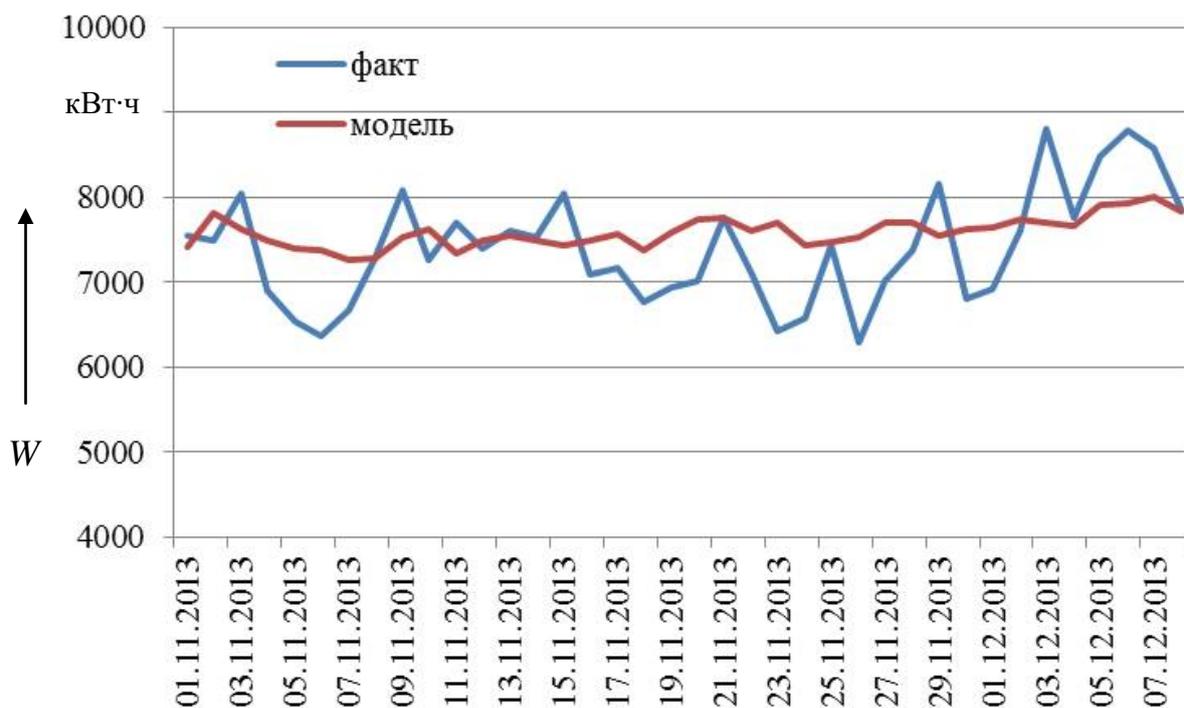


Рисунок 5.21 – Сравнение фактического и смоделированного с применением ИНС базового расхода электрической энергии по фидеру 449-2 РП Депо после внедрения энергосберегающего устройства

В соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 5.7, выполнена проверка гипотезы о нормальном законе распределения выборки значений расхода электроэнергии РП Депо. Наблюдаемое значение критерия Пирсона составило 7,15, а критическое для доверительной вероятности 0,99 – 15,09. Следовательно, можно принять гипотезы о нормальном законе распределения указанной выборки (рисунок 5.22).

Оценка значимости различия выборок фактического и смоделированного расхода электроэнергии осуществляется путем расчета наблюдаемых значений критерия Стьюдента и Фишера по формулам (5.12) и (5.13) и сравнения их с критическими значениями.

По результатам анализа выборок установлено, что наблюдаемое значение критерия Стьюдента (2,57) оказалось меньше критического (2,71), что говорит о том, что эффект от реализации мероприятия статистически не значим, несмотря

на то, что экономия электроэнергии, рассчитанная по таблице 5.4, составила 3,9 %.

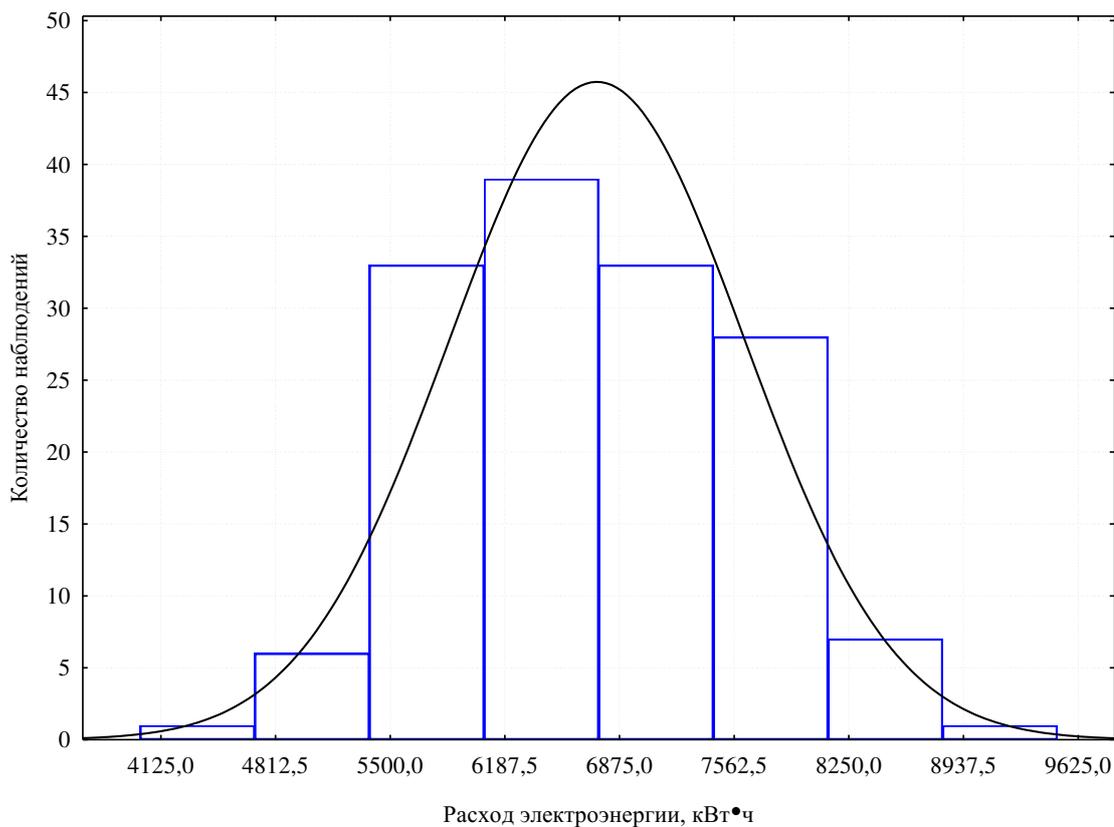


Рисунок 5.22 – Гистограмма закона распределения для фидера РП-449-2 РП Депо

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

В случае, если бы оценка эффекта от внедрения осуществлялась бы по методу, предусмотренному для первой группы мероприятий, то есть путем сравнения фактических расходов электроэнергии за периоды 01.11.2013 – 08.12.2013 и 01.11.2012 – 08.12.2012 без сопоставления внешних условий, то эффективность была бы определена на уровне 99664 кВт·ч или 26,2 %, что могло привести к ошибочному заключению об эффективности внедренного энергосберегающего устройства.

Аналогичные исследования были выполнены автором для других производственных процессов на железнодорожном транспорте применительно к объектам Западно-Сибирской и Свердловской ж.д. Их результаты, приведенные в

работах [269], [270], [272], [275 – 278], доказали возможность применения предлагаемых принципов оценки эффективности организационных, технических и технологических решений, используемых при организации ресурсосберегающих производственных систем железнодорожного транспорта.

Положительные результаты использования предлагаемых методов оценки энергетической эффективности подтверждены актами об использовании результатов научных исследований и разработок в производстве (приложения Г, Д, Ж, З).

Таким образом, использование предлагаемых математических моделей, основанных на оценке влияния производственных и климатических факторов, позволяет объективно оценить технико-экономический эффект, достигаемый в результате внедрения ресурсосберегающих ОТМ, при этом адекватность рассматриваемых моделей подтверждена на действующем объекте Свердловской железной дороги. Следовательно, предлагаемый подход может быть применен для определения фактической экономии энергоресурсов, достигаемой при внедрении ресурсосберегающих ОТМ, а учет влияния производственных и климатических факторов позволит снизить риски ОАО «РЖД», связанные с внедрением неэффективных ОТМ.

5.4 Основные результаты и выводы

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.

На основе предложенных решений разработана «Унифицированная методика по расчету экономии топливно-энергетических ресурсов от реализации мероприятий программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности структурных подразделений ОАО «РЖД», утвержденная распоряжением Департамента технической политики ОАО «РЖД» №ЦТех-45 от 28.06.2019.

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

6 РАЗРАБОТКА СОСТАВЛЯЮЩИХ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА КАК РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

Холдинг «Российские железные дороги» (далее – Холдинг) является крупнейшим системообразующим элементом российской экономики, важнейшим звеном ее транспортной системы, осуществляющим более 45 % грузооборота и свыше 26 % пассажирооборота всей транспортной системы страны, обеспечивает формирование 1,5 % ВВП России, около 2 % налоговых поступлений в бюджетную систему, обеспечивает порядка 2,5 % от общего объема капитальных вложений в России. По состоянию на 15 ноября 2016 г. в состав Холдинга входит ОАО «РЖД» и 112 дочерних и зависимых обществ (ДЗО).

Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» впервые была разработана в 2003 году, практически в первый год образования компании. Необходимость актуализации первой редакции Энергетической стратегии ОАО «РЖД» возникла в 2008 году и была обусловлена существенными изменениями в экономике России, реформированием компании, переходом ее на холдинговую структуру управления активами, а также результатами экономического кризиса 2008 года, внесшего свои коррективы в объемы работ и энергопотребления железнодорожного транспорта. Результатом данной работы стало принятие в 2011 году Энергетической стратегии холдинга «РЖД» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года (далее – ЭС-2015).

За период с 2010 по 2015 годы проявился ряд обстоятельств, оказывающих существенное влияние на основные показатели производственной деятельности Холдинга. Связано это с возрастающими требованиями государства к повышению энергоэффективности субъектов отечественной экономики, непрерывно совершенствующейся нормативно-правовой базой в сфере электроэнергетики и железнодорожного транспорта, установлением приоритетов в сфере развития Сибири и Дальнего Востока, прошедшим этапом реформирования железнодорожного транспорта, динамикой стоимости энергоресурсов, определенной стагнацией рос-

сийской экономики и т.д. Кроме того, развитие Холдинга выявило узкие места, связанные с энергоэффективностью отдельных ее бизнес-процессов, влияющих не только на себестоимость основного вида деятельности – перевозочного процесса, но и на экономическую привлекательность оказываемых услуг сторонним потребителям (отпуск тепловой энергии, транзит электрической энергии и др.).

Таким образом, 2015 год является рубежом в реализации энергетической стратегии, что еще раз указывает на необходимость оценки достигнутых результатов и корректировки ее целевых параметров путем разработки актуализированного нормативного документа – Энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года (далее – ЭС-2020). Данная работа выполнена Омским государственным университетом путей сообщения с участием автора [279, 280, 322].

Основной целью ЭС-2020 является повышение технологического уровня бизнес-блоков Холдинга для максимально рационального использования энергетических ресурсов, минимизации негативного воздействия железнодорожного транспорта на окружающую среду и поддержания лидерских позиций Холдинга в области энергоэффективности железнодорожных пассажирских и грузовых перевозок среди транспортных компаний мира.

Одной из задач, решаемых в ходе разработки ЭС-2020, является анализ и прогнозирование ключевых показателей эффективности развития железнодорожного транспорта в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности с учетом итогов реализации Стратегии развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года, положений Стратегии научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года (актуализированная «Белая книга ОАО «РЖД») и других документов, а также на основе прогнозов развития энергетики и транспорта в России, глобальных тенденций в области энергоэффективных технологий, задач, выдвинутых Правительством Российской Федерации перед транспортным и энергетическим комплексами страны на период прогнозирования.

6.1 Анализ и прогнозирование ключевых показателей эффективности развития железнодорожного транспорта как ресурсосберегающей производственной системы

Долгосрочные прогнозы социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 года, разработанные Минэкономразвития России, предусматривают три сценария социально-экономического развития в долгосрочной перспективе – консервативный, инновационный и целевой (форсированный).

На этой базе сформированы три сценария реализации ЭС-2020, которые соответствуют сценариям развития, предусмотренным Стратегией развития Холдинга на период до 2030 года.

Консервативный (пессимистичный) базируется на консервативном сценарии долгосрочного прогноза социально-экономического развития Российской Федерации и предусматривает инерционное развитие Холдинга без существенной трансформации бизнес-модели и роста инвестиций в развитие. При этом темпы роста бизнеса Холдинга ограничиваются неснижением или ростом «узких мест» железнодорожной инфраструктуры. Грузооборот и пассажирооборот в этом случае растут низкими темпами (соответственно на 1,9 % и 0,9 % в год), что обеспечивает некоторое увеличение доли грузовых перевозок. Эксплуатационные показатели (среднесуточная производительность локомотивов, средний вес поезда, средняя участковая скорость и др.), показатели развития полигонов электрифицированных линий и высокоскоростного движения корреспондируются с консервативным вариантом Генеральной схемы развития сети железных дорог ОАО «РЖД» на период до 2020 и 2025 года, утвержденной в 2016 году (далее – Генсхема-2016).

Базовый сценарий также основывается на консервативном сценарии долгосрочного прогноза социально-экономического развития Российской Федерации, но при этом предусматривает минимально необходимое развитие инфраструктуры для удовлетворения спроса экономики на перевозки, увеличение пассажирских перевозок при увеличении мер господдержки в части развития пассажирского

комплекса и создания опорной сети скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралей. В базовом сценарии пассажирооборот растет более высокими темпами (2,4 % в год), чем грузооборот (2,1 % в год) за счет развития полигона высокоскоростного движения и повышения транспортной мобильности населения, что приведет к снижению доли грузового движения в общем объеме перевозочной работы. Данный сценарий корреспондируется с базовым вариантом Генсхемы-2016.

Оптимистичный сценарий базируется на инновационном сценарии долгосрочного прогноза социально-экономического развития Российской Федерации и предусматривает полное удовлетворение спроса на грузовые перевозки, динамичный рост пассажирских перевозок за счет активного развития высокоскоростных, скоростных и внутригородских перевозок при поддержке государства, в результате чего пассажирооборот растет высокими темпами (около 3,5 % в год), а грузооборот около 2,2 % в год. Данный сценарий корреспондируется с целевым вариантом Генсхемы-2016 и Генеральной схемой развития сети железных дорог ОАО «РЖД» на период до 2020 и 2025 года, утвержденной в 2015 году (далее – Генсхема-2015).

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 теплоснабжения и водоотведения; развитие электросетевого комплекса; развитие инфраструктурного комплекса, зданий и сооружений, нетяговой энергетики; развитие энергохозяйства дочерних и зависимых обществ; общее направление развития холдинга [330]. Выполнено прогнозирование показателей КПЭ₁, КПЭ₂, КПЭ₁₉ – КПЭ₂₄, для чего применялись рассмотренные ранее в главе 3 подходы, основанные на методах математической статистики, регрессионных моделях и методах машинного обучения.

Расчет прогнозных значений перевозочной работы осуществлялся на основе исходных данных, представленных в таблице 6.1. Кроме того, рассматривалась возможность использования и других исходных данных, таких как протяженность электрифицированных линий, доля электрической тяги в общей перевозочной работе, однако их применение не привело к существенному улучшению показателей точности моделей.

Таблица 6.1 – Исходные данные для прогнозирования объема перевозочной работы по видам тяги в Холдинге на период до 2030 года

Период	Грузооборот, млрд т·км $\sum PL$	Пассажиروоборот, млрд пасс-км $\sum AL$	Работа на элек- тротяге, млн т·км бр. $A_{эл}$	Работа на ди- зельной тяге, млн т·км бр. $A_{диз}$
2003	1750	157,6	2795420	550428
2004	1801,6	164,3	3007133	577427
2005	1858,1	170,9	3091109	595693
2006	1950,9	177,4	3233601	601205
2007	2090,3	173,4	3431251	631565
2008	2116,2	175,2	3491911	621637
2009	1865,3	151,5	3135263	513126
2010	2011,3	138,9	3325457	561349
2011	2127,8	139,8	3469882	596429
2012	2222,4	144,6	359426	616187
2013	2196,2	138,5	3542249	624722
2014	2298,6	128,8	3691300	627988
2015	2304,8	120,4	3663179	614658

На основе представленных данных был определена работа в приведенных тонно-километрах по формуле:

$$\sum PL_{прис} = \sum PL + K \sum AL, \quad (6.1)$$

где K – коэффициент приведения пассажиро-км к тонно-км.

На основе полученных выборок сформированы регрессионные модели, характеризующие зависимость перевозочной работы на электрической и дизельной тяге от работы в приведенных тонно-километрах.

Для электротяги:

$$A_{эл} = -441768 + 1611 \sum PL_{прив} . \quad (6.2)$$

Для дизельной тяги:

$$A_{диз} = 196061 + 169,6 \sum PL_{прив} . \quad (6.3)$$

Так как показатели точности моделей оказались на хорошем уровне (коэффициент корреляции для электрической тяги составил 0,98, а для дизельной тяги 0,80), то нет необходимости в использовании других методов моделирования (искусственные нейронные сети, метод опорных векторов и др.).

Для прогнозирования объема перевозочной работы на период до 2030 года использовалась информация о плановых значениях грузооборота и пассажирооборота, представленная Департаментом экономической конъюнктуры и стратегического развития (ЦЭКР) ОАО «РЖД» (таблицы 6.2 и 6.3).

Таблица 6.2 – Прогнозные значения эксплуатационного грузооборота в Холдинге на период до 2030 года, млрд т·км

Сценарий	2015	2020	2025	2030	Основной источник
Консервативный	2304,8	2443,5	2806,1	2968,7	Финплан, Генсхема-2016 (консерв.)
Базовый	2304,8	2486,5	2855,5	3021,0	Генсхема-2016 (базовый)
Оптимистичный	2304,8	2601,3	2895,5	3050,0	Генсхема-2015 (вар.2)

Актуальный прогноз грузо- и пассажирооборота принят при формировании проекта финансового плана и инвестиционной программы ОАО «РЖД» на 2017 год и на плановый период 2018 и 2019 годов (далее – Финплан) и Генсхемы-2016,

за исключением оптимистичного сценария прогноза грузооборота, принимаемого в соответствии с Генсхемой-2015.

Полученные в результате прогнозирования значения перевозочной работы на электрической и дизельной тяге приведены на рисунках 6.1 и 6.2, а для обоих видов тяги – на рисунке 6.3. Для сравнения приведены показатели перевозочной работы, представленные в предыдущей Энергетической стратегии на период до 2015 г. и на перспективу до 2030 г. (ЭС-2015).

Таблица 6.3 – Прогнозные значения пассажирооборота в Холдинге на период до 2030 года, млрд пасс·км

Сценарий	2015	2020	2025	2030	Основной источник
Консервативный	120,4	124,1	132,1	135,8	Финплан, Генсхема-2016 (консерв.).
Базовый	120,4	129,7	142,9	163,5	Генсхема-2016 (базовый)
Оптимистичный	120,4	134,9	152,7	183,1	Генсхема-2016 (целевой)

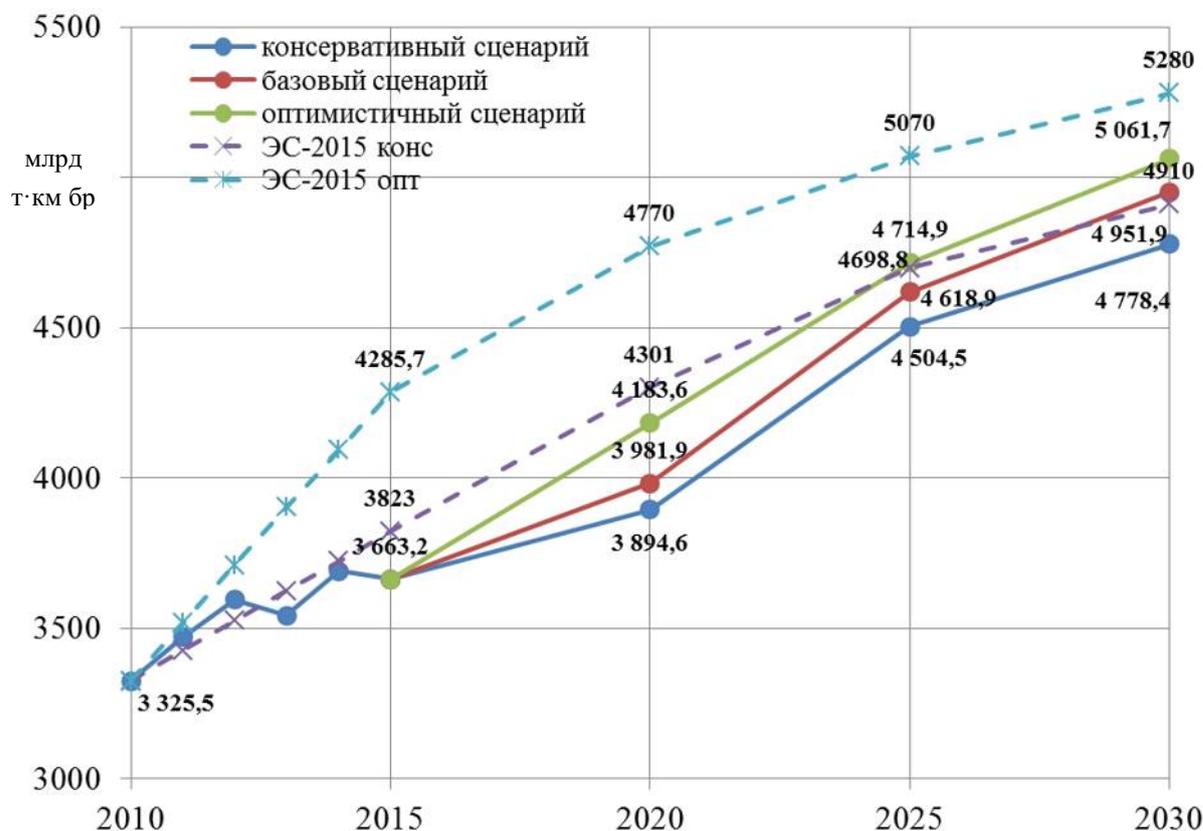


Рисунок 6.1 – Прогноз изменения объемов перевозочной работы в Холдинге на электрической тяге на период до 2030 года

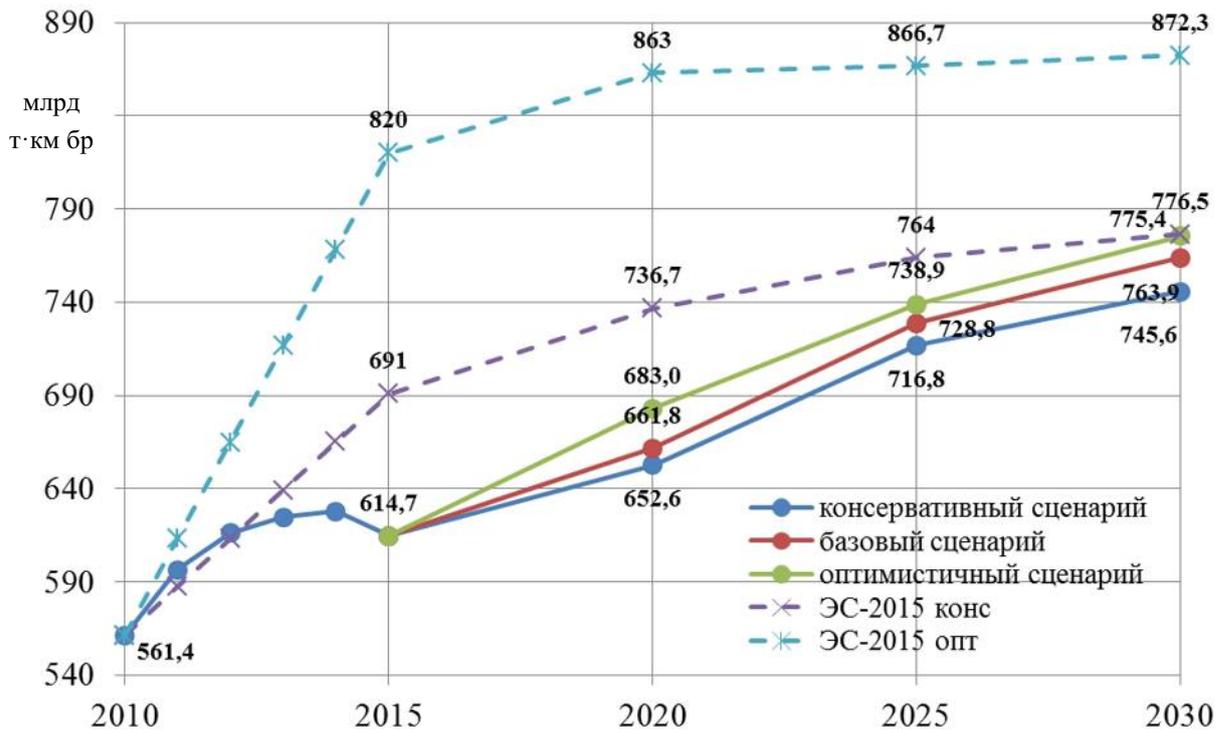


Рисунок 6.2 – Прогноз изменения объемов перевозочной работы в Холдинге на дизельной тяге на период до 2030 года

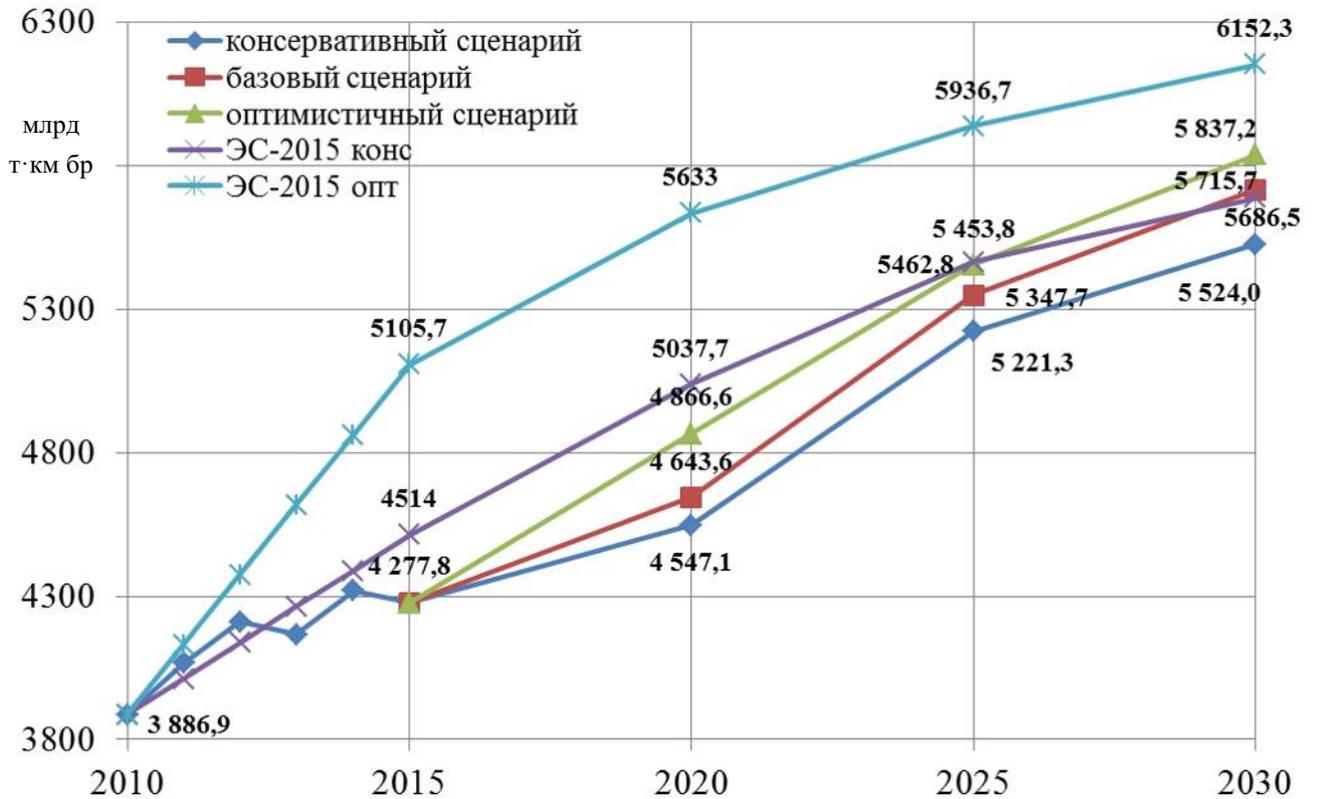


Рисунок 6.3 – Прогноз изменения объемов перевозочной работы в Холдинге на обоих видах тяги на период до 2030 года

Ожидается увеличение доли работы на электрической тяге с 0,856 в 2015 году до 0,866 в 2030 г. по базовому сценарию, что корреспондируется с планируемым увеличением протяженности электрифицированных участков. Кроме того, объемы перевозочной работы в обоих видах тяги ожидается ниже, чем прогнозные значения, установленные ЭС-2015.

Для формирования математических моделей, характеризующих зависимость удельного расхода ТЭР в расчете на единицу перевозочной работы, использовались ретроспективные исходные данные за период 2003 – 2015 годы (таблица 6.4). На основе корреляционного анализа были отобраны факторы, оказывающие наибольшее влияние на удельные энергозатраты на тягу поездов. К их числу относятся:

- объем перевозочной работы на электротяге и дизельной тяге (в дальнейшем обозначен X_1);
- эксплуатационная длина электрифицированных линий (X_2);
- средняя масса поезда (X_3);
- среднесуточная производительность локомотива (X_4);
- средняя участковая скорость (X_5);
- доля грузовой работы в общей приведенной работе (X_6).

С учетом принятых к рассмотрению факторов разработаны регрессионные модели, характеризующие зависимость удельного расхода ТЭР от указанных показателей, которые имеют вид:

$$w_{y\partial} = X_1 a_1 + X_2 a_2 + X_3 a_3 + X_4 a_4 + X_5 a_5 + X_6 a_6 + B, \quad (6.4)$$

где a_1 - a_6 , B – коэффициенты уравнения регрессии.

Значения коэффициентов уравнения рассчитаны с применением программы Statistica и приведены в таблице 6.5. При этом коэффициент корреляции для электрической тяги составил 0,993, а для дизельной тяги - 0,987. Т.к. коэффициенты корреляции оказались близки к 1, нет необходимости в применении других методов моделирования.

Таблица 6.4 – Исходные данные для прогнозирования удельных энергозатрат на тягу поездов на период до 2030 года

Показатель	Период												
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Пассажирооборот, млн пасс-км	157572,6	164272,2	170896,1	177410,0	173396,0	175166,6	151476,9	138892,6	139841,9	144612,1	138517,0	128820,0	120413,3
Грузооборот, млрд ткм	1750,0	1801,6	1858,1	1950,9	2090,3	2116,2	1865,3	2011,3	2127,8	2222,4	2196,2	2298,6	2304,8
УРЭ на электротяге, кВтч/10 тыс. ткм брутто	119,7	119,1	117,7	117,2	116,4	115,3	115,7	115,1	114,6	113,5	112,4	111,0	109,6
Расход электроэнергии на тягу поездов, млн кВт·ч	33464,4	36163,1	36784,8	38365,4	40497,5	40813,8	36641,8	38681,8	39766,6	40795,4	40160,0	40962,8	40159,4
Работа на электротяге, 10 тыс. ткм брутто, в т.ч.:	2795420,0	3007132,6	3091109,5	3233600,5	3431251,1	3491911,0	3135263,0	3325457,2	3469882,0	3594260,4	3542248,9	3691300,0	3663179,0
в пассажирском движении дальнего следования	223029,5	232378,6	241999,9	251651,5	253546,3	251396,2	225129,7	219439,6	221592,0	214674,5	204828,7	189816,5	188370,4
в грузовом движении	2457902,6	2653792,9	2735558,2	2868112,8	3058944,1	3117900,1	2798854,9	2994945,1	3148958,1	3215290,7	3172046,7	3334026,9	3308627,7
в хозяйственном движении	21222,1	23649,7	15661,2	13311,0	16204,3	19758,9	17487,9	20706,9	17756,2	18951,8	20885,4	17632,9	17498,5
в пригородном движении	92659,5	96618,8	95976,3	97902,7	98862,6	97982,4	89921,0	83280,9	80018,8	79017,1	77177,6	75610,7	75034,7
УРД на дизельной тяге, кг у.т./ 10 тыс. ткм брутто	68,6	68,3	67,8	68,3	67,0	66,9	66,3	64,1	63,4	62,8	59,9	58,9	57,7
Расход дизельного топлива на тягу поездов, тыс. т.	2602,6	2719,2	2785,1	2832,5	2916,3	2868,3	2345,7	2480,4	2607,0	2668,8	2582,9	2550,4	2445,6
Работа на дизельной тяге, 10 тыс. ткм брутто, в т.ч.:	550428,4	577426,9	595692,6	601205,1	631565,1	621637,4	513126,1	561348,9	596429,2	616187,3	624721,5	627988,4	614658,0
в грузовом движении	461566,3	485730,8	503369,9	510033,3	536434,6	523274,7	429462,7	476296,3	513775,6	534995,5	547603,1	557117,0	545291,0

Продолжение таблицы 6.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
в пассажирском движении дальнего следования	58467,6	60044,0	61306,1	61710,2	61825,8	60190,9	53501,7	52315,8	50889,6	48535,2	44677,4	42327,8	41429,3
в хозяйственном движении	20353,2	21794,1	19210,1	20034,4	22707,1	26684,2	21329,6	23065,0	24854,2	26666,4	26539,9	22405,6	21930,0
в маневровом движении	140,8	145,6	152,7	153,4	158,4	163,2	146,3	155,2	157,2	159,3	149,3	147,5	144,3
в пригородном движении	2221,6	2264,6	2229,0	2403,3	2519,4	2646,0	2466,2	2484,4	2820,9	2753,4	2670,0	2851,7	2791,2
Эксплуатационная длина электрифицированных линий, тыс. км	42,6	42,6	43,0	42,9	42,9	43,1	43,1	43,2	43,2	43,2	43,3	43,3	43,4
Среднесуточная произво- дительность локомотива, тыс. ткм брутто	1565,0	1615,0	1672,0	1706,0	1710,0	1736,0	1786,0	1631,0	1812,0	1791,0	1820,0	1965,0	2038,0
Средняя масса поезда брутто, тонн	3608,0	3670,0	3716,0	3747,0	3778,0	3815,0	3855,0	3867,0	3868,0	3891,0	3911,0	3929,0	3966,0
Средняя участковая ско- рость движения поездов, км/час	39,0	39,6	40,2	40,3	40,3	40,6	41,6	41,2	37,1	36,0	36,8	37,7	39,1
Время задержек грузовых поездов	10200,0	9204,0	8486,9	7870,3	8372,0	6747,0	7247,0	9707,6	9070,4	10648,7	12088,9	17881,6	13500,7
Время задержек пассажирских поездов	1200,0	1183,0	1032,0	937,7	903,3	1185,0	1738,0	1351,2	1176,7	905,3	863,3	1215,9	912,7
Время задержек пригородных поездов	1100,0	1034,0	638,0	489,0	656,4	561,6	482,0	635,3	490,2	559,7	495,5	852,7	663,5
Доля грузовой работы в общей приведенной работе	0,8199	0,8176	0,8161	0,8181	0,8341	0,8345	0,8376	0,8619	0,8686	0,8699	0,8739	0,8879	0,8955

Таблица 6.5 – Коэффициенты уравнения регрессии для прогнозирования удельных энергозатрат на тягу поездов

Коэффициент	Электротяга	Дизельная тяга
B	279,8433144	162,6326995
a_1	-0,0000020	-0,0000039
a_2	-2,5002181	0,0000000
a_3	-0,0071647	-0,0064651
a_4	0,0012712	0,0052860
a_5	-0,1187696	-0,0230648
a_6	-44,7541767	-122,0539347

Для прогнозирования удельного расхода ТЭР на тягу поездов на период до 2030 года использованы плановые значения объема перевозочной работы (рис. 6.1, 6.2), а также иных принятых к рассмотрению факторов в соответствии с основными стратегическими документами в области железнодорожного транспорта. В результате получены следующие значения удельного расхода ТЭР на тягу поездов (рисунки 6.4 и 6.5).

Как видно из представленных графиков, прогнозные удельные энергозатраты оказываются ниже, чем в ЭС-2015.

В соответствии с методикой МСЖД ключевыми показателями, определяющими энергоэффективность железнодорожного транспорта, являются [281]:

- удельный расход электрической энергии на тягу поездов в грузовом движении, кВт·ч/10 тыс. т·км нетто;
- удельный расход электрической энергии на тягу поездов в пассажирском движении, кВт·ч/10 тыс. пасс·км;
- удельный расход дизельного топлива на тягу поездов в грузовом движении, кг/10 тыс. т·км нетто;
- удельный расход дизельного топлива на тягу поездов в пассажирском движении, кг/10 тыс. пасс·км.

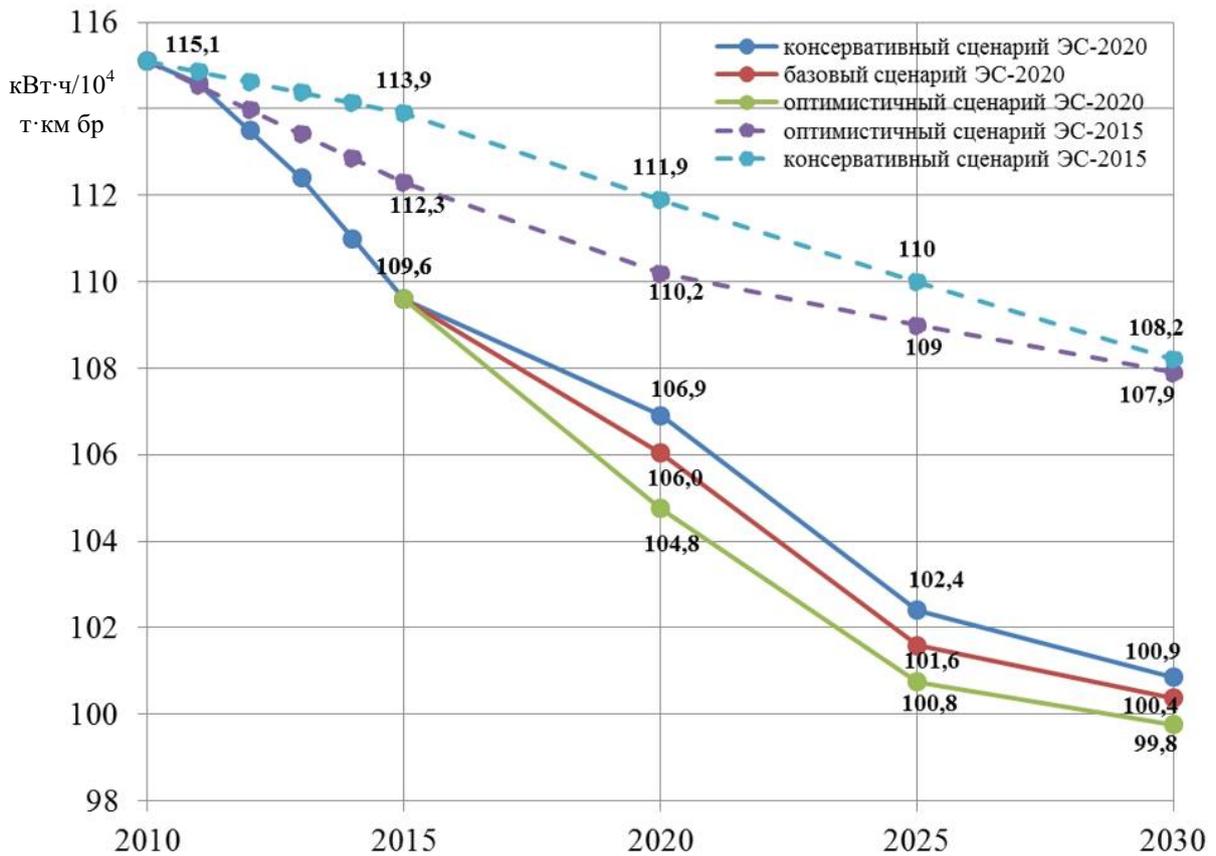


Рисунок 6.4 – Прогноз изменения удельного расхода электрической энергии на тягу поездов во всех видах движения на период до 2030 года

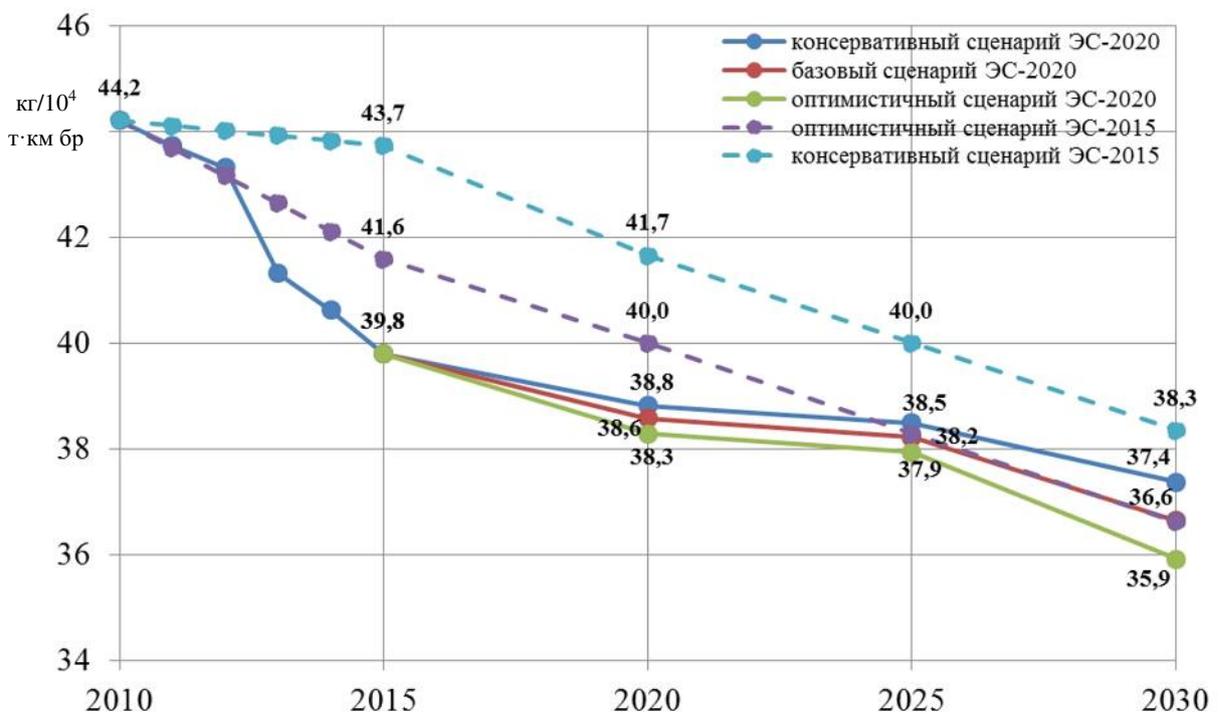


Рисунок 6.5 – Прогноз изменения удельного расхода дизельного топлива на тягу поездов во всех видах движения на период до 2030 года

На основе полученных значений расхода ТЭР на тягу поездов и прогнозных значений грузооборота и пассажирооборота, предоставленных ЦЭКР, сформированы прогнозные значения перечисленных показателей на период до 2030 года (рисунки 6.6 – 6.9).

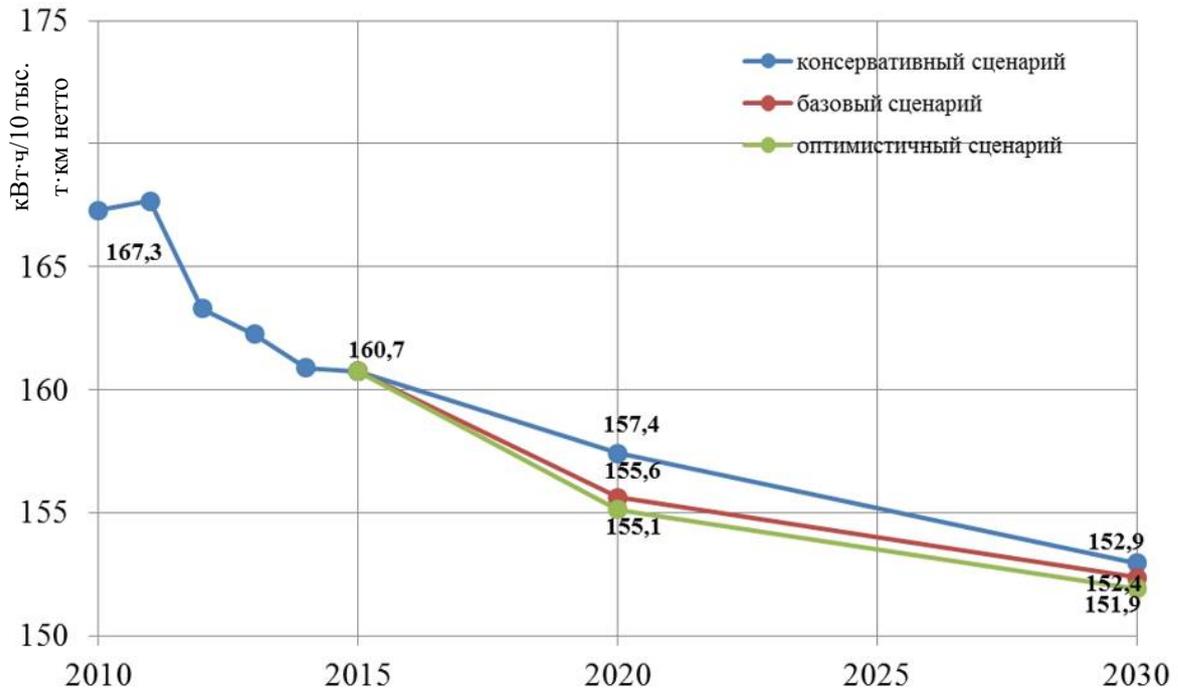


Рисунок 6.6 – Прогноз изменения удельного расхода электрической энергии на тягу поездов в грузовом движении на период до 2030 года

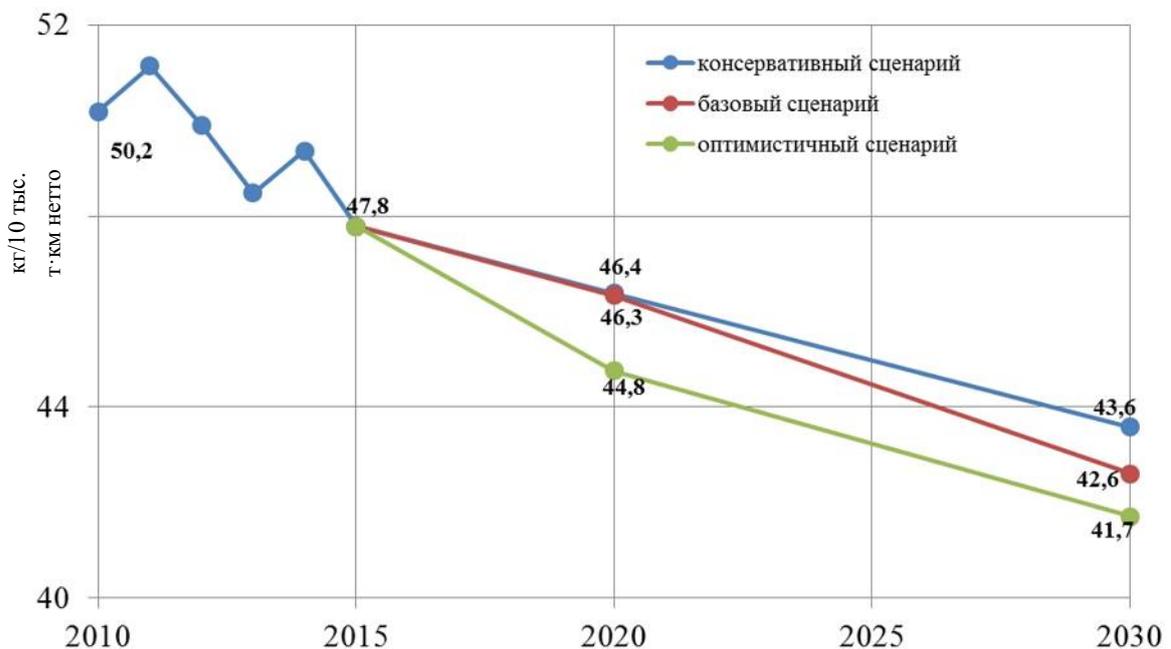


Рисунок 6.7 – Прогноз изменения удельного расхода дизельного топлива на тягу поездов в грузовом движении на период до 2030 года

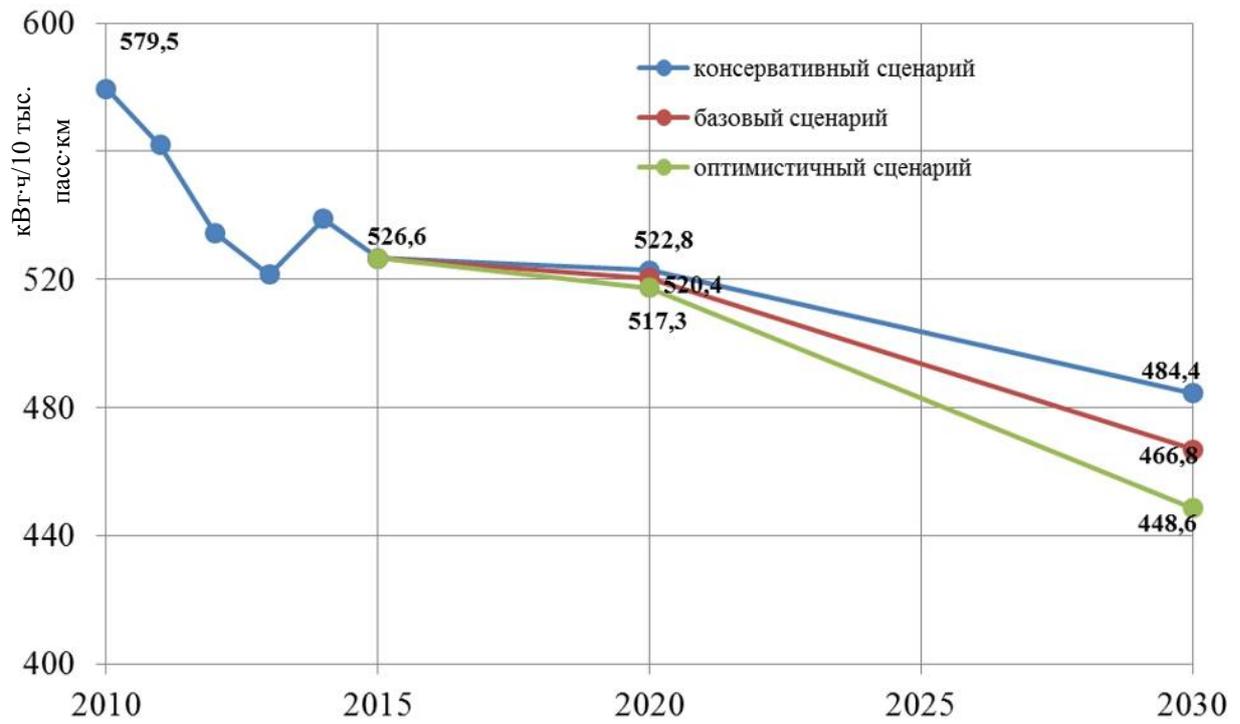


Рисунок 6.8 – Прогноз изменения удельного расхода электрической энергии на тягу поездов в пассажирском движении на период до 2030 года

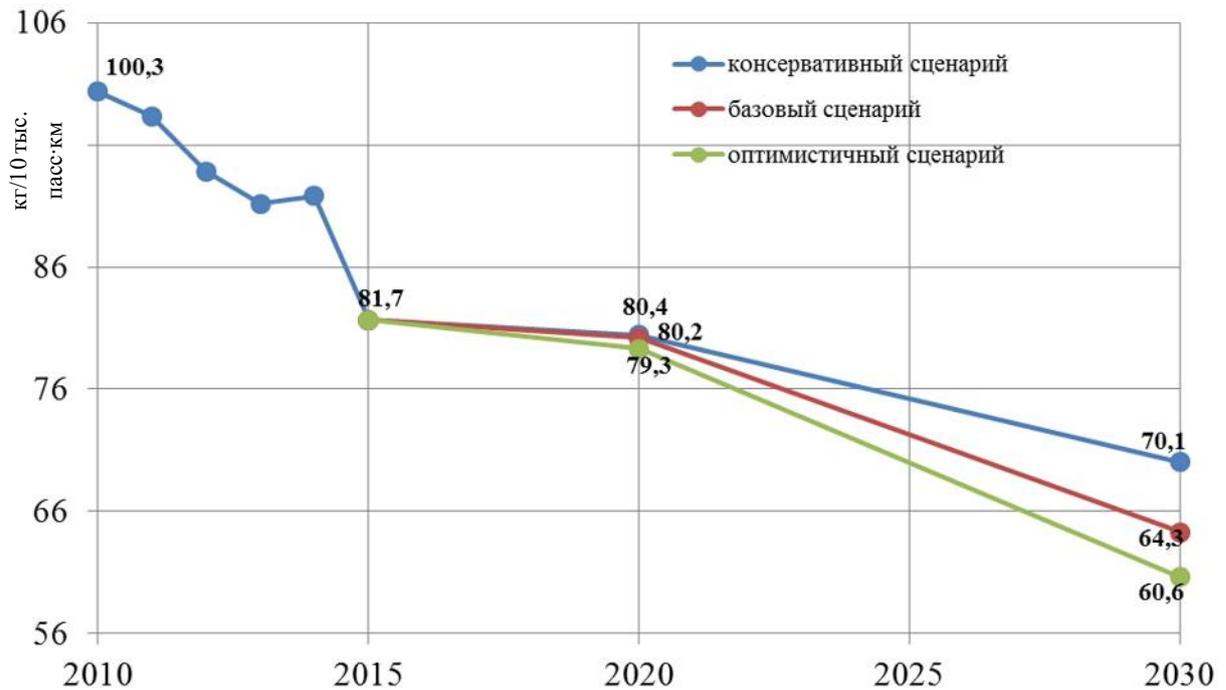


Рисунок 6.9 – Прогноз изменения удельного расхода дизельного топлива на тягу поездов в пассажирском движении на период до 2030 года

С учетом ожидаемых результатов реализации ЭС-2020 сформирован прогноз потребности Холдинга в ТЭР на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года (таблица 6.6). При этом учитывались плановые значения расхода энергоресурсов, имеющиеся в программах развития бизнес-единиц Холдинга, а также ожидаемые результаты экономии ТЭР в результате внедрения энерго- и ресурсосберегающих мероприятий. Стоимостная оценка выполнялась в ценах 2015 года.

Все рассмотренные сценарии прогнозируют постепенное увеличение доли энергопотребления на тягу поездов в общем энергетическом балансе с 79,8 % в 2015 году до 81,3 – 82,6 % в 2020 году и до 85,2 – 86,1 % в 2030 году.

Определение показателей энергоемкости и энергоэффективности Холдинга определялось на основе плановых значений расхода ТЭР (таблица 6.6) и планового значения общего объема работ и услуг ОАО «РЖД» в обычных видах деятельности, связанной с осуществлением перевозок грузов и пассажиров, предоставлением услуг инфраструктуры и локомотивной тяги, других видов работ и услуг, связанных с производственной деятельностью (далее – объем работ и услуг, связанных с производственной деятельностью) в прив. ткм нетто. В соответствии с «Методикой определения энергоемкости и удельной энергетической эффективности производственной деятельности ОАО «РЖД» [331] объем работ и услуг, связанных с производственной деятельностью, включает в себя следующие составляющие, приведенные в т.км нетто через соответствующие коэффициенты:

- эксплуатационный грузооборот;
- оплаченный порожний пробег собственного (арендованного) подвижного состава;
- пассажирооборот в дальнем следовании и в пригородном сообщении;
- объем работ и услуг ОАО «РЖД», связанных с неперевоочными видами производственной деятельности.

Таблица 6.6 – Прогноз потребности Холдинга в ТЭР

Вид ТЭР	Ед. изм.	2015 год (факт)	Консервативный сценарий		Базовый сценарий		Оптимистичный сценарий	
			2020 г.	2030 г.	2020 г.	2030 г.	2020 г.	2030 г.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Электроэнергия на тягу поездов	млн кВт·ч	40159,4	41634,2	48193,9	42221,8	49704,9	43823,6	50494,6
	млрд руб.	114,5	118,7	137,4	120,3	141,7	124,9	143,9
Дизельное топливо на тягу поез- дов	тыс. т	2445,9	2532,9	2786,0	2552,5	2799,0	2614,2	2785,1
	млрд руб.	77,4	80,2	88,2	80,8	88,6	82,7	88,2
Электроэнергия на нетяговые нужды	млн кВт·ч	5753,7	5499,8	4387,0	5397,0	4305,0	5140,0	4100,0
	млрд руб.	16,6	15,9	12,7	15,6	12,4	14,9	11,8
Дизельное топливо на нетяговые нужды	тыс. т	179,8	179,8	165,1	175	163,2	170,2	160,1
	млрд руб.	5,7	5,7	5,2	5,5	5,2	5,4	5,1
Уголь	тыс. т	915,8	790,6	713,5	756,2	682,5	687,5	620,4
	млрд руб.	1,8	1,5	1,4	1,5	1,3	1,3	1,2
Мазут	тыс. т	324,1	316,0	285,2	302,2	272,8	274,8	248,0
	млрд руб.	2,9	2,8	2,5	2,7	2,4	2,4	2,2

Продолжение таблицы 6.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Газ природный	млн куб.м	471,0	438,2	395,5	482,0	435,0	503,9	454,8
	млрд руб.	2,4	2,2	2,0	2,4	2,2	2,5	2,3
Газ сжиженный	тыс. т	1,5	2,3	5,9	4,1	11,3	7,7	22,1
	млрд руб.	0,03	0,04	0,11	0,08	0,21	0,15	0,42
Бензин автомобильный	тыс. т	75,8	70,5	65,6	69,8	64,2	68,2	63,1
	млрд руб.	2,9	2,7	2,5	2,6	2,4	2,6	2,4
Тепловая энергия со стороны	млн Гкал	2,2	2,1	2,0	2,1	2,0	2,1	2,0
	млрд руб.	3,2	3,0	2,9	3,0	2,9	3,0	2,9
Прочие виды топлива	млн т у.т.	4,6	4,6	4,2	4,6	4,2	4,6	4,2
	млрд руб.	0,010	0,010	0,009	0,010	0,009	0,010	0,009
Итого	млн т у.т.	21346,1	21686,2	23692,3	21879,4	24200,8	22355,3	24333,5
	ПДж	339,5	342,6	367,5	345,2	373,5	350,8	373,8
	млрд руб.	227,2	232,7	254,8	234,6	259,3	239,9	260,4

Если прогноз первых трех составляющих достаточно прост с учетом имеющихся данных о грузообороте и пассажирообороте (таблицы 6.2 и 6.3), то оценить прогнозный объем работ и услуг ОАО «РЖД», связанных с неперевозочными видами производственной деятельности, на период 2030 года затруднительно, так как этот показатель рассчитывается через соотношение доходов ОАО «РЖД» по неперевозочным видам деятельности и по обычным видам деятельности. Поэтому указанная составляющая сформирована на основе авторегрессионной модели с применением искусственных нейронных сетей.

Наилучшей конфигурацией ИНС стал многослойный персептрон типа MLP 1-3-1 с одним нейроном на входном и выходном слое и тремя на скрытом, типы активационных функций на скрытом слое – тангенциальная, на выходном – тождественная, коэффициент корреляции для обучающей выборки – 0,69. На основе сформированной ИНС рассчитан прогнозный объем работ и услуг ОАО «РЖД», связанных с неперевозочными видами производственной деятельности, а затем определены прогнозные значения объема работ и услуг, связанных с производственной деятельностью (таблица 6.7).

Таблица 6.7 – Прогнозные значения объема работ и услуг, связанных с производственной деятельностью, млрд прив. т·км нетто

Факт	Консервативный		Базовый		Оптимистичный	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030
3107,1	3 237,1	3 775,7	3 429,3	3 999,3	3 692,9	4 191,5

С учетом данных таблиц 6.6 и 6.7 рассчитаны прогнозные значения энергоемкости ОАО «РЖД» для различных сценариев развития, которые приведены на рисунке 6.10. Данный показатель устанавливается Федеральной антимонопольной службой в качестве основного целевого показателя энергоэффективности ОАО «РЖД».

Основные ожидаемые результаты реализации ЭС-2020 характеризуются следующими (относительно базового 2015 года) значениями:

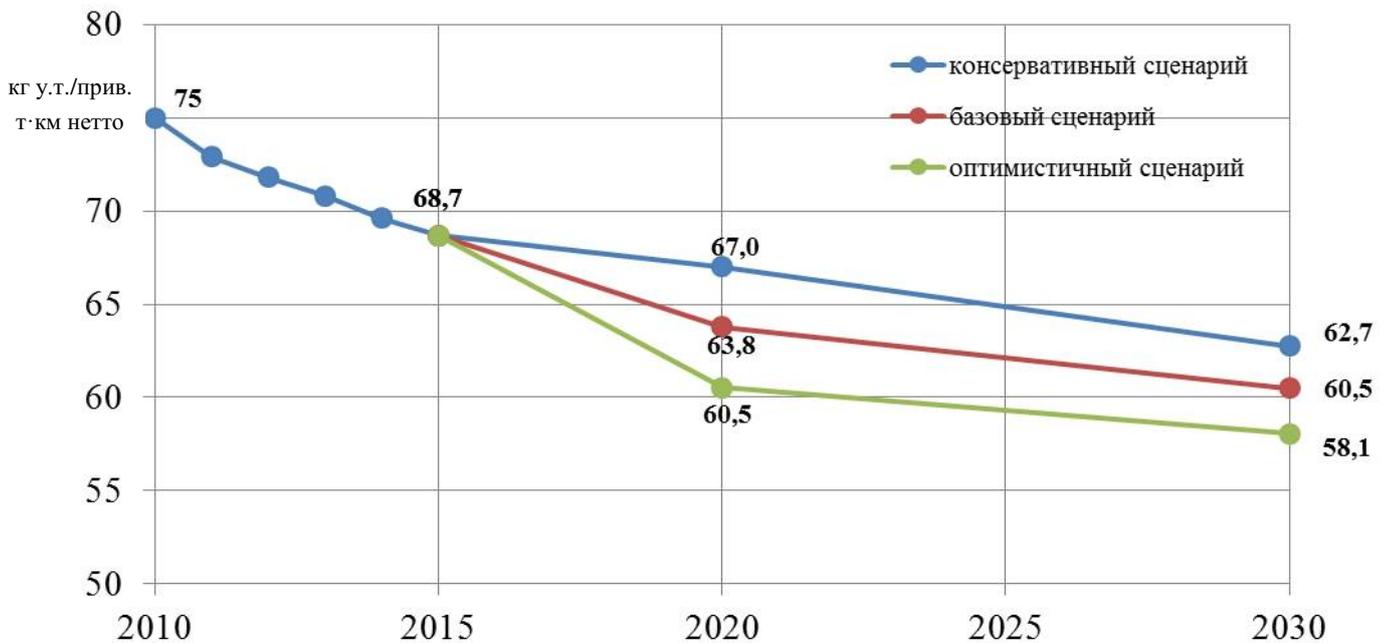


Рисунок 6.10 – Прогноз изменения энергоёмкости производственной деятельности Холдинга «РЖД» на период до 2030 года

1) при росте объема перевозочной работы на 29,1 – 36,5 % к 2030 году увеличение объемов потребления ТЭР в условном эквиваленте (т у.т.) составит 11 – 14 %;

2) в целом по Холдингу прогнозируемое снижение удельного расхода ТЭР на тягу поездов (относительно базового 2015 года) составит:

на электрической тяге –	к 2020 году – 2,5 – 4,4 %;
	к 2030 году – 8,0 – 9,0 %;
на дизельной тяге –	к 2020 году – 2,5 – 3,8 %;
	к 2030 году – 6,1 – 9,7 %.

3) энергоёмкость производственной деятельности холдинга «РЖД» к 2020 году снизится на 5,5 – 8,8 %, а к 2030 году – на 14,5 – 16,0 %;

4) экономия ТЭР, достигаемая в результате реализации ЭС-2020, к 2020 году оценивается в 670,4 – 1172,1 тыс. т у.т. (3,1 – 5,5 % к 2015 году), а к 2030 году в 2105,6 – 2525,0 тыс. т у.т. (9,9 – 11,8 % к 2015 году);

5) затраты на приобретение ТЭР за счет их экономии должны снизиться в 2020 году – на 6,3 – 11,2 млрд рублей и в 2030 году – на 20,1 – 25,3 млрд рублей в ценах 2015 года в сопоставимых с базовым годом условиях.

6.2 Верификация ключевых показателей эффективности развития железнодорожного транспорта как ресурсосберегающей производственной системы

Для оценки точности прогнозных значений ключевых показателей эффективности развития железнодорожного транспорта в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, определенных в п. 6.1, выполнена их верификация по итогам 2017 и 2018 гг.

На начальном этапе верификации необходимо оценить фактические значения основных производственных показателей Холдинга, влияющих на энергетическую эффективность, которые явились основой для формирования математических моделей. В связи с тем, что разработка ЭС-2020 предусматривала определение показателей для конкретных временных периодов (2020 г. и 2030 г.), прогноз-ные значения за 2017 и 2018 гг. рассчитаны методом интерполяции между значениями за 2015 г. (факт) и 2020 г. (прогноз).

Фактические значения основных производственных показателей Холдинга за 2017 и 2018 гг. выбраны на основе следующих документов:

годовой отчет ОАО «РЖД» за 2017 и 2018 гг.;

анализ использования ТЭР в ОАО «РЖД» за 2017 и 2018 гг.;

анализ работы Трансэнерго по итогам 2017 и 2018 гг.;

презентация заместителя начальника ЦЭУ ОАО «РЖД» А. С. Ананьева на сетевой школе в г. Владивосток 03.10.2018 г. «Повышение энергоэффективности как ключевой элемент системы бюджетного управления ОАО «РЖД».

Результаты верификации основных производственных показателей Холдинга, влияющих на энергетическую эффективность, за 2017 и 2018 гг. приведены в таблицах 6.8 и 6.9.

Таблица 6.8 – Результаты верификации основных производственных показателей Холдинга, влияющих на энергетическую эффективность, за 2017 г.

Показатель	Прогнозное значение согласно соответствующему сценарию			Факт	Комментарий
	Консервативный	Базовый	Оптимистичный		
1	2	3	4	5	6
Эксплуатационный грузооборот, млрд т·км	2360,3	2377,5	2423,4	2491,9	выше оптимистического сценария
Пассажирооборот, млрд пасс·км	121,9	124,1	126,2	122,9	между базовым и консервативным сценариями
Перевозочная работа на электрической тяге, млрд т·км бр	3755,7	3790,7	3871,3	3943,7	выше оптимистического сценария
Перевозочная работа на дизельной тяге, млрд т·км бр	629,8	633,4	641,9	626,7	ниже консервативного сценария
Приведенная работа, млрд прив. т·км нетто	3159,1	3236,0	3341,4	3299,6	между базовым и оптимистичным сценариями
Эксплуатационная длина электрифицированных линий, тыс. км	43,5	43,5	43,5	43,62	больше ожиданий

Продолжение таблицы 6.8

1	2	3	4	5	6
Среднесуточная производительность локомотива, тыс. т·км брутто	2119,6	2164,4	2211,5	2135	между базовым и консервативным сценариями
Средняя масса грузового поезда, т	4007,6	4040,2	4073,4	4041	на уровне базового сценария
Средняя участковая скорость движения поездов, км/час	40,3	40,7	41,1	40,7	на уровне базового сценария
Доля грузовой работы в общей приведенной работе	0,8967	0,8956	0,8958	0,9014	больше ожиданий

Таблица 6.9 – Результаты верификации основных производственных показателей Холдинга, влияющих на энергетическую эффективность, за 2018 г.

Показатель	Прогнозное значение согласно соответствующему сценарию			Факт	Комментарий
	Консервативный	Базовый	Оптимистичный		
1	2	3	4	5	6
Эксплуатационный грузооборот, млрд т·км	2388,0	2413,8	2482,7	2596,9	выше оптимистического сценария
Пассажирооборот, млрд пасс·км	122,6	126,0	129,1	129,4	выше оптимистического сценария
Перевозочная работа на электрической тяге, млрд т·км бр	3802	3854,3	3975,4	4141,2	выше оптимистического сценария
Перевозочная работа на дизельной тяге, млрд т·км бр	637,4	642,9	655,6	644,4	между базовым и оптимистичным сценариями
Приведенная работа, млрд прив. т·км нетто	3185,1	3300,4	3458,6	3438,2	между базовым и оптимистичным сценариями
Эксплуатационная длина электрифицированных линий, тыс. км	43,55	43,55	43,55	43,8	больше ожиданий

Продолжение таблицы 6.9

1	2	3	4	5	6
Среднесуточная производительность локомотива, тыс. т·км брутто	2160,4	2227,7	2298,3	2136	ниже консервативного сценария
Средняя масса грузового поезда, т	4028,4	4077,2	4127,1	4076	на уровне базового сценария
Средняя участковая скорость движения поездов, км/час	40,8	41,4	42	40,9	на уровне консервативного сценария
Доля грузовой работы в общей приведенной работе	0,8973	0,8956	0,8960	0,9003	больше ожиданий

Как видно из представленных результатов, развитие холдинга осуществляется в основном опережающими темпами в сравнении с прогнозами, установленными в проектах финансового плана и инвестиционной программы ОАО «РЖД» на 2017 год и на плановый период 2018 и 2019 годов и в Генеральной схеме развития сети железных дорог ОАО «РЖД» на период до 2020 и 2025 года. Существенно выше ожиданий оказался эксплуатационный грузооборот (по итогам 2018 г. – на 4,6 % в сравнении с оптимистичными ожиданиями), что повлияло на увеличение перевозочной работы. При этом перевозочная работа на дизельной тяге растет медленнее, чем на электрической. Таким образом, наблюдается тенденция увеличения доли электрической тяги в общей перевозочной работе. В 2018 г. существенно увеличился пассажирооборот, что привело к некоторому снижению доли грузооборота в общей приведенной работе в сравнении с ранее существовавшей тенденцией.

Из числа эксплуатационных показателей движения ниже консервативного сценария оказалась среднесуточная производительность локомотивов, показатели средней массы грузового поезда и средней участковой скорости в пределах базового и консервативного сценариев. В то же время лучше ожиданий оказалась эксплуатационная длина электрифицированных линий и доля грузовой работы в общей приведенной работе, что должно положительно сказаться на снижении показателей энергоемкости.

Выполнена верификация прогнозных значений ключевых показателей энергоэффективности, результаты которой представлены в таблицах 6.10, 6.11 и на рисунках 6.11, 6.12. Результаты верификации показывают, что фактические значения УРЭ и УРД на тягу поездов находятся на уровне оптимистичного сценария или несколько лучше его, что связано с ростом эксплуатационного грузооборота, и, как следствие, значительному увеличению доли грузовой работы в общей приведенной работе за рассматриваемый период. В то же время основной показатель энергоэффективности ОАО «РЖД» – энергоемкость производственной деятельности – находится на уровне базового сценария, запланированного согласно предложенным моделям.

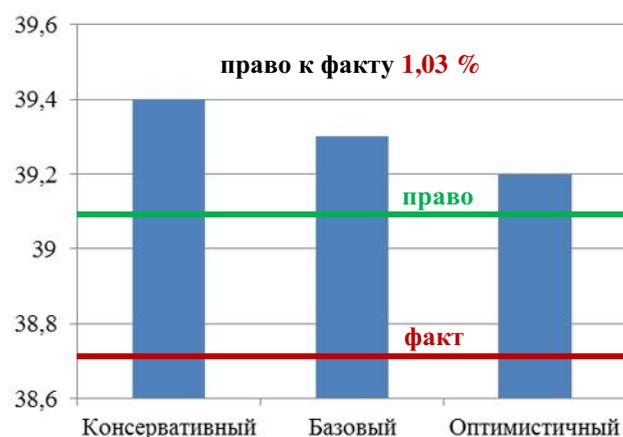
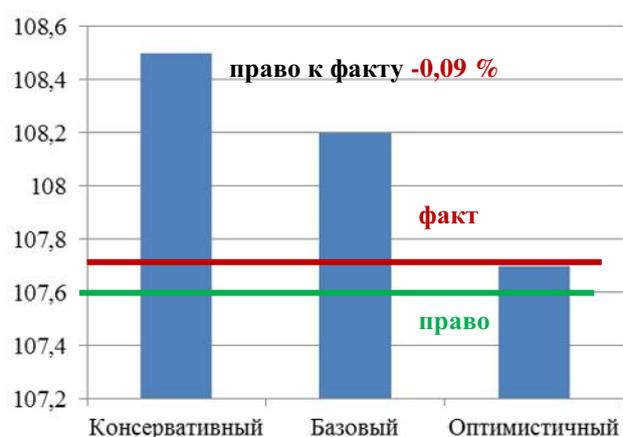
Таблица 6.10 – Результаты верификации ключевых показателей энергоэффективности Холдинга, влияющих на энергетическую эффективность, за 2017 г.

Показатель	Прогнозное значение согласно соответствующему сценарию			Факт	«Право»	Расхождение «права» к факту, %	Комментарий
	Консервативный	Базовый	Оптимистичный				
УРЭ на тягу поездов, кВт·ч/10 ⁴ т·км бр	108,5	108,2	107,7	107,7	107,6	-0,09	на уровне оптимистического сценария
УРД на тягу поездов, кг/10 ⁴ т·км бр	39,4	39,3	39,2	38,7	39,1	1,03	лучше оптимистического сценария
Энергоемкость производственной деятельности Холдинга «РЖД», кг у.т./прив. т·км нетто	68,0	66,7	65,4	66,8	66,7	-0,15	на уровне базового сценария

Таблица 6.11 – Результаты верификации ключевых показателей энергоэффективности Холдинга, влияющих на энергетическую эффективность, за 2018 г.

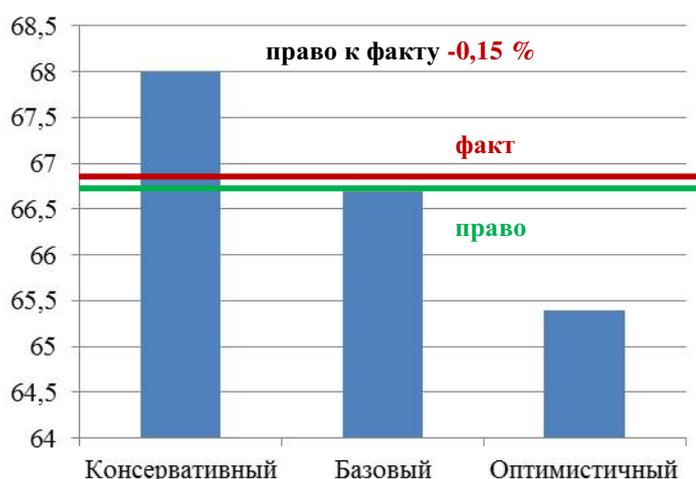
Показатель	Прогнозное значение согласно соответствующему сценарию			Факт	«Право»	Расхождение «права» к факту, %	Комментарий
	Консервативный	Базовый	Оптимистичный				
УРЭ на тягу поездов, кВт·ч/10 ⁴ т·км бр	108	107,4	106,7	107,2	106,9	-0,28	между базовым и оптимистичным сценариями
УРД на тягу поездов, кг/10 ⁴ т·км бр	39,2	39,1	38,9	38,8	39,3	1,29	на уровне оптимистичного сценария
Энергоемкость производственной деятельности Холдинга «РЖД», кг у.т./прив. т·км нетто	67,7	65,8	63,8	66,2	65,9	-0,45	между базовым и консервативным сценариями

Наиболее объективным методом верификации качества предложенных моделей является сравнение фактических значений показателей не с плановым значением, а с «правом». Под данным термином понимается значение показателя, определенное для фактически достигнутых за рассматриваемый период значений влияющих факторов, приведенных в таблицах 6.8, 6.9, согласно разработанной модели. Как видно из таблиц 6.10, 6.11 и рисунков 6.11 и 6.12, наибольшее расхождение «права» к факту наблюдается для УРД на тягу поездов (до 1,29 %), а наибольшая точность моделей – для УРЭ на тягу поездов (расхождение до 0,28 %).



УРЭ на тягу поездов, кВт·ч/10⁴ т·км бр

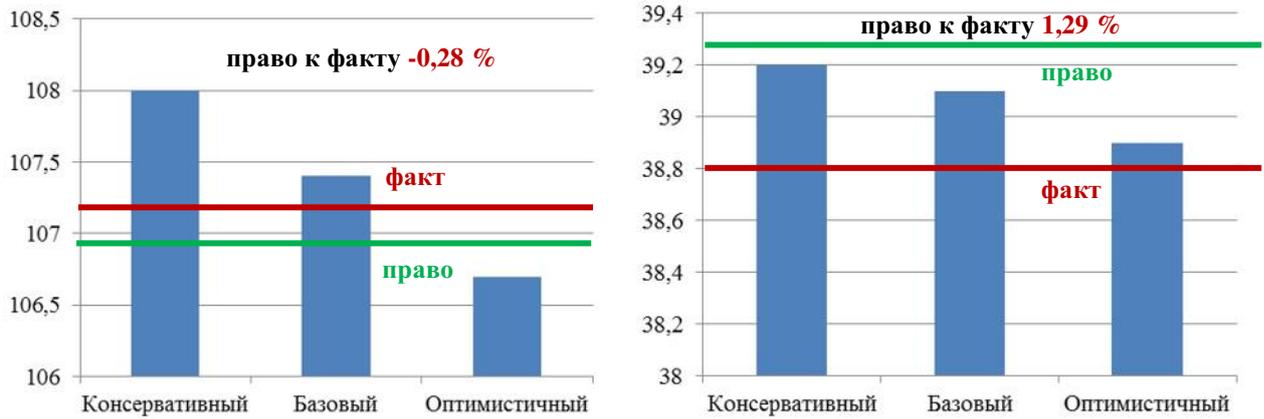
УРД на тягу поездов, кг/10⁴ т·км бр



Энергоёмкость производственной деятельности

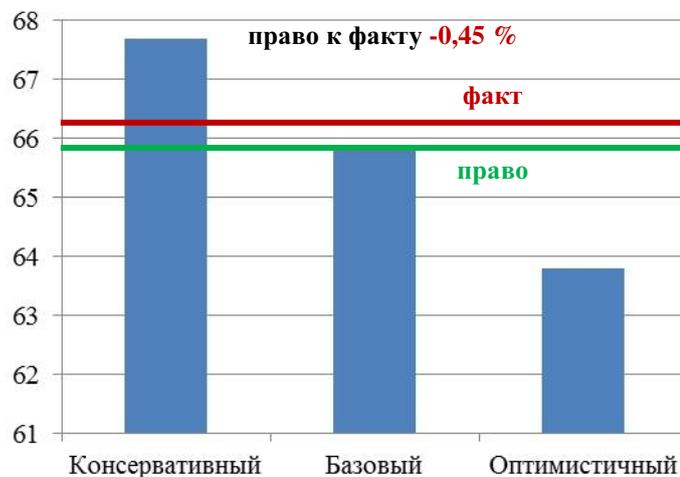
Холдинга «РЖД», кг у.т./прив. т·км нетто

Рисунок 6.11 – Результаты верификации ключевых показателей энергоэффективности Холдинга, влияющих на энергетическую эффективность, за 2017 г.



URЭ на тягу поездов, кВт·ч/10⁴ т·км бр

URД на тягу поездов, кг/10⁴ т·км бр



Энергоемкость производственной деятельности

Холдинга «РЖД», кг у.т./прив. т·км нетто

Рисунок 6.12 – Результаты верификации ключевых показателей энергоэффективности Холдинга, влияющих на энергетическую эффективность, за 2018 г.

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

6.3 Основные результаты и выводы

В 2016 г. разработан и введен в действие основной нормативный документ в области энергосбережения и повышения энергоэффективности на железнодорож-

ном транспорте – Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года. Разработка стратегии выполнена Омским государственным университетом путей сообщения с участием автора. Одной из задач, решаемых в ходе разработки ЭС-2020, является анализ и прогнозирование ключевых показателей эффективности развития железнодорожного транспорта в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности на основе положений Стратегии научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года (актуализированная «Белая книга ОАО «РЖД»), Генеральной схемы развития сети железных дорог ОАО «РЖД» на период до 2020 и 2025 года и других документов.

Решение этой задачи возможно на основе предложенных в главе 3 подходах, основанных на методах математической статистики, регрессионных моделях и искусственных нейронных сетях. На основе сформированных моделей выполнено прогнозирование объема перевозочной работы по видам тяги, приведенной работы и удельного расхода ТЭР по видам тяги и видам движения на период до 2020 и на перспективу до 2030 г., определены прогнозные значения интегрального показателя энергоэффективности ОАО «РЖД» – энергоемкости производственной деятельности. Полученные значения стали основой для оценки основных ожидаемых результатов реализации ЭС-2020.

Выполнена верификация основных производственных показателей и связанных с ними ключевых показателей энергоэффективности ОАО «РЖД» как ресурсосберегающей производственной системы по итогам 2017 и 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 %, для энергоемкости производственной деятельности ОАО «РЖД» – 0,45 %, что позволяет говорить о достаточной эффективности применяемых математических моделей.

7 РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

В настоящее время потребление электрической энергии в ОАО «РЖД» превышает 49 млрд. кВт·ч в год. Увеличение доли затрат на ТЭР в общих эксплуатационных расходах ОАО «РЖД» подтверждает необходимость дальнейшей интенсификации деятельности по энергосбережению.

Как было отмечено ранее, в ОАО «РЖД» применяется система энергетического менеджмента. В рамках развития СЭнМ в ОАО «РЖД» должен осуществляться непрерывный мониторинг процессов, определяющих энергетическую эффективность, и принятие действий по снижению нерационального использования ресурсов.

Следует отметить, что на сегодняшний день на большинстве объектов в составе холдинга «РЖД» отсутствует фактическая возможность осуществления постоянного мониторинга энергетической эффективности. Существующие автоматизированные информационно-измерительные системы учета электроэнергии (АИИСКУЭ) в большинстве случаев позволяют лишь собирать и обрабатывать данные о расходе электроэнергии и формировать отчеты об электропотреблении [169].

Как было отмечено ранее, для контроля реализации мероприятий по повышению энергетической эффективности в ОАО «РЖД» функционирует автоматизированная информационная система энергосбережения и повышения энергетической эффективности (АИС «Энергоэффективность»).

Следует отметить, что перечисленные меры не предусматривают мониторинг расхода ТЭР в производственных процессах и выявление участков с расточительным расходом ТЭР. Это не позволяет оперативно выявлять цеха и производственные участки с высоким нерациональным электропотреблением.

В настоящей главе рассмотрены возможности создания системы мониторинга показателей энергетической эффективности производственных процессов

на железнодорожном транспорте на уровне СП, цехов, отделений и производственных участков применительно к процессу потребления электроэнергии.

7.1 Обоснование необходимости создания системы мониторинга и управления показателями энергетической эффективности производственных процессов на железнодорожном транспорте

Одним из эффективных способов выявления нерационального расхода электроэнергии является анализ удельного расхода в расчете на единицу продукции (работы). При этом за измеритель работы принимается показатель, связанный с основной производственной деятельностью предприятия, и имеющий высокий коэффициент корреляции с расходом электроэнергии [282].

На рисунках 7.1 – 7.6 приведены итоговые годовые значения удельной энергоэффективности \mathcal{E} по итогам 2015 года на основе данных для следующих предприятий Западно-Сибирской железной дороги:

1) предприятия Дирекции инфраструктуры (ДИ): шесть эксплуатационных вагонных депо (ВЧДЭ), 25 дистанций пути (ПЧ), 13 дистанций электроснабжения (ЭЧ), 13 дистанций сигнализации, централизации и блокировки (ШЧ);

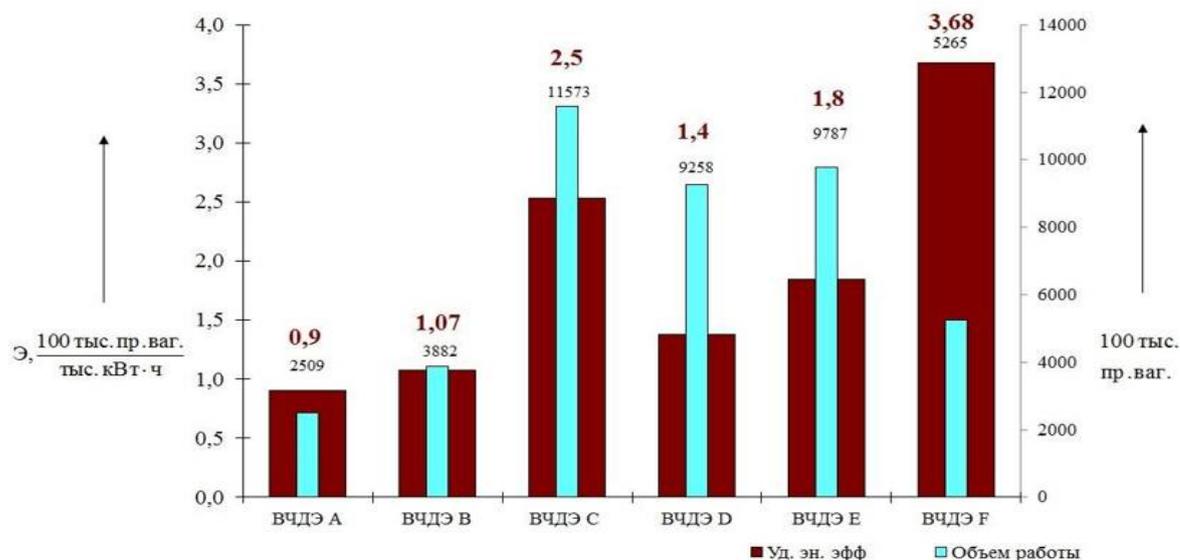


Рисунок 7.1 – Годовая удельная энергоэффективность и объем производственной деятельности эксплуатационных вагонных депо

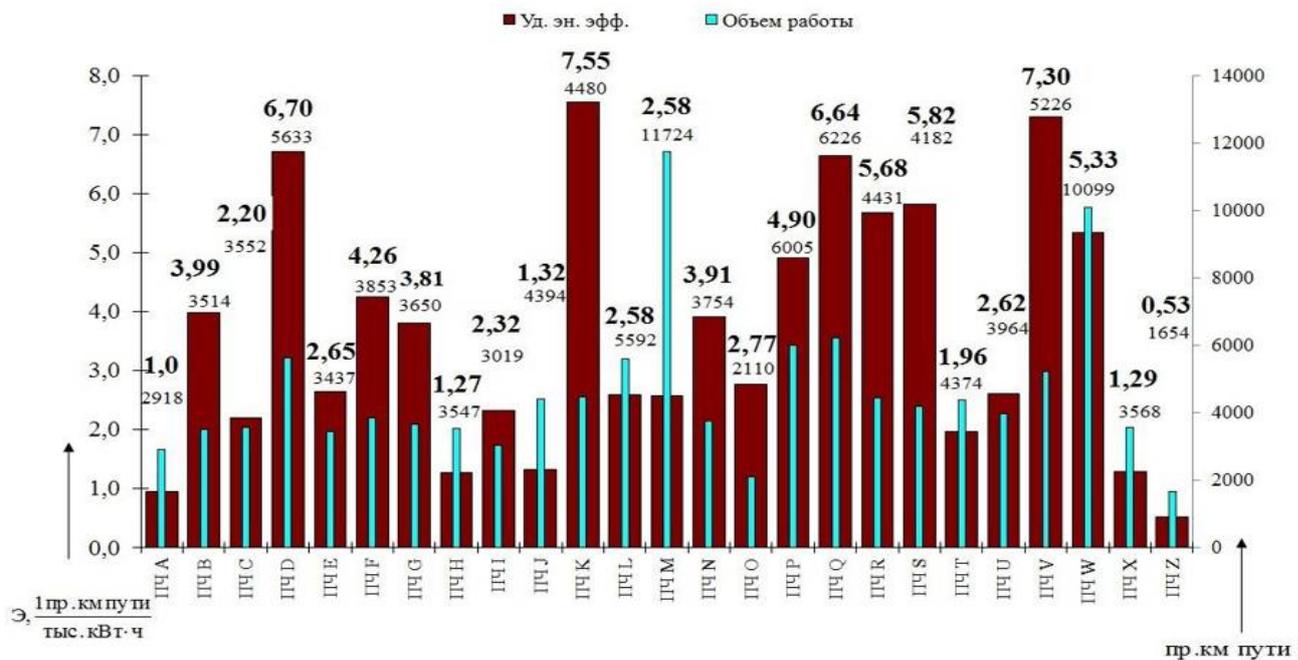


Рисунок 7.2 – Годовая удельная энергоэффективность и объем производственной деятельности дистанций пути

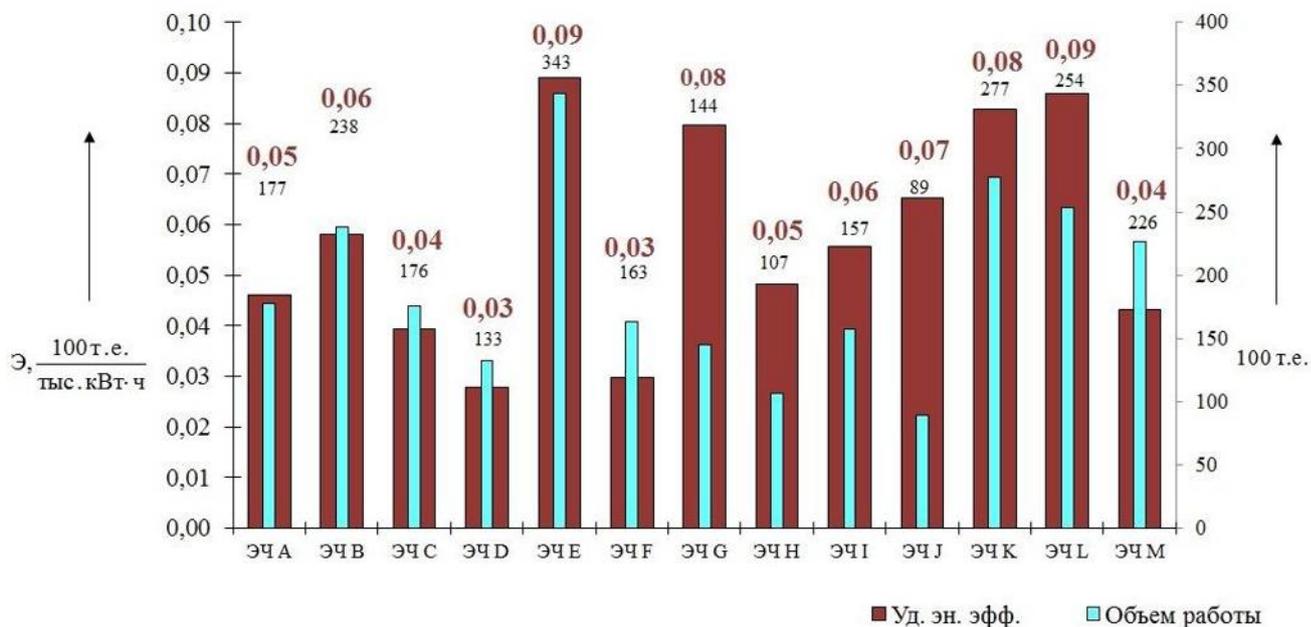


Рисунок 7.3 – Годовая удельная энергоэффективность и объем производственной деятельности дистанций электроснабжения

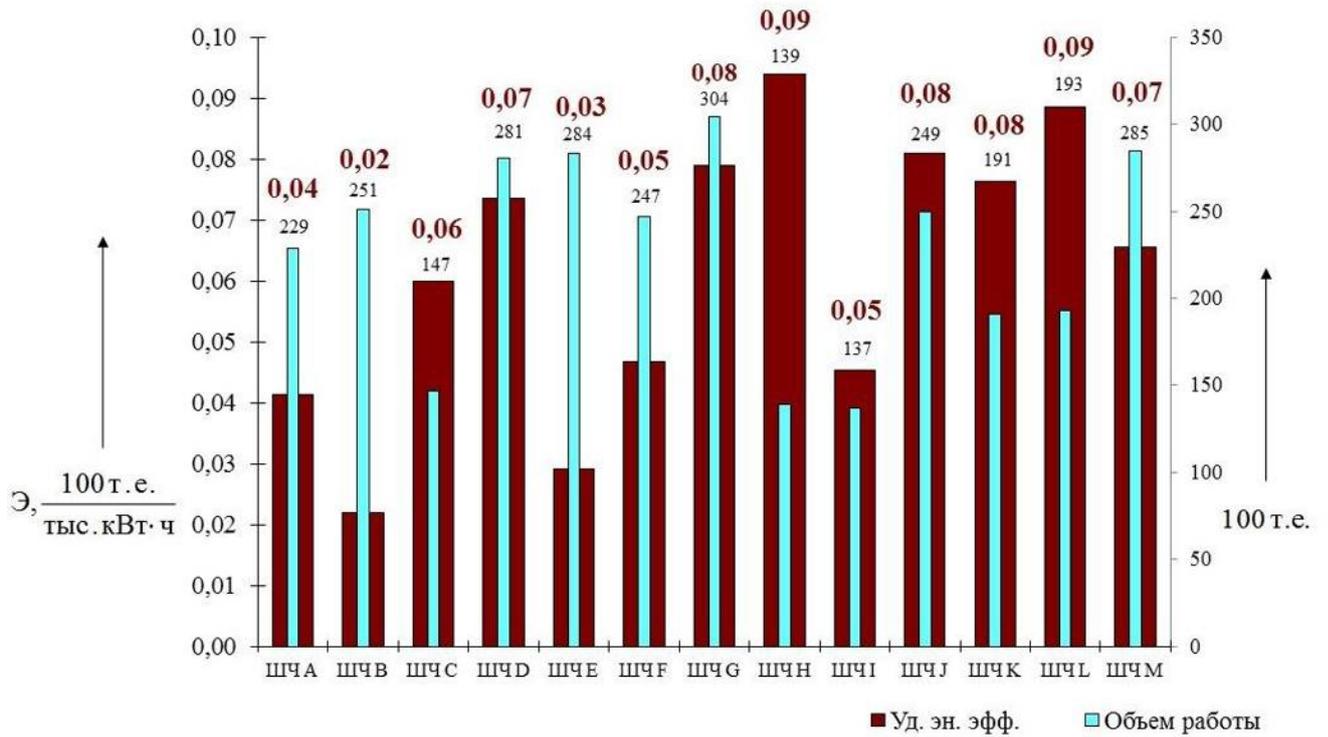


Рисунок 7.4 – Годовая удельная энергоэффективность и объем производственной деятельности дистанций сигнализации, централизации и блокировки

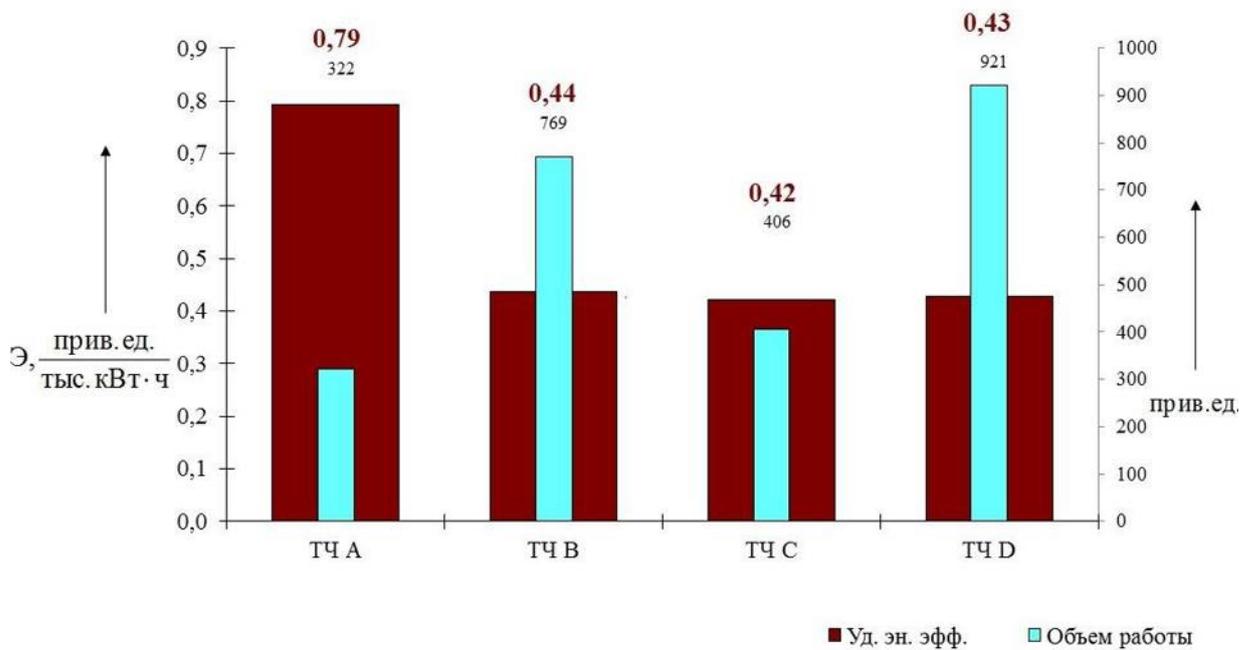


Рисунок 7.5 – Годовая удельная энергоэффективность и объем производственной деятельности моторвагонных депо

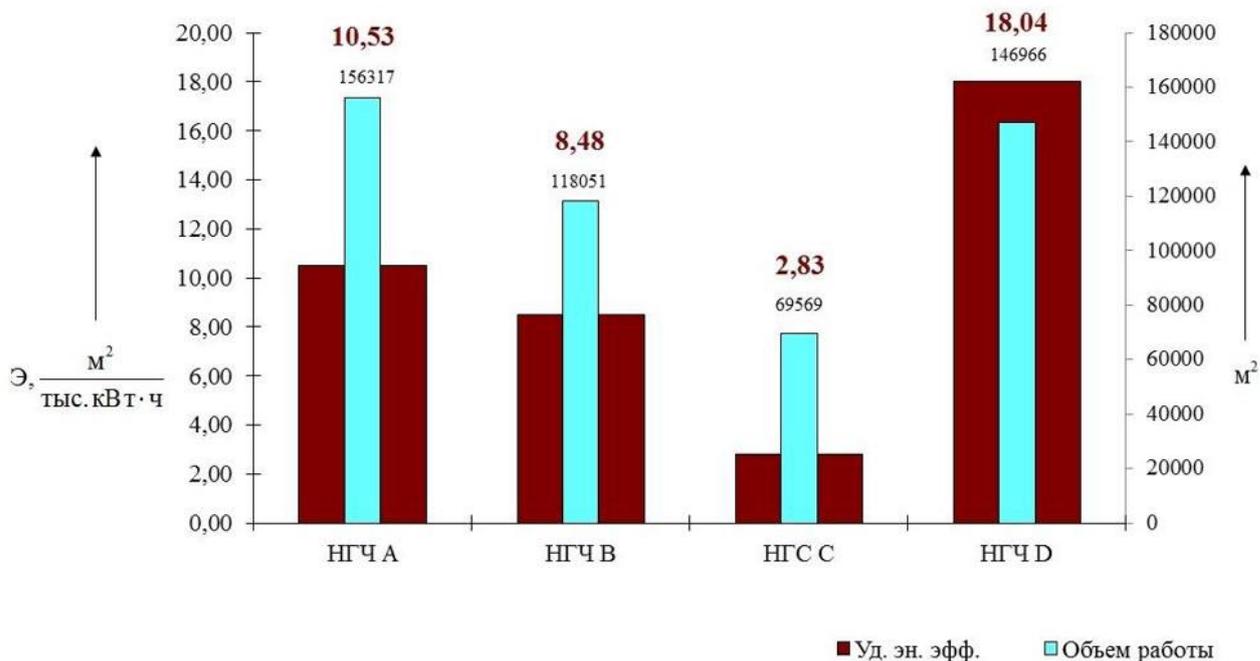


Рисунок 7.6 – Годовая удельная энергоэффективность и объем производственной деятельности дистанций гражданских сооружений

2) предприятия Дирекции моторвагонного подвижного состава (ДМВ): четыре моторвагонных депо;

3) предприятия Дирекции по эксплуатации зданий и сооружений (ДЭЗ): четыре дистанции гражданских сооружений (НГЧ).

Из представленных рисунков видно, что удельный расход электрической энергии в расчете на единицу производства по отдельным предприятиям с одинаковым видом деятельности может отличаться в несколько раз. Так, для эксплуатационных вагонных депо удельный расход электроэнергии ВЧДЭ F более чем в 4 раза превышает этот показатель для ВЧДЭ А. Аналогичная ситуация наблюдается для остальных принятых к рассмотрению структурных подразделений: расхождение удельного расхода электроэнергии по дистанциям гражданских сооружений составляет 6,4, по моторвагонным депо – 1,9, по дистанциям сигнализации, централизации и блокировки – 4,5, дистанциям электроснабжения – 3, дистанциям пути – 14,2.

Безусловно, такое расхождение частично может быть объяснено разной степенью энерговооруженности предприятий железнодорожного транспорта, но, тем не менее, не вызывает сомнения необходимость выявления его причин, при этом данная работа должна выполняться на регулярной основе.

Для установления причин низких показателей энергоэффективности на отдельных предприятиях (в данном случае ВЧДЭ А, ВЧДЭ В, ПЧ А, ПЧ Z, ЭЧ D, ЭЧ F, ЭЧ M, ШЧ В, ШЧ Е, ТЧ С, НГЧ С) необходимо выполнить их декомпозицию до уровня цехов, отделений и производственных участков и на этом уровне выполнять анализ показателей энергоэффективности.. Например, в составе вагонного эксплуатационного депо выделяются пункты технического обслуживания, текущего отцепочного ремонта, административные здания и т.д.

Следует отметить, что анализ показателей энергоэффективности цехов, отделений и производственных участков в настоящее время в большинстве случаев технически не реализуем, в основном из-за низкой оснащенности приборами технического поцехового учета электроэнергии и отсутствия строгого учета выполненной работы на уровне цехов.

Одним из перспективных путей развития с рассматриваемой точки зрения является реализация концепции «smart enterprise». В России и за рубежом известны проекты «smart home», «smart station», которые в первую очередь направлены на снижение расхода электроэнергии по условно-постоянной составляющей электропотребления (освещение, электроотопление и др.), непосредственно не связанной с производственным процессом [49, 283 – 286].

В то же время вопросам мониторинга и управления показателями энергоэффективности по переменной составляющей, которая связана непосредственно с производственным процессом, уделяется недостаточно внимания.

В настоящем разделе предлагаются методы и технические средства, которые реализуют концепцию «smart enterprise» и направлены на повышение энергоэффективности производственных процессов железнодорожных предприятий.

Реализация задачи мониторинга и управления показателями энергоэффективности производственных процессов на железнодорожном транспорте требует решения ряда проблем [50, 51, 287 – 298]:

- отсутствие на предприятиях комплексной системы мониторинга всего производственного процесса предприятия с целью своевременного выявления технологических процессов, оборудования или организационно-управленческих решений с нерациональным использованием топливно-энергетических ресурсов;

- недостаточная оснащенность систем электроснабжения предприятий оборудованием, адаптированным для использования в «smart enterprise» и позволяющим управлять процессом электропотребления;

- разомкнутость цикла по организации и контролю производства, а также выпуску продукции;

- отсутствие прозрачности в оценке энергетической эффективности отдельных технологических комплексов или процессов;

- отсутствие алгоритмов выявления нерационального расхода электроэнергии и выбора управляющих воздействий по его минимизации.

Известны варианты реализации системы контроля потребления ТЭР, оформленные как в виде патентов [299, 300], так и в виде реализованных технических решений (ИВК «Спрут», «Прогноз. Энергоменеджмент и управление энергосбережением», АРМ «Энергоэффективность» (отечественные разработки), программное обеспечение EP-Analytics (фирма «YOKOGAWA», Япония) и др.) [301].

Анализ существующих систем выявил ряд недостатков, которые изложены автором в статье [301] (соавтор – В. В. Эрбес):

- «...– большинство систем не могут быть применимы для анализа потребления электроэнергии, они ориентированы в первую очередь на оценку эффективности производства тепловой энергии;

- планирование, мониторинг и анализ электропотребления осуществляется с помощью регрессионных моделей, которые учитывают только линейные зависимости, чего недостаточно для оценки процессов электропотребления;

- в большинстве разработок не учитывается влияние климатических факторов на расход электрической энергии;
- не все разработки позволяют осуществлять прогнозирование расхода электроэнергии;
- заявляемый производителями эффект в размере от 10 до 40 % экономии энергоресурсов, вероятно, является чересчур оптимистическим и не может быть достигнут на реально действующем объекте холдинга «РЖД»...».

7.2 Разработка автоматизированной системы контроля и управления электропотреблением в производственных процессах на железнодорожном транспорте

Для решения поставленной задачи разработана автоматизированная система контроля и управления электропотреблением предприятий в производственных процессах на железнодорожном транспорте, на которую получен патент на полезную модель 151431 РФ [302]. В 2017 г. структура системы актуализирована (патент 183468 РФ [303]) за счет добавления возможности контроля рабочего и нерабочего времени электрооборудования.

Схема функционирования предлагаемой системы приведена на рисунке 7.7. Она представляет собой программно-аппаратный комплекс, в автоматизированном режиме получающий информацию о расходе электрической энергии и влияющих на него производственных и климатических факторах, и обрабатывающий полученную информацию на основе методов искусственного интеллекта и непараметрической статистики, который позволяет решать следующие задачи [301]:

1. Постоянный мониторинг и анализ расхода электрической энергии на объекте ОАО «РЖД».
2. Формирование аналитических отчетов.
3. Прогнозирование расхода электрической энергии.
4. Оценка фактической эффективности внедренных энергосберегающих мероприятий.

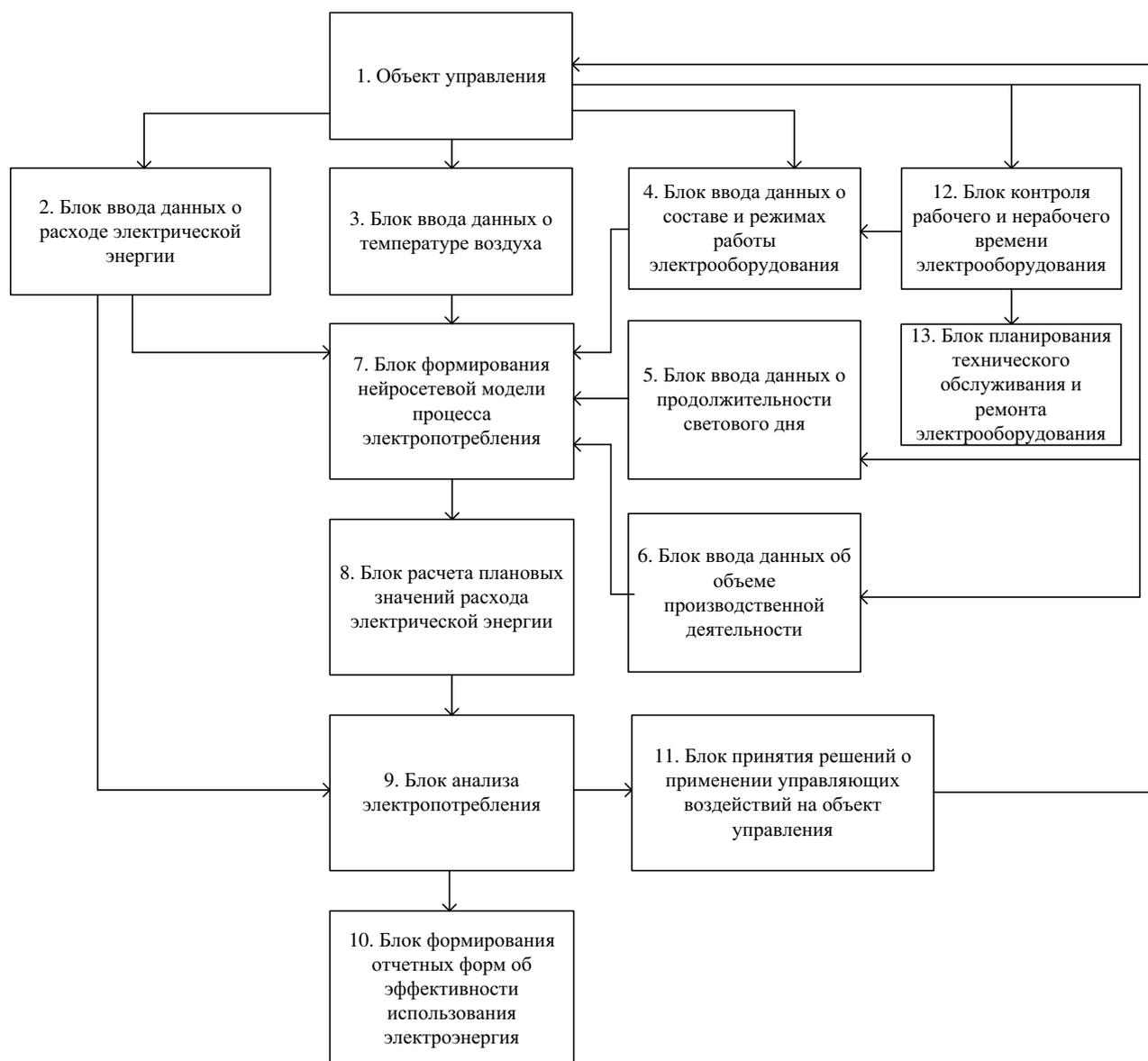


Рисунок 7.7 – Схема автоматизированной системы контроля и управления электропотреблением предприятий в производственных процессах на железнодорожном транспорте

5. Повышение эффективности принятия управленческих решений в области энергоснабжения и энергосбережения.

Система функционирует следующим образом. От объекта управления 1 поступает информация о фактических значениях расхода электрической энергии, например, по данным автоматизированных систем учета электрической энергии (блок 2), температуры воздуха (блок 3), составе и режимах работы электрооборудования (блок 4), продолжительности светового дня (блок 5), объеме производственной деятельности предприятия (блок 6). При этом в блок 4 от блока кон-

троля рабочего и нерабочего времени электрооборудования (блок 12) в режиме реального времени поступает информация о текущем состоянии электрооборудования (включено или выключено) и о накопленном рабочем и нерабочем времени электрооборудования.

В блоке 7 происходит формирование нейросетевой модели процесса электропотребления. На основе разработанной нейросетевой модели осуществляется расчет плановых значений расхода электрической энергии в блоке 8. В блоке 9 производится анализ электропотребления на основе данных о фактическом расходе электрической энергии, получаемом с блока 1, и плановом его значении, получаемом с блока 8. По результатам анализа формируются отчетные формы об эффективности использования электрической энергии (блок 10). При необходимости применяются управляющие воздействия на объект управления (блок 11), например, отключение части неэффективно используемого электрооборудования, увеличение производительности и т.п. Планирование технического обслуживания и ремонта электрооборудования осуществляется в блоке 13 на основе информации, получаемой от блока 12.

Техническая реализация некоторых блоков, например, ввода данных о расходе электрической энергии, объеме производственной деятельности, температуре воздуха, продолжительности светового дня и др. хорошо исследована и может быть организована на базе имеющихся известных технических решений.

Например, сбор информации о расходе электроэнергии возможно осуществлять следующими способами [309]:

1. При наличии прибора учета электроэнергии на объекте путем применения существующего интерфейса передачи данных (например, с помощью измерительной головки). В этом случае необходимо иметь соответствующее программное обеспечение, что не всегда доступно с учетом широкой номенклатуры применяемых в системах электроснабжения счетчиков электроэнергии. Этот метод предпочтительно применять, когда исследуемый объект имеет прибор учета, включенный в АИИС КУЭ.

2. Оборудование объекта отдельным прибором учета электроэнергии. В этом случае необходимо вмешательство в систему электроснабжения объекта. Данный способ целесообразно применять в случае установки постоянно действующей системы контроля энергетической эффективности объекта.

3. Применение портативных устройств для измерения параметров электропотребления (например, анализаторов качества электроэнергии), синхронизированных по времени с другими блоками системы. Данный подход эффективен в случае периодического контроля энергоэффективности исследуемого объекта.

Таким образом, конструктивное исполнение данного блока следует выбирать в зависимости от задач, которые планируется решать с применением разрабатываемой системы.

Сбор данных об объеме производственной деятельности объекта может быть осуществлен двумя способами.

1. Автоматически при наличии системы контроля объема производственной деятельности (например, на котельной, оборудованной приборами учета выработанной тепловой энергии, на компрессорной с приборами учета сжатого воздуха). Однако для большинства объектов такой учет в автоматическом режиме не ведется.

2. Сбор данных с помощью оператора. Данный подход применим к большинству объектов, однако недостатком его являются возможные ошибки, связанные с человеческим фактором.

Информация о климатических факторах может собираться следующими способами:

1. Автоматически с помощью датчиков температуры и освещенности.

2. Автоматически с применением существующих метеорологических информационных систем.

3. Вручную.

Для остальных элементов системы требуется проработка возможных вариантов их технической или программной реализации.

Для реализации блоков ввода данных о составе и режимах работы электрооборудования и контроля рабочего и нерабочего времени электрооборудования необходимо рассмотреть различные варианты возможных технических решений.

Контроль времени работы электрооборудования может осуществляться контактным или бесконтактным способом (рисунок 7.8).

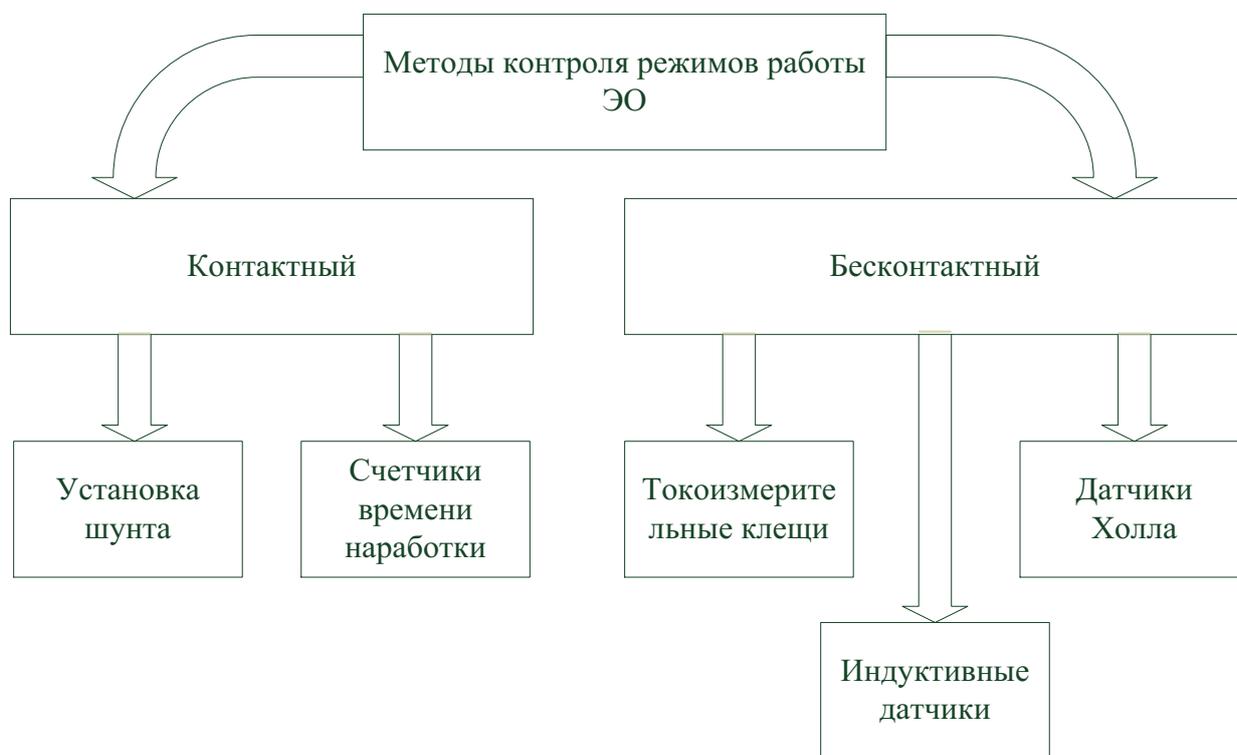


Рисунок 7.8 – Методы контроля времени работы ЭО

При контактном способе в рассечку электрической цепи, питающей электрооборудование, включается шунт. К зажимам шунта подключается прибор для измерения тока (амперметр). Затем в автоматическом режиме измеряется время, в течение которого ток в цепи не был равен нулю. Преимуществом такого способа является получение информации не только о наличии или отсутствии тока в цепи, но и о его значении. Существенным недостатком метода является вмешательство в систему электроснабжения объекта, что в ряде случаев может быть недопустимым (например, при питании ответственных потребителей или по требованиям электробезопасности). Кроме того, такой метод потребует перерыва в электропитании оборудования, что также в отдельных случаях является неприемлемым.

Другим вариантом контактного способа является подключение счетчиков времени наработки типа СВН-1, СВН-2, Theben BZ 145 и др. (рисунок 7.9). Этот способ также требует согласования с контролируемой электрической цепью, например, с помощью встраиваемого реле или оптрона.



Рисунок 7.9 – Счетчики времени наработки

Далее для решения задачи, поставленной в настоящем исследовании, рассмотрим бесконтактные способы контроля режимов работы электрооборудования.

В случае, если имеется одножильный кабель, питающий рассматриваемое электрооборудование, то можно применять токоизмерительные клещи. Преимуществом такого подхода, как и у способа с шунтом, является возможность контроля значения тока. Однако в реальных распределительных сетях в большинстве случаев затруднительно выделить отдельный провод, питающий нагрузку. Как правило, имеется трех- или четырехжильный кабель, подключенный к электрооборудованию. В этом случае применение токоизмерительных клещей невозможно, так как магнитное поле проводников, как при однофазной, так и трехфазной нагрузке будет скомпенсировано.

Поэтому следует рассмотреть возможность применения датчиков Холла или индуктивных датчиков, которые реагируют на величину магнитного поля вблизи провода [304, 305].

С этой целью в лабораторных условиях проведены испытания следующих датчиков разных типов [306]:

1. Датчик Холла аналоговый биполярный 670 G (SS495A).
2. Датчик Холла цифровой униполярный (HAL 506UA-A-2-B-1-00).
3. Датчик Холла цифровой однополярный (SS411A).
4. Датчик Холла цифровой биполярный (Hall Sensor A22L).
5. Датчик индуктивный аналоговый (AF02-87GA).

Испытания проводились с применением лабораторной станции NI ELVIS II (National Instruments Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite II), которая состоит из аппаратной части, подключаемой к компьютеру, и программной части, в состав которой входит комплект виртуальных измерительных приборов.

С целью испытаний датчиков Холла на лабораторной станции NI ELVIS II собрана схема, представленная на рисунке 7.10. Внешний вид собранного макета приведен на рисунке 7.11.

В ходе испытаний на вход устройства подавалось напряжение постоянного тока $E = 9\text{ В}$, а сопротивление резистора принято равным $R = 2000\text{ Ом}$.

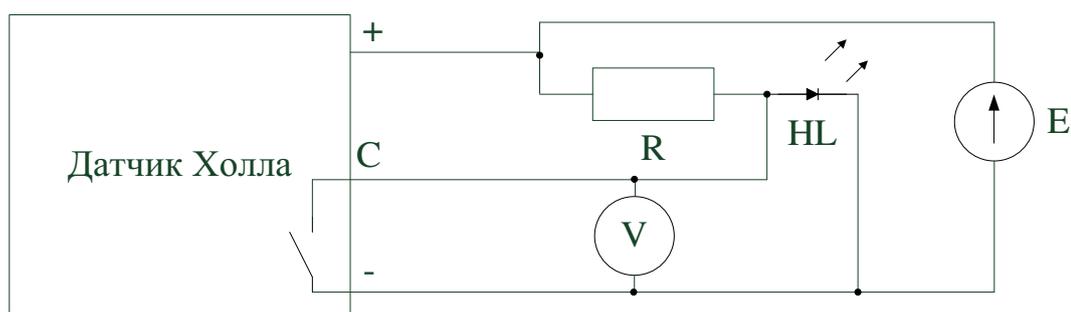


Рисунок 7.10 – Схема для испытаний датчиков Холла

В настоящей схеме при отсутствии магнитного поля светодиод HL горит. Напряжение на светодиоде контролируется виртуальным вольтметром V. Для цифровых датчиков Холла при наличии достаточно сильного магнитного поля вблизи чувствительного элемента датчика контакты «-» и «С» замыкаются, све-

диод шунтируется и перестает гореть. В случае аналогового биполярного датчика Холла напряжение на указанных зажимах будет уменьшаться или увеличиваться в зависимости от полярности магнитного поля.

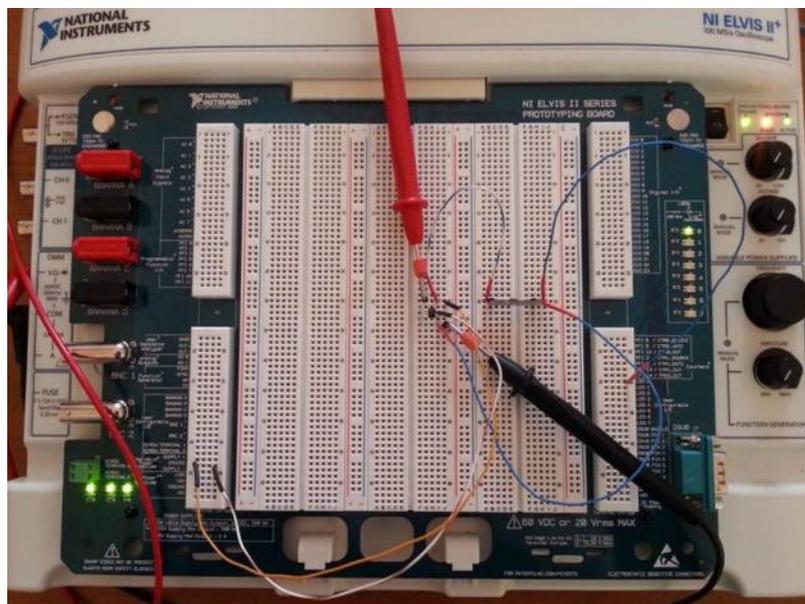


Рисунок 7.11 – Внешний вид макета для испытания датчиков Холла

Испытания проводились для однофазной нагрузки следующих типов:

- 1) нагрузка мощностью 2 кВт, питание подается по трехжильному проводу сечением $1,5 \text{ мм}^2$, ток нагрузки 9 А;
- 2) нагрузка мощностью 0,44 кВт, питание подается по одножильному проводу сечением $0,75 \text{ мм}^2$, ток нагрузки 2 А.

Как показали испытания, в обоих случаях значения напряженности магнитного поля, индуцируемого проводниками с током, оказались недостаточными для срабатывания как аналоговых, так и цифровых датчиков. Однако при поднесении к чувствительному элементу цифрового датчика Холла постоянного магнита он срабатывал, т.е. ключ замыкался. В случае аналогового биполярного датчика наблюдалось уменьшение или увеличение напряжения в зависимости от полярности магнита.

Следовательно, применение датчиков Холла для бесконтактного контроля режимов работы электрооборудования нецелесообразно ввиду их недостаточной чувствительности.

На следующем этапе проведены испытания индуктивного датчика. Схема для испытаний приведена на рисунке 7.12.

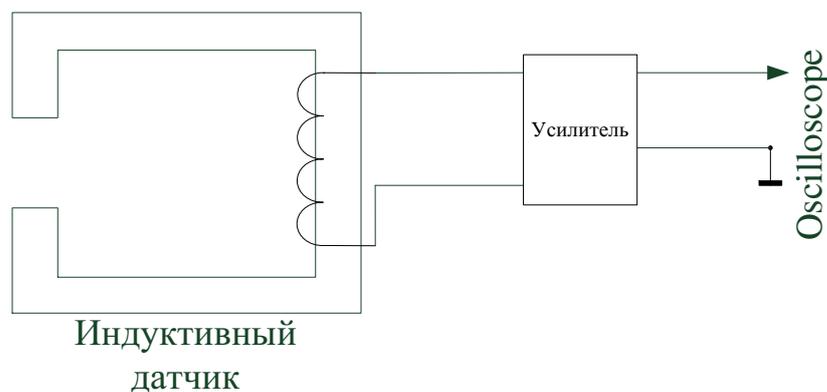


Рисунок 7.12 – Схема для испытаний индуктивного датчика

В данной схеме напряжение с индуктивного датчика поступает на усилитель, после чего контролируется виртуальным осциллографом PG. В настоящем опыте испытания проводились для однофазной нагрузки следующих типов:

- 1) мощность 2 кВт, питание подается по трехжильному проводу сечением $1,5 \text{ мм}^2$, ток нагрузки 9 А;
- 2) мощность 0,03 кВт, питание подается по двухжильному проводу сечением $0,75 \text{ мм}^2$, ток нагрузки 0,14 А.

Осциллограмма напряжения при отсутствии нагрузки представлена на рисунке 7.13.

Осциллограммы напряжения при различном удалении индуктивного датчика от провода с нагрузкой 2 кВт представлены на рисунке 7.14.

Следует отметить, что все полученные осциллограммы имеют частоту 50 Гц, что совпадает с промышленной частотой переменного тока.

Значения амплитуды сигнала при различном удалении индуктивного датчика от провода с нагрузкой 2 кВт приведены в таблице 7.1.

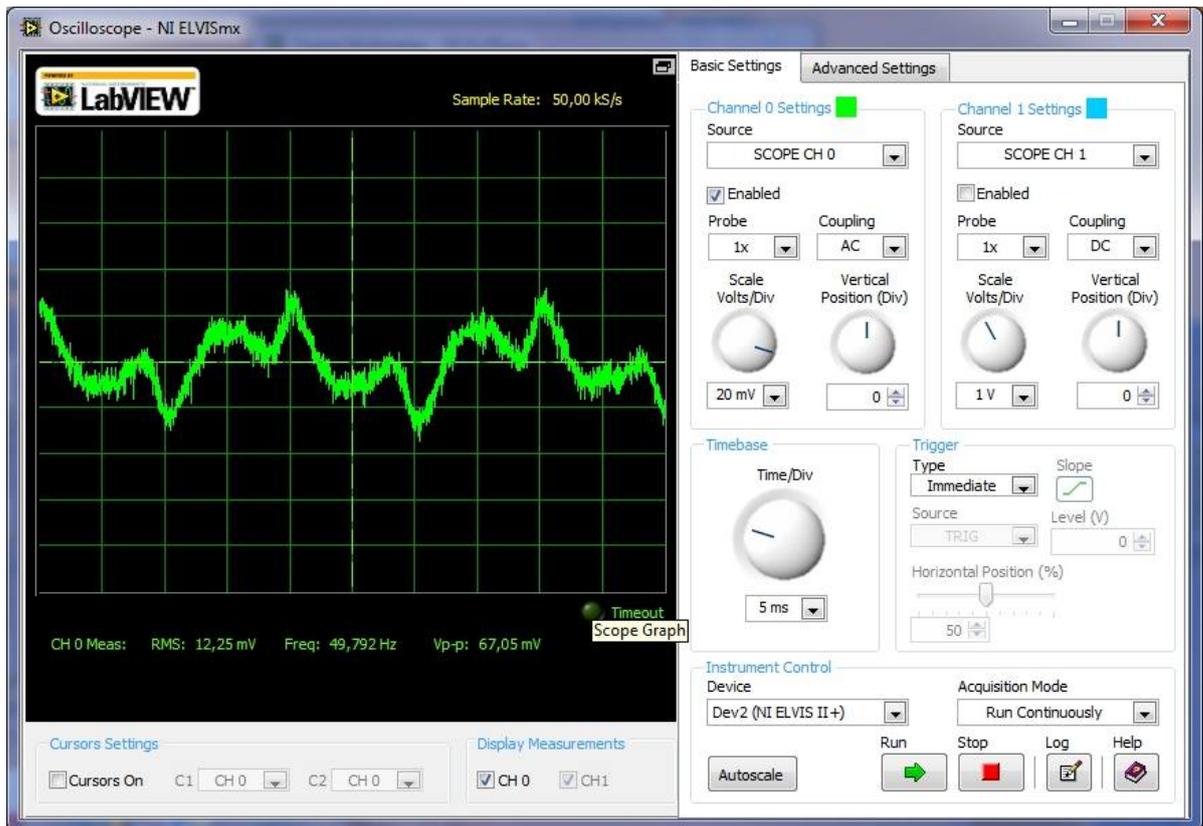
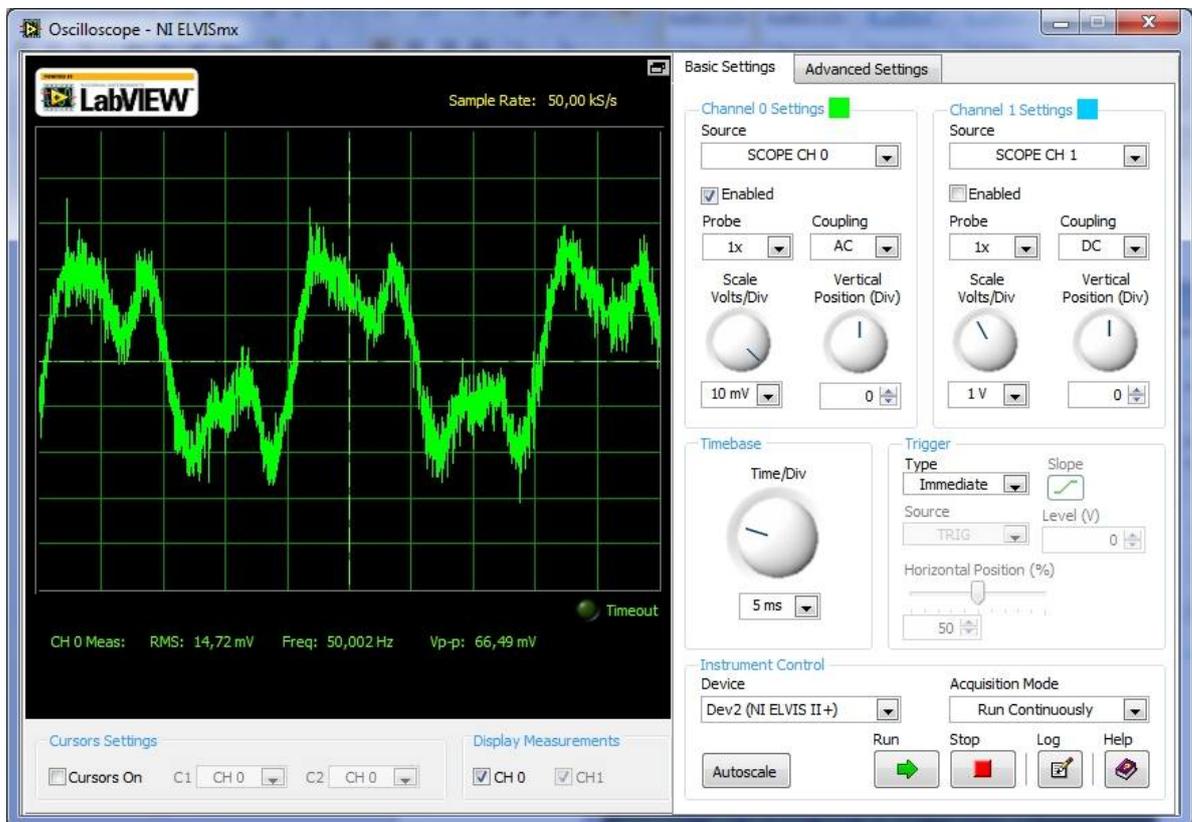
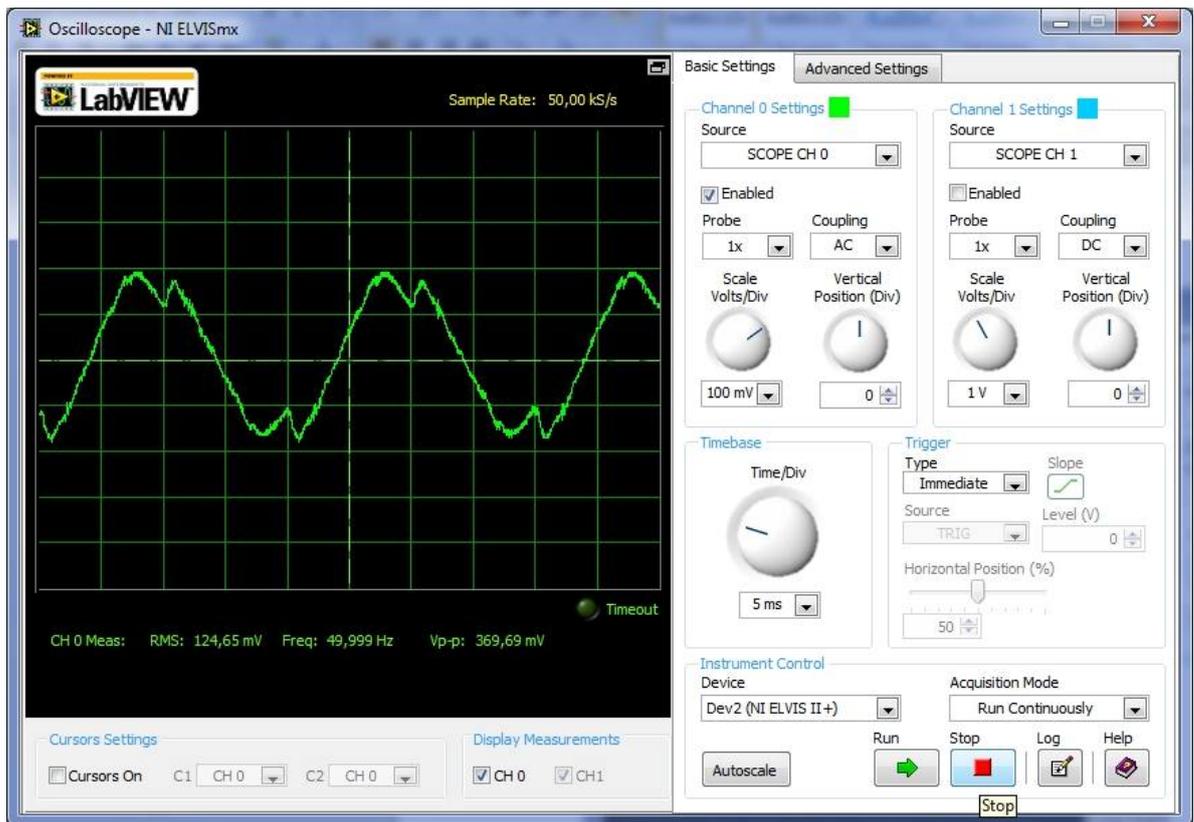


Рисунок 7.13 – Осциллограмма напряжения при отсутствии нагрузки

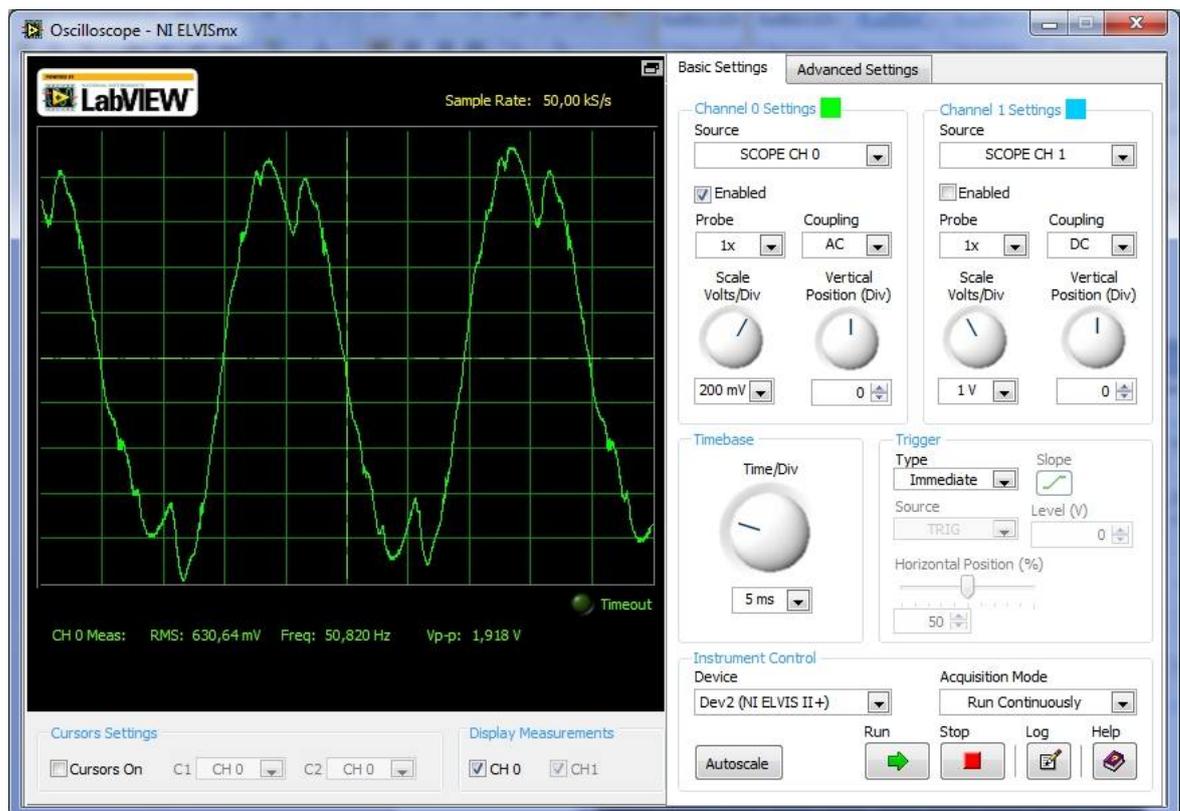


а

Рисунок 7.14, лист 1 – Осциллограммы напряжения при различном удалении индуктивного датчика от провода с нагрузкой 2 кВт



б



в

Рисунок 7.14, лист 2 – Осциллограммы напряжения при различном удалении индуктивного датчика от провода с нагрузкой 2 кВт: а – удаление 50 мм, б – удаление 5 мм, в – датчик расположен вплотную к проводу

Таблица 7.1 – Амплитуда сигнала при различном удалении индуктивного датчика от провода с нагрузкой 2 кВт

Без нагрузки	50 мм	5 мм	0 мм
30 мВ	30 мВ	200 мВ	900 мВ

Следовательно, амплитуда сигнала при наличии нагрузки 2 кВт существенно отличается от амплитуды при отсутствии нагрузки при расстоянии между проводом и датчиком до 5 мм. При значительном удалении (до 50 мм) сигналы практически не отличаются.

Во втором опыте, когда нагрузка составила 0,03 кВт, значимого отличия амплитуд удалось достичь лишь в случае, когда датчик прилегал вплотную к проводу (рисунок 7.15). Амплитуда сигнала при этом составила 44 мВ, что в 1,5 раза больше, чем при отсутствии нагрузки.

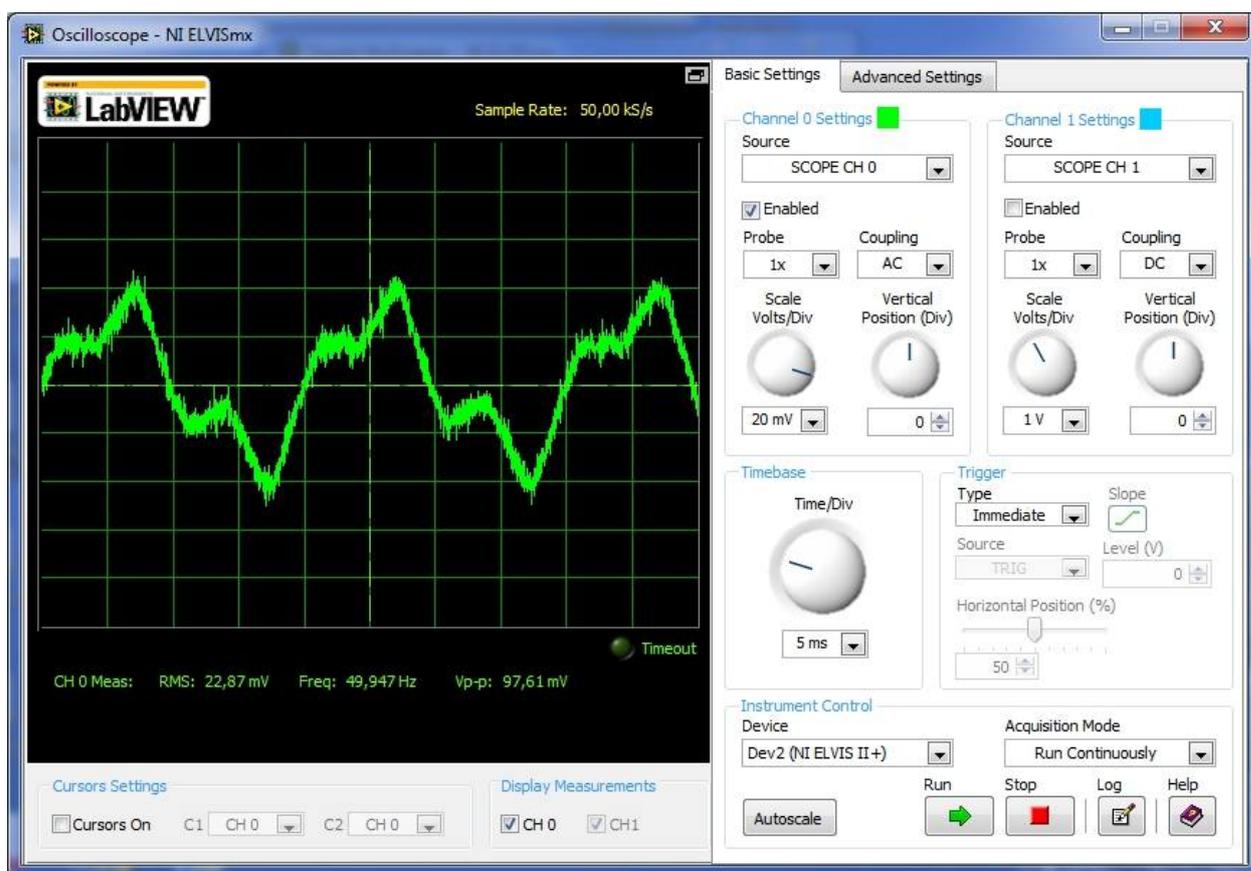


Рисунок 7.15 – Осциллограмма напряжения при плотном прилегании индуктивного датчика к проводу с нагрузкой 0,03 кВт

В результате можно сделать следующие выводы: бесконтактный контроль наличия нагрузки в линии, питающей электрооборудование, может быть осуществлен несколькими способами. При наличии одножильного кабеля, питающего рассматриваемое электрооборудование, целесообразно применять токоизмерительные клещи. Во всех остальных случаях следует использовать индуктивные датчики с усилителем.

С учетом изложенного разработано устройство учета времени наработки электрооборудования (патент на полезную модель 179019 РФ [307]). Схема устройства приведена на рисунке 7.16.

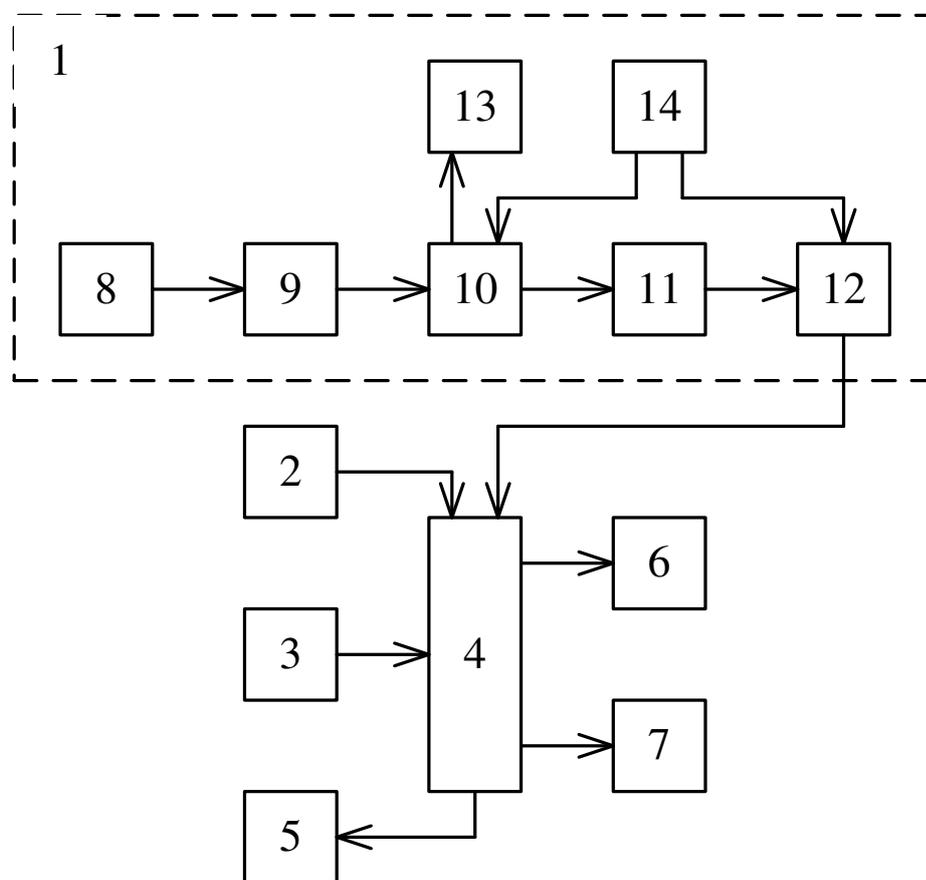


Рисунок 7.16 – Схема устройства учета времени наработки электрооборудования

Устройство учета времени наработки электрооборудования содержит блок измерений 1, часы реального времени 2 и блок управления 3, выходы которых соединены с микроконтроллером 4, соединенным с блоком индикации 5, запоминающим устройством 6 и блоком вывода информации 7. Блок измерений 1 выпол-

нен в виде последовательно соединенных датчика переменного магнитного поля 8, блока усиления и фильтрации 9, компаратора 10, детектора переменного напряжения 11 и блока сравнения 12, при этом компаратор и блок сравнения связаны с источником опорного напряжения 14, выход компаратора соединен со световым индикатором 13, а выход блока сравнения соединен с входом микроконтроллера.

Устройство работает следующим образом. Датчик переменного магнитного поля 8 реализован на основе кольцевого магнитопровода из магнитомягкого ферромагнитного материала, имеющего разрыв с магнитодиэлектрической вставкой. На магнитопроводе намотана сигнальная обмотка, выводы которой подключены к входу блока усиления и фильтрации 9. Магнитопровод датчика располагается возле контролируемого кабеля таким образом, чтобы разрыв магнитопровода находился в непосредственной близости от одной из его токоведущих жил. Переменное магнитное поле, являющееся суперпозицией магнитных полей всех токоведущих жил кабеля, через магнитодиэлектрическую вставку проникает внутрь магнитопровода датчика и создает на выводах его обмотки ЭДС, пропорциональную абсолютному значению протекающего тока, которая поступает на вход усилительного тракта. Наличие переменного магнитного поля определенной амплитуды свидетельствует о наличии тока в питающем кабеле и, следовательно, в включенном состоянии электрооборудования. Блок усиления и фильтрации 9 усиливает сигнал датчика и ограничивает его частотный диапазон посредством полосового фильтра (например, четвертого порядка), настроенного на частоту промышленной сети. Усиленный сигнал поступает на вход компаратора 10, где производится его сравнение с величиной напряжения, формируемого источником опорного напряжения 14, в результате чего на выходе компаратора формируется последовательность импульсов, скважность которых пропорциональна амплитуде анализируемого тока. Импульсы подаются на световой индикатор 13, яркость свечения которого пропорциональна величине скважности, что позволяет обеспечивать точную настройку расположения датчика относительно кабеля. Детектор переменного напряжения 11 преобразует импульсы с выхода компаратора 10 в пост-

янное напряжение, величина которого пропорциональна амплитуде анализируемого тока. Это напряжение поступает на вход блока сравнения 12, который, сравнивая его с величиной опорного напряжения источника 14, формирует двоичный цифровой сигнал наличия тока в кабеле, поступающий на вход микроконтроллера 4. Перечисленные выше электронные компоненты 8 – 14 формируют блок измерений 1. Блок управления 3 содержит набор кнопок и переключателей, предназначенных для управления микроконтроллером и коррекции показаний часов реального времени 2. Постоянная времени детектора 11 имеет значение 1-2 с, что позволяет надежно фильтровать импульсные помехи от электрооборудования, расположенного в непосредственной близости от устройства. Анализируя сигнал наличия тока в кабеле и используя информацию часов реального времени 2, микроконтроллер производит учет времени работы электрооборудования, результаты которого сохраняются в запоминающем устройстве 6, выводятся на экран блока индикации 5 и могут быть переданы за пределы устройства с помощью блока вывода информации 7.

Разработан опытный образец устройства учета времени наработки электрооборудования. На рисунке 7.17 изображена межблочная схема данного устройства. Спроектированное устройство включает в себя четыре активных датчика тока (их количество зависит от количества контролируемых единиц или групп ЭО), блок концентратора и блок питания.

Электрическая схема датчика тока с блоком усиления и фильтрации представлена на рисунке 7.18. Для усиления сигнала применяется четыре усилительных каскада на операционных усилителях с различными коэффициентами усиления, выполненных на двух микросхемах AD8542. После первого и второго каскада предусмотрены RC-фильтры для снижения шумов (они обозначены на схеме соответственно R5, C4 и R8, C7).

Сигнал от датчиков тока поступает на концентратор, который содержит пороговый элемент с гистерезисом (рисунок 7.19). Концентратор обрабатывает сигналы датчиков, преобразуя аналоговый сигнал в дискретный (0 или 1) в зависимости от того, включено ли данное оборудование или выключено. Для визуального

контроля включения электрооборудования предусмотрены светодиоды HL1 – HL4.

Для передачи полученных сигналов на компьютер с применением ЭВМ предусмотрен микроконтроллерная плата Arduino-Uno.

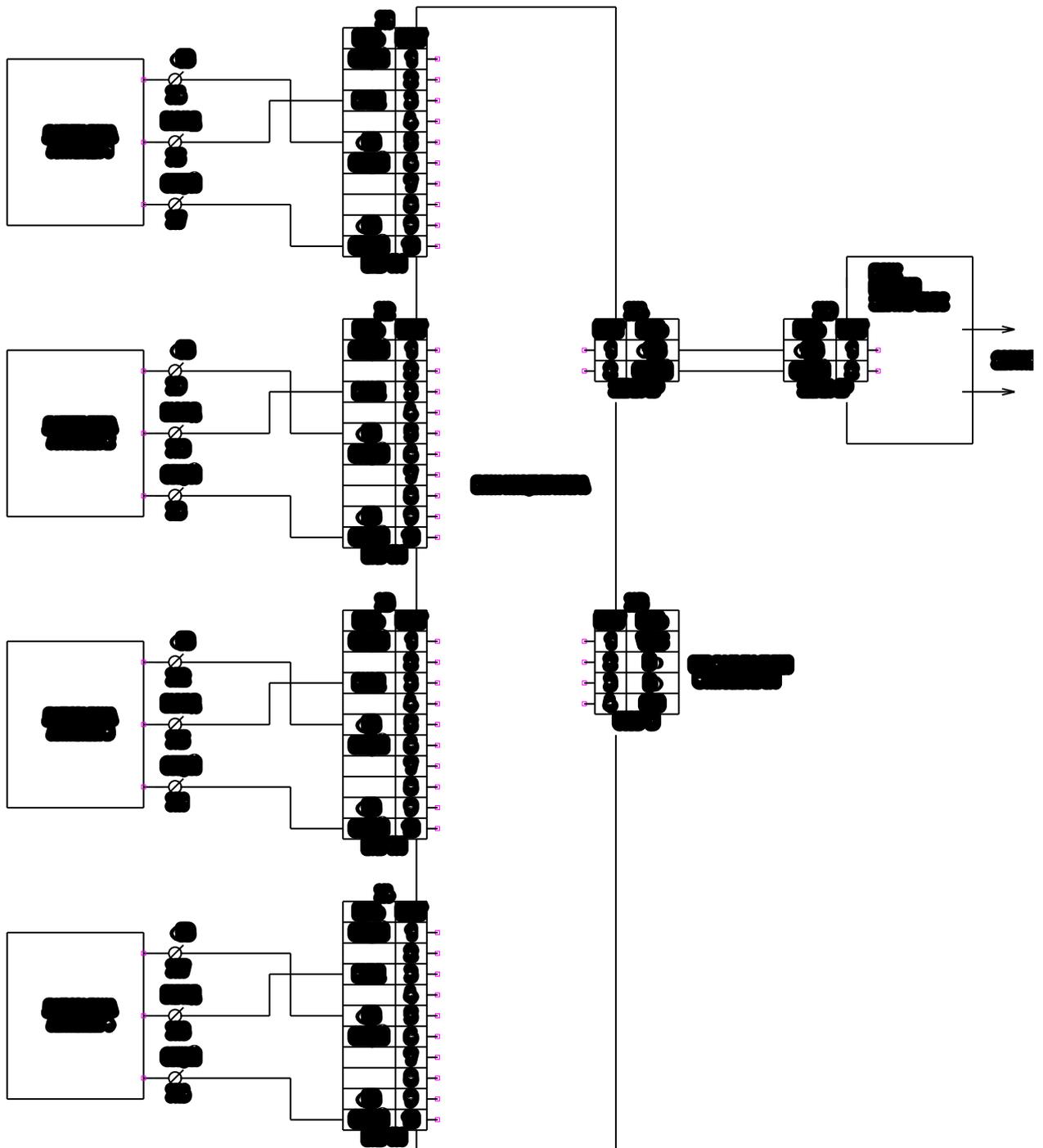


Рисунок 7.17 – Межблочная схема устройства учета времени наработки электрооборудования

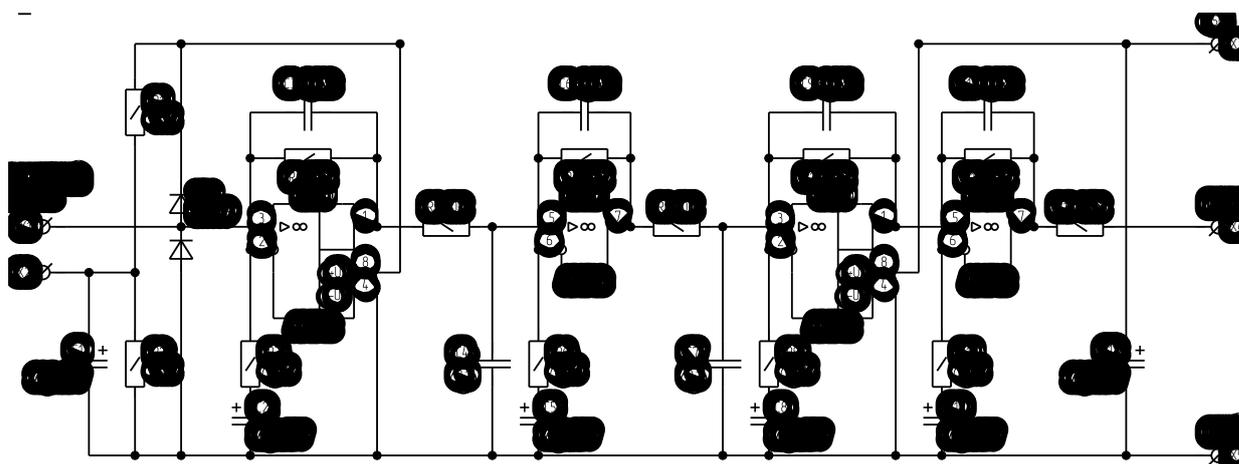


Рисунок 7.18 – Электрическая схема датчика тока
с блоками усиления и фильтрации

На основе разработанных схем изготовлены печатные платы концентратора (рисунок 7.20) и активного датчика тока (рисунок 7.21).

Внешний вид опытного образца устройства учета времени наработки электрооборудования приведен на рисунке 7.22.

Данное устройство позволит расширить возможности контроля и регистрации времени работы электрооборудования за счет применения бесконтактного метода контроля переменного магнитного поля, индуцируемого током в питающем кабеле, поскольку оно применимо при отсутствии технической возможности рассечки жил кабеля с целью установки оборудования для подключения датчиков тока и напряжения.

Таким образом, аппаратная часть предлагаемой системы контроля и управления электропотреблением в производственных процессах на железнодорожном транспорте включает в себя портативный анализатор качества электроэнергии для измерения параметров электропотребления и устройство учета времени наработки электрооборудования, а ввод информации об объеме производства и климатических факторах осуществляется оператором.

Программная часть предлагаемой системы реализована в виде «Программного комплекса для контроля энергетической эффективности потребителей электрической энергии» (свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2017660179) [308].

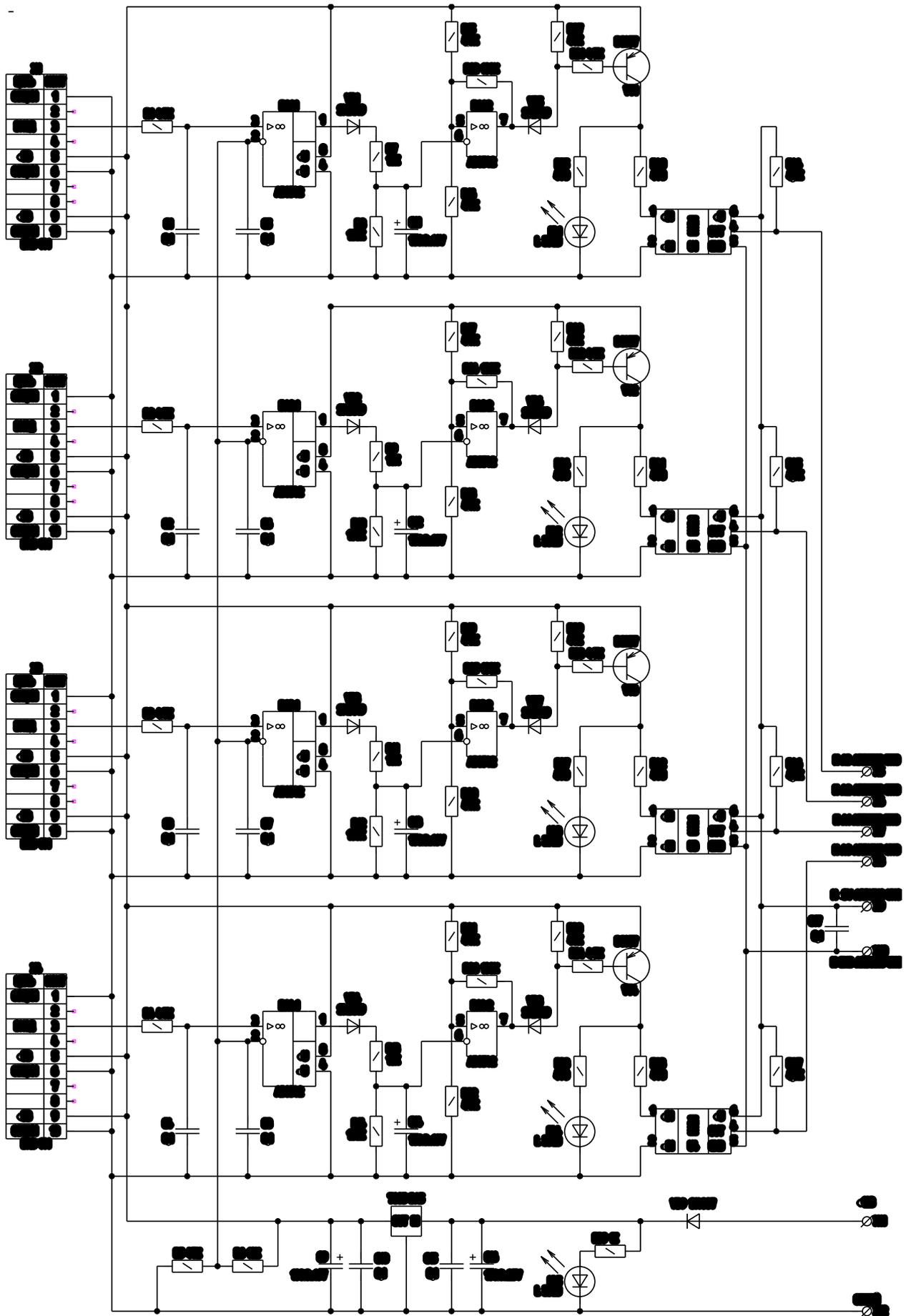


Рисунок 7.19 – Электрическая схема концентратора

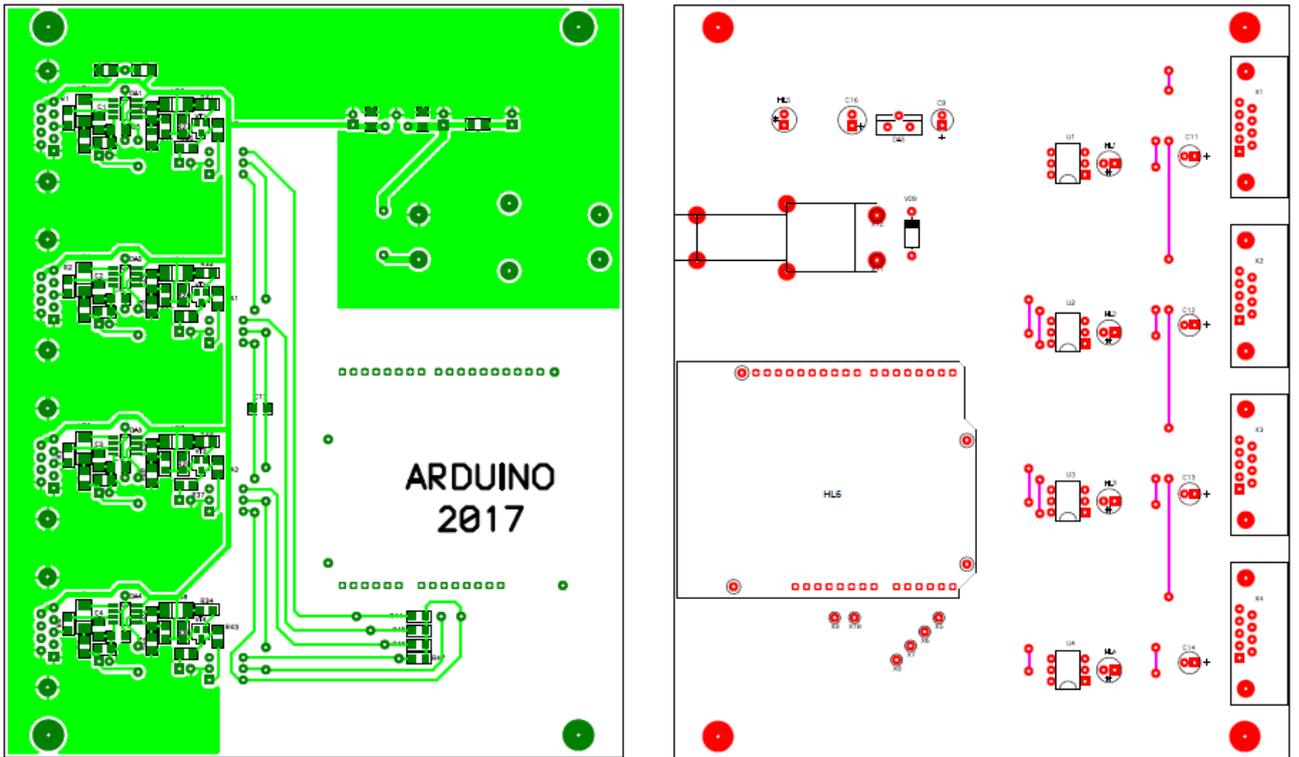


Рисунок 7.20 – Печатная плата концентратора

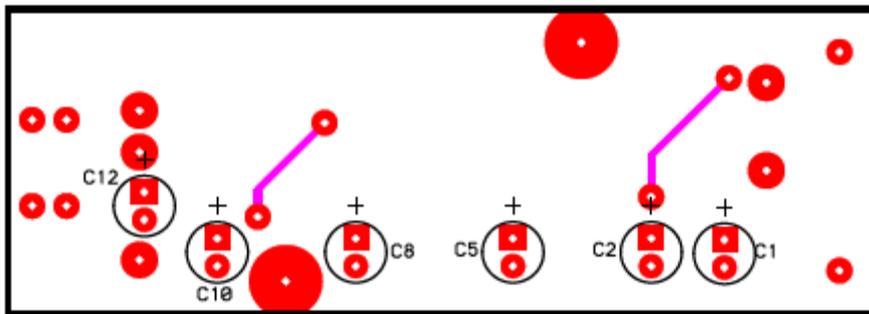
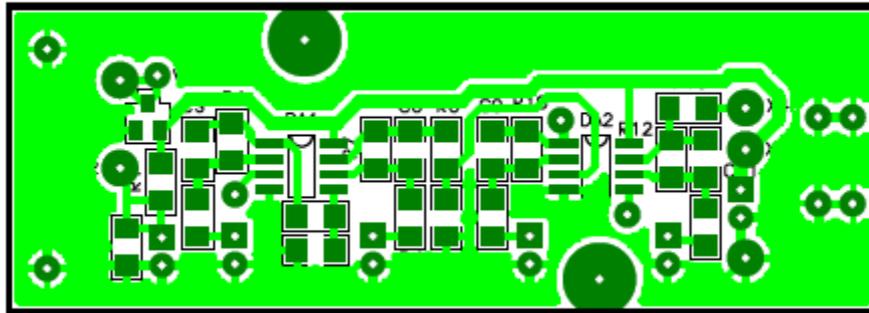


Рисунок 7.21 – Печатная плата активного датчика тока



Рисунок 7.22 – Внешний вид опытного образца устройства учета времени работы электрооборудования

Алгоритм функционирования программного комплекса, который приведен на рисунке 7.23, состоит из трех этапов.

На первом этапе осуществляется расчет и анализ показателей энергоэффективности базового периода.

Для этого на выбранном объекте железнодорожного транспорта осуществляется подключение измерительного оборудования и производится сбор данных о расходе электроэнергии и влияющих факторах в течение определенного времени. С помощью устройства учета времени наработки электрооборудования производится измерение времени работы каждой контролируемой единицы ЭО (группы ЭО), которое является одним из факторов, включаемых в дальнейшем в математическую модель. С использованием полученных данных формируется выборка расхода электроэнергии и влияющих факторов, составляется корреляционная матрица и осуществляется отбор факторов согласно методологии, представленной в главе 2.

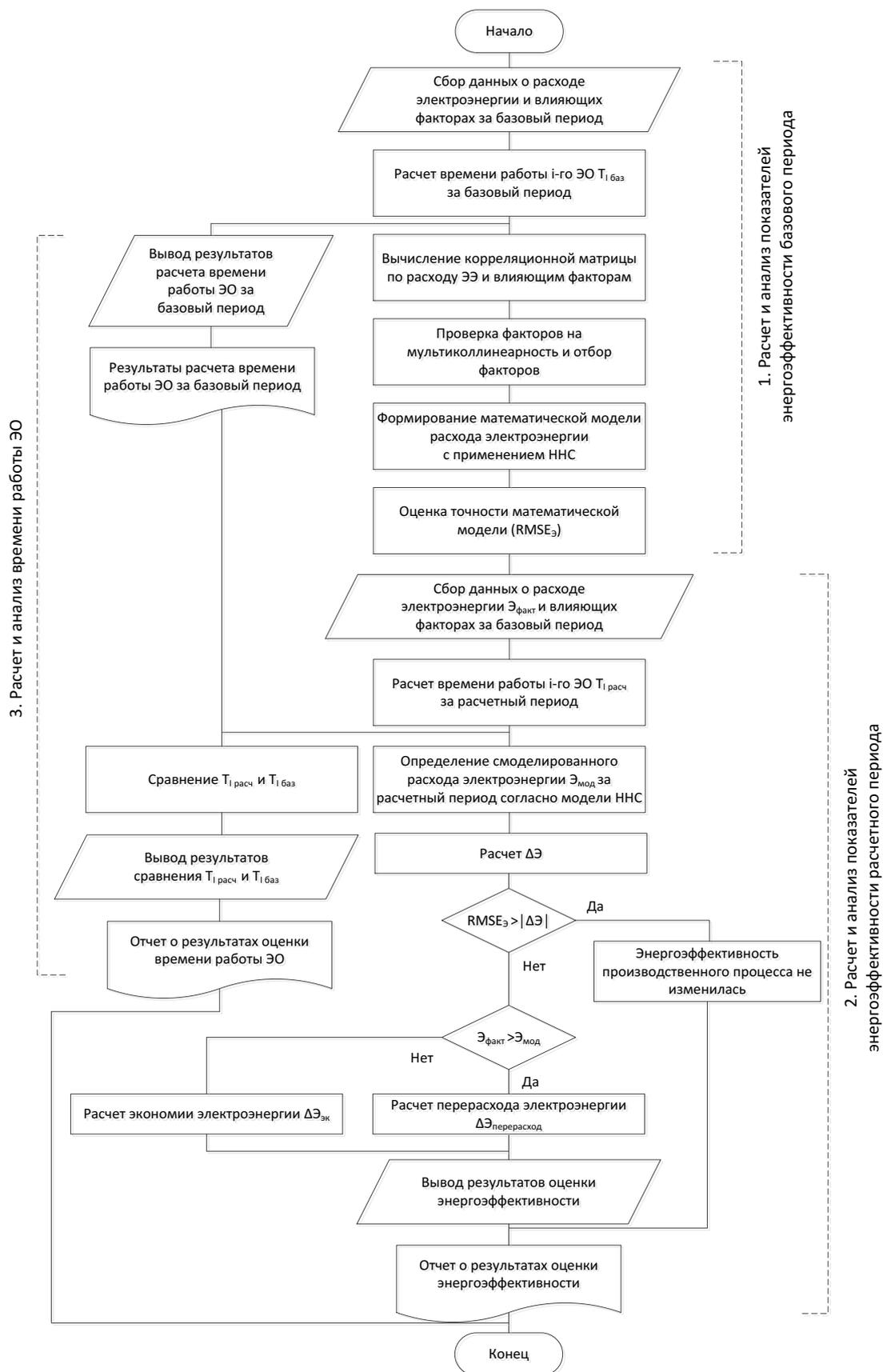


Рисунок 7.23 – Алгоритм функционирования программной части автоматизированной системы контроля и управления электропотреблением в производственных процессах на железнодорожном транспорте

Затем осуществляется формирование математической модели на основе ННС, которая может описана выражением:

$$W = f(V_{\text{произв}}, t, T_{\text{св.дня}}, T_{\text{ЭО1}}, T_{\text{ЭО2}} \dots T_{\text{ЭОn}}), \quad (7.1)$$

где $T_{\text{ЭО1}}, T_{\text{ЭО2}} \dots T_{\text{ЭОn}}$ – время работы соответствующего ЭО (группы ЭО).

Данный этап является «базовым» и служит основой для дальнейшего функционирования системы мониторинга электропотребления производственного процесса.

На втором этапе осуществляется расчет и анализ показателей энергоэффективности расчетного периода. Для этого в течение контролируемого периода времени осуществляется непрерывный сбор данных о фактическом расходе электроэнергии и соответствующих ему влияющих факторах, в том числе о времени работы каждой контролируемой единицы ЭО (группы ЭО). Затем осуществляется определение смоделированного расхода электроэнергии $\mathcal{E}_{\text{мод}}$ за расчетный период согласно модели ННС путем подставления в расчетную модель фактических значений влияющих факторов. Оценивается расхождение между фактическим и смоделированным расходом электроэнергии $\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{факт}} - \mathcal{E}_{\text{мод}}$:

– если $\text{RMSE}_{\mathcal{E}} > |\Delta\mathcal{E}|$, то это расхождение меньше погрешности модели, следовательно, нет основания говорить об изменении энергоэффективности производственного процесса;

– если выполняются условия $\Delta\mathcal{E} > 0$ и $\text{RMSE}_{\mathcal{E}} \leq |\Delta\mathcal{E}|$, то наблюдается перерасход электроэнергии;

– если выполняются условия $\Delta\mathcal{E} < 0$ и $\text{RMSE}_{\mathcal{E}} \leq |\Delta\mathcal{E}|$, то наблюдается экономия электроэнергии.

Результаты оценки энергоэффективности представляются в форме отчета.

Параллельно с первым и вторым реализуется третий этап, связанный с контролем времени работы ЭО. Данная функция системы может быть полезна для лиц, ответственных за энергосбережение в СП, например, для контроля невыключенного освещения или вычислительной техники в нерабочее время, длительной работы станочного оборудования на холостом ходу и т.д.

Дополнительной функцией автоматизированной системы контроля и управления электропотреблением предприятий является возможность планирования технического обслуживания и ремонта ЭО в зависимости от фактической наработки.

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 будет применяться специалистами, ответственными за энергосбережение, или сторонней организацией-энергоаудитором для периодического контроля показателей энергоэффективности в наиболее проблемных (или энергоемких) цехах, производственных участках или зданиях в границах СП.

Во втором случае отсутствует возможность сформировать достаточную выборку исходных данных для моделирования ввиду краткосрочности эксперимента, поэтому сравнение фактических показателей энергоэффективности должно осуществляться с аналогичными подразделениями в других СП, либо с нормативными (паспортными) характеристиками.

Далее приведены основные результаты апробации предлагаемой системы для различных вариантов ее функционирования [309 – 317].

7.3 Апробация автоматизированной системы контроля и управления электропотреблением в производственных процессах на железнодорожном транспорте

В качестве объекта апробации предлагаемой системы как устройства для мониторинга показателей энергетической эффективности выбрано сервисное локомотивное депо Московка, расположенное в регионе Западно-Сибирской железной дороги. Основное направление деятельности депо – техническое обслуживание и ремонт локомотивов серии 2ЭС6.

Компрессорная станция является одним из наиболее энергоемких объектов депо и потребляет около 15 % электроэнергии. В связи с этим апробация предложенных организационных и технических решений выполнена применительно к производственному процессу данного объекта.

Внешний вид компрессорного оборудования, применяемого в СЛД Московка, приведен на рисунке 7.24.



а



б

Рисунок 7.24 – Внешний вид компрессорного оборудования в СЛД Московка: а – компрессор 2BM4-15/25M2, б – компрессор ВПЗ-20/9

Счетчик для учета сжатого воздуха в компрессорной отсутствует, в связи с чем невозможно установить «естественный» измеритель работы цеха. Поэтому в качестве измерителя работы компрессорной принят объем ремонта локомотивов в приведенных единицах, так как сжатый воздух используется главным образом на нужды ремонта.

Таким образом, в составе рассматриваемого цеха используется следующее оборудование:

- компрессор № 1 2ВМ4-15/25М2 мощностью 160 кВт;
- компрессор № 2 ВПЗ-20/9 мощностью 132 кВт;
- насос для охлаждения компрессоров мощностью 7,5 кВт;
- электрическая тепловая пушка мощностью 15 кВт.

Индуктивные датчики для учета времени наработки электрооборудования подключены в распределительном щите компрессорной (рисунки 7.25, 7.26). Для учета потребления электроэнергии использовался Энерготестер ПКЭ-А, который был подключен к вводу компрессорной. Измерения выполнены в феврале 2018 г.

В результате измерения времени работы и потребления электроэнергии оборудования компрессорной были выявлены следующие режимы работы: компрессоры № 1 и № 2 включаются периодически для поддержания давления в «высокой» и «общей» пневматической магистрали депо; насос и электрическая тепловая пушка находятся постоянно в работе. Фрагмент графиков включения и отключения компрессоров № 1 и № 2 представлен на рисунке 7.27.

Включенное состояние компрессора № 1 на рисунке представлено значением штриховыми столбцами, а компрессора № 2 вертикальными линиями. Графики работы компрессорных установок подтверждаются синхронизированным по времени графиком потреблением мощности оборудования компрессорной СЛД Московка (рисунок 7.28).

На основе полученных данных сформирована математическая модель электропотребления на основе ННС, включающая в себя четыре фактора: объем производства, температура воздуха, время работы компрессоров № 1 и № 2.

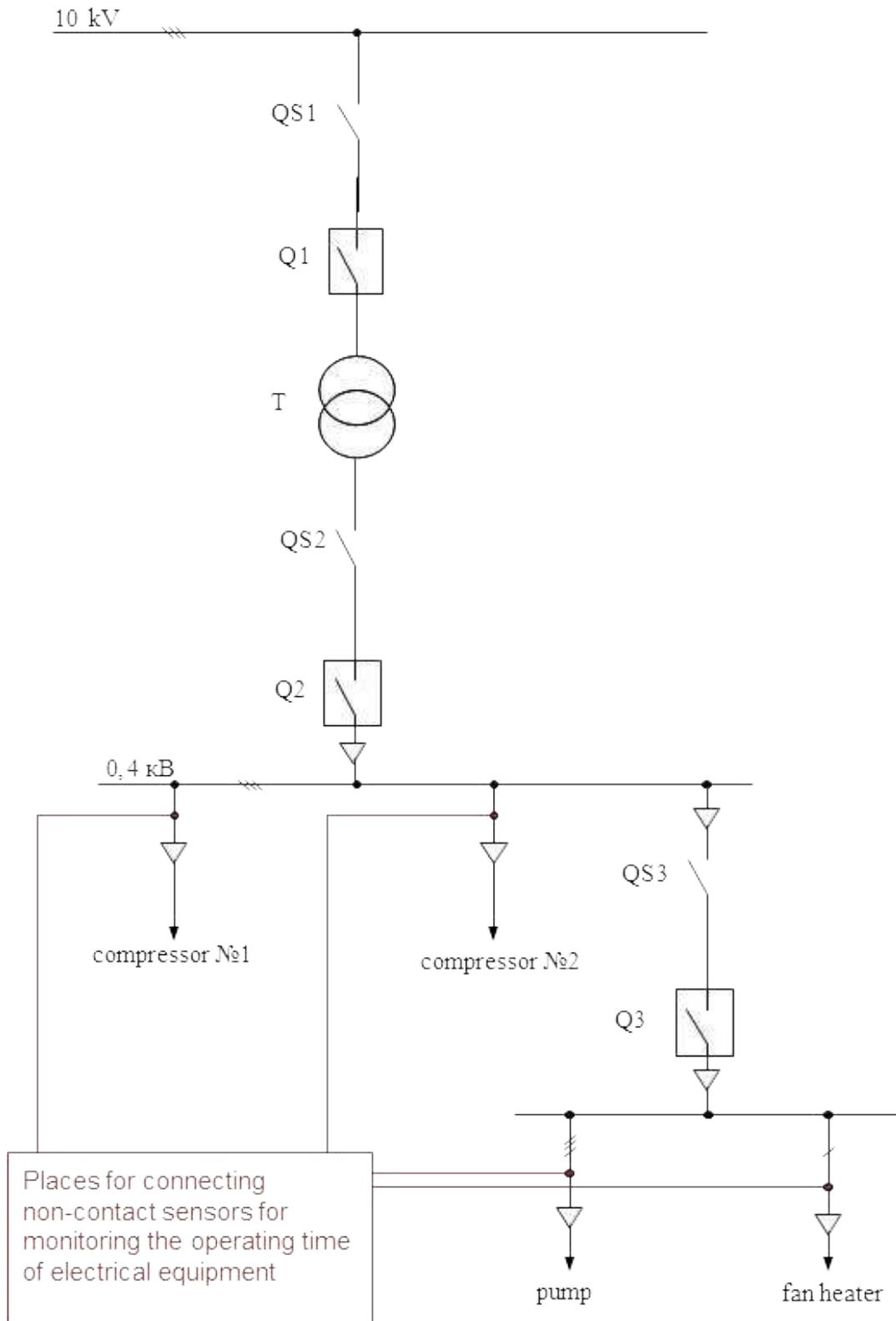


Рисунок 7.25 – Схема проведения эксперимента

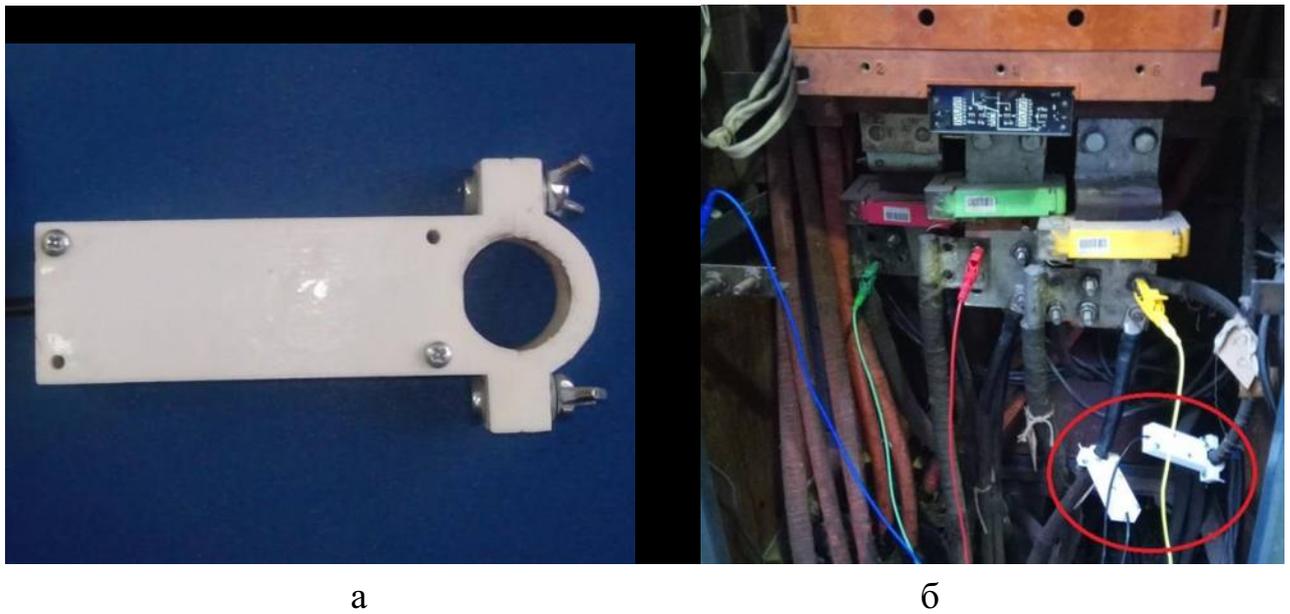


Рисунок 7.26 – Устройство для крепления индуктивного бесконтактного датчика к кабелю (а) и внешний вид подключенных датчиков (б)

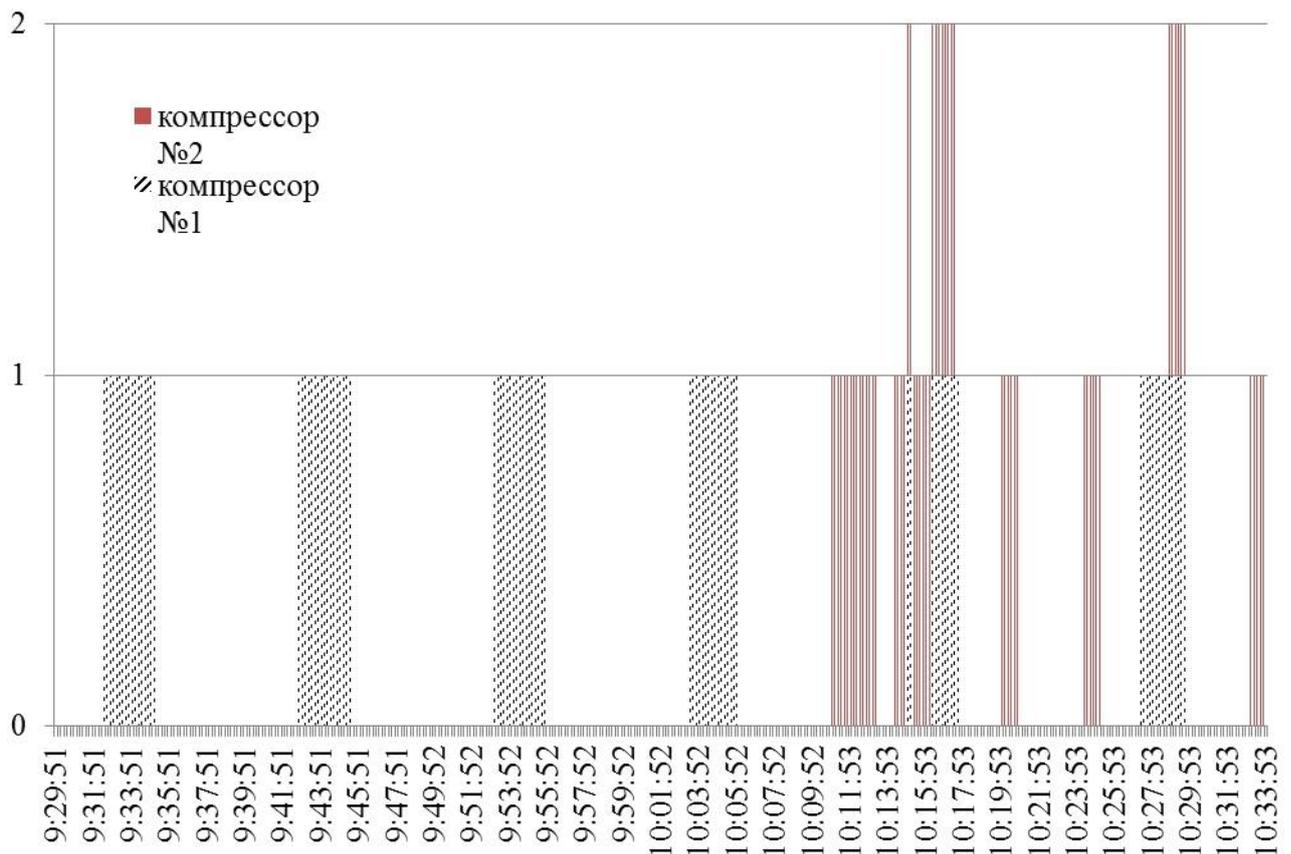


Рисунок 7.27 – Графики работы компрессоров № 1 и № 2 СЛД Московка

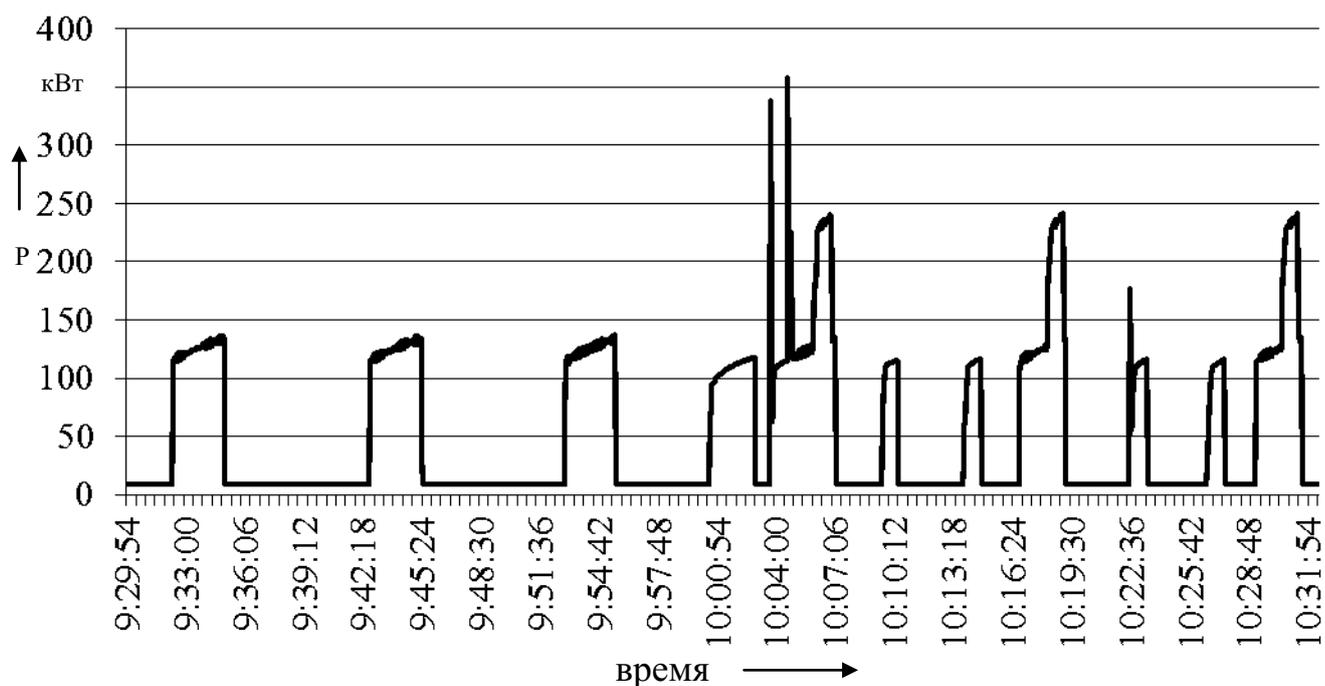


Рисунок 7.28 – График потребления мощности оборудования компрессорной СЛД Московка

В связи с тем, что насос и электрическая тепловая пушка находятся постоянно в работе, их время работы не было учтено в качестве влияющего фактора. Также не была принята во внимание продолжительность светового дня, так как освещение компрессорной получает питание от другого распределительного щита. Разработанная ННС имеет комбинацию функций принадлежности на входе 2-3-3-2. При такой структуре математической модели процесса электропотребления компрессорной средняя квадратическая ошибка $RMSE_{\mathcal{E}}$ составила 84 кВт·ч и средняя относительная погрешность $MAPE$ – 7,1 %.

На основе этой модели выполнен анализ энергетической эффективности работы оборудования компрессорной с применением программного комплекса (рисунок 7.29). Получено, что за рассматриваемый период (1 сутки) произошло снижение потребления электроэнергии на $\Delta \mathcal{E} = 21$ кВт·ч. Так как $RMSE_{\mathcal{E}} > |\Delta \mathcal{E}|$, нет основания говорить об изменении энергоэффективности производственного процесса.

Таким образом, разработанные усовершенствованные методы и технические средства для мониторинга и регулирования электропотребления были применены автором в ходе выполнения работ по энергетическому обследованию СЛД Мос-

ковка ООО «СТМ-Сервис», что подтверждается актом об использовании результатов научных исследований и разработок в производстве б/н от 10.04.2018 (приложение И).

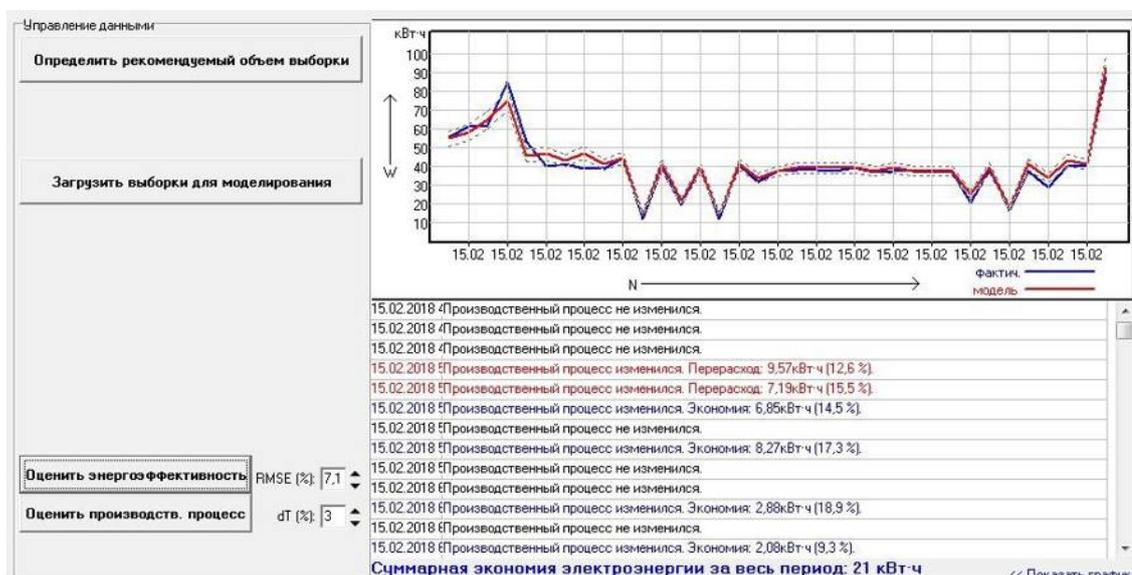


Рисунок 7.29 – Результаты оценки энергоэффективности производственного процесса компрессорной СЛД Московка

Переносной вариант предлагаемой системы был апробирован в пункте технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ) Иртышское, расположенном в регионе Западно-Сибирской железной дороги. Данный объект выбран как один из наиболее проблемных с точки зрения низких показателей энергоэффективности.

Основная функция ПТОЛ Иртышское – обеспечение технического обслуживания локомотивов в объеме ТО-2, в том числе экипировки песком. Для этого на территории ПТОЛ находится пескосушилка, в состав которой входят склад сырого песка на открытом воздухе, сушильные печи, башни для хранения сухого песка и устройства для подачи песка на крышу ПТОЛа.

Подача песка в крышесые экипировочные устройства осуществляется с применением сжатого воздуха. В состав компрессорной станции ПТОЛ входят три поршневых компрессора марки 103ВП-20/8, один из которых находится в ремонте (рисунок 7.30).



Рисунок 7.30 – Общий вид компрессорной станции ПТОЛ Иртышское

В ходе апробации предлагаемых решений в период с 23.08.2018 г. по 24.08.2018 г. проведен эксперимент по исследованию режимов работы компрессоров в ПТОЛ Иртышское. Для этой цели на компрессорной станции было установлено оборудование по схеме, аналогичной рисунку 7.25. Внешний вид подключенных устройств приведен на рисунке 7.31.

График нагрузки компрессорной станции ПТОЛ Иртышское представлен на рисунке 7.32. Среднесуточное потребление электроэнергии компрессорной станцией составило 2460 кВт·ч, соответствующее годовое потребление – 898 тыс. кВт·ч.

Результаты эксперимента показали, что один из компрессоров всегда находится в работе даже в ночное время, хотя технологический процесс подготовки песка не предусматривал его подачу в этот период. Дальнейшие исследования позволили установить, что автоматика включения/отключения компрессорного оборудования по уровню давления на объекте выведена из работы по причине пе-

регорания контакторов при коммутационных процессах из-за высоких пусковых токов. Вместо этого при достижении давления в ресивере давления 8 атм. излишки сжатого воздуха сбрасываются через предохранительный клапан. Такой режим работы является чрезвычайно неэффективным.



Рисунок 7.31 – Внешний вид подключенного измерительного оборудования на компрессорной станции ПТОЛ Иртышское

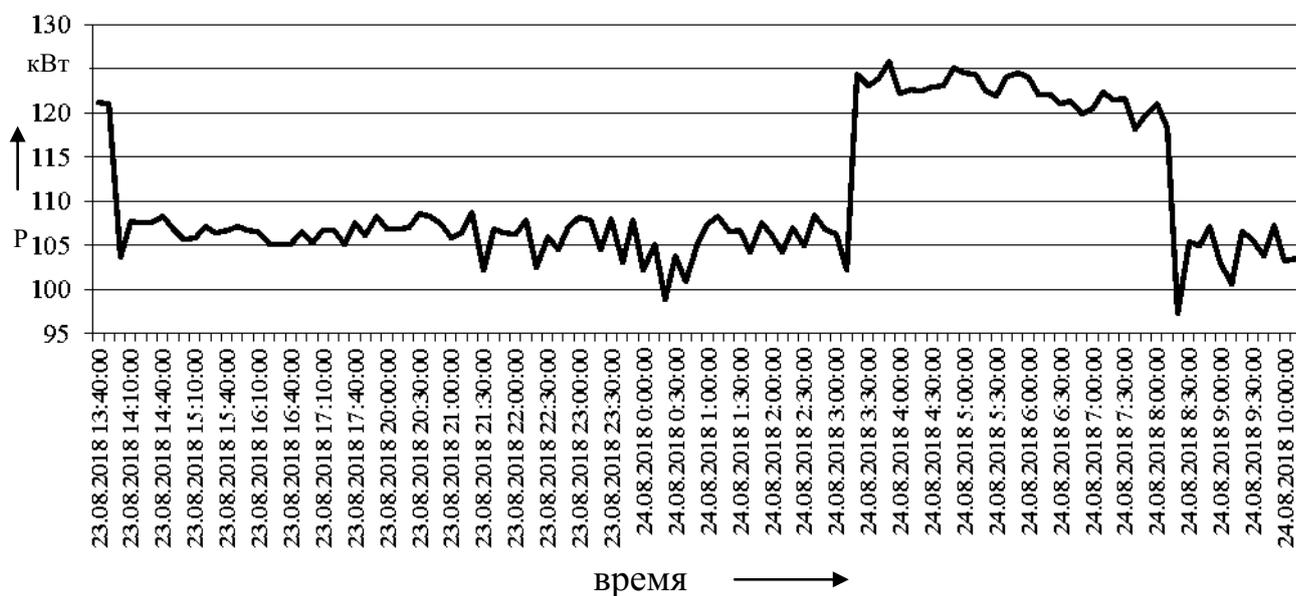


Рисунок 7.32 – График мощности, потребляемой электродвигателями компрессорной станции ПТОЛ Иртышское

Таким образом, использование предложенных методов и технических средств для мониторинга и управления показателями энергетической эффектив-

ности производственных процессов в ПТОЛ Иртышское позволило установить факт нерационального использования электроэнергии и в дальнейшем предложить мероприятия по его снижению.

7.4 Расчет технико-экономической эффективности мероприятий по повышению энергетической эффективности

Необходимо отметить, что внедрение систем мониторинга показателей энергетической эффективности само по себе не приводит к снижению расхода ТЭР, однако информация, которая своевременно формируется на их основе, является базой для применения управляющих воздействий по повышению энергоэффективности в форме ОТМ.

В результате применения разработанной автоматизированной системы контроля и управления электропотреблением в ПТОЛ Иртышское установлено, что режим работы компрессорного оборудования является чрезвычайно неэффективным, что приводит к значительному нерациональному расходу электроэнергии. В качестве управляющих воздействий можно рассмотреть два мероприятия:

1. Замена одного из действующих компрессоров на современный с частотно-регулируемым приводом.
2. Установка на двух действующих компрессорных агрегатах устройств плавного пуска двигателей.

Расчет технико-экономической эффективности применения автоматизированной системы контроля и управления электропотреблением в совокупности с реализацией указанных мероприятий выполнен на основе методики [276] в следующем порядке:

1) Расчет притоков денежных средств, которые включают в себя прирост доходов, вызванный использованием новой техники, разработанной в рамках выполнения работ, а при наличии дополнительного эффекта – экономию эксплуатационных расходов и инвестиционных затрат.

2) Расчет оттоков денежных средств. В состав оттоков денежных средств работ с коммерческим эффектом включаются инвестиционные затраты и увели-

чение эксплуатационных расходов (отрицательные эффекты), связанные с внедрением результатов работ.

3) Расчет показателей экономической эффективности: чистого дисконтированного дохода (ЧДД) и срока окупаемости.

Чистый дисконтированный доход ЧДД, тыс. руб., определяется по формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=1}^T (\Pi_t - O_t)(1+r)^{-t}, \quad (7.2)$$

где Π_t – притоки денежных средств работы в году t (таблица 4);

O_t – оттоки денежных средств работы в году t (таблица 5);

t – любой (текущий) год горизонта планирования;

T – число лет горизонта планирования (принимается 10 лет);

r – ставка дисконтирования (принимается равной ключевой ставке Банка России, в данном случае составляет 0,0825).

Интерпретация чистого дисконтирования дохода работы производится следующим образом:

Если $\text{ЧДД} > 0$ за период горизонта планирования, то работа признается экономически эффективной;

Если $\text{ЧДД} < 0$ за период горизонта планирования, то работа признается экономически неэффективной.

Срок окупаемости $T_{\text{ок}}$, лет, определяется по формуле:

$$T_{\text{ок}} = t + \frac{\text{ЧДД}_t}{\text{ЧДД}_{t+1} - \text{ЧДД}_t}, \quad (7.3)$$

где t – год, для которого сумма дисконтированного денежного потока, рассчитанная нарастающим итогом, еще отрицательна;

$(t+1)$ – год, для которого сумма дисконтированного денежного потока, рассчитанная нарастающим итогом, становится положительной.

Работа признается эффективной в случае, если срок окупаемости достигнут в течение периода горизонта планирования.

Вариант 1. Для снижения нерационального расхода электроэнергии возможна замена одного из действующих поршневых компрессоров на винтовой компрессор с частотно-регулируемым приводом типа ДЭН-132ШМ+ «Оптим». Второй компрессор в этом случае будет подключаться вручную при необходимости. По данным производителя по сравнению с обычным компрессором применение частотно-регулируемого привода позволяет экономить до 30 % от расхода электроэнергии.

Капитальные затраты в этом случае складываются из следующих составляющих:

1) проведение энергетического обследования с применением автоматизированной системы контроля и управления электропотреблением – 313,29 тыс. руб. (согласно договору №406-18 между ООО «СТМ-Сервис» и ОмГУПС);

2) стоимость одного нового компрессора – 2250,0 тыс. руб.;

3) доставка и монтаж оборудования (10 % от стоимости) – 225 тыс. руб.

Результирующие капитальные затраты составляют 2788,29 тыс. руб.

Ожидаемое годовое снижение расхода электроэнергии – 458 тыс. кВт·ч, что при тарифе 2,76 руб./кВт·ч составит 1264,1 тыс. руб.

С учетом того, что общий годовой расход электроэнергии ПТОЛ Иртышское составляет 1922,2 тыс. кВт·ч (за 2017 г.), реализация мероприятия 1 позволит повысить энергетическую эффективность на 23,8 %.

Расчет технико-экономических показателей приведен в таблицах 7.2 – 7.4.

Сводные результаты расчета показателей экономической эффективности варианта 1 приведены в таблице 7.5.

Мероприятие следует признать эффективным, так как ЧДД за 10 лет составит 3045,4 тыс. руб., а срок окупаемости 4,3 года.

Таблица 7.4 – Расчет чистого дисконтированного дохода по варианту 1

№	Показатели	Годы горизонта планирования										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Всего
Операционная деятельность												
1	Притоки от операционной деятельности (тыс. руб.)	-	1264,1	1264,1	1264,1	1264,1	1264,1	1264,1	1264,1	1264,1	1264,1	11376,9
2	Оттоки от операционной деятельности (тыс. руб.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Увеличение/уменьшение остаточной стоимости основных средств (тыс. руб.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	на начало года	0	2250	2025	1800	1575	1350	1125	900	675	450	12150
5	на конец года	2250	2025	1800	1575	1350	1125	900	675	450	225	12375
6	Увеличение/уменьшение среднегодовой остаточной стоимости основных средств (тыс. руб.) (стр.4 + стр.5)/2	1125	2137,5	1912,5	1687,5	1462,5	1237,5	1012,5	787,5	562,5	337,5	12262,5
7	Увеличение/уменьшение налога на имущество организаций (тыс. руб.) (стр.6 * ставка налога на имущество организаций)	24,75	47,025	42,075	37,125	32,175	27,225	22,275	17,325	12,375	7,425	269,775
8	База по налогу на прибыль организаций (тыс. руб.) (стр. 1 - стр.2 - стр.7)	-24,75	1217,075	1222,025	1226,975	1231,925	1236,875	1241,825	1246,775	1251,725	1256,675	11107,125
9	Увеличение/уменьшение налога на прибыль организаций (тыс. руб.) (стр.8 * ставка налога на прибыль организаций)	-4,95	243,415	244,405	245,395	246,385	247,375	248,365	249,355	250,345	251,335	2221,425
10	Денежный поток от операционной деятельности (тыс. руб.) (стр.1 - стр. 2 - стр. 7 - стр.9)	-19,8	973,66	977,62	981,58	985,54	989,5	993,46	997,42	1001,38	1005,34	8885,7
Инвестиционная деятельность												
11	Оттоки от инвестиционной деятельности (тыс. руб.)	2788,29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2788,29
12	Денежный поток от инвестиционной деятельности (тыс. руб.) (стр.2-стр.11)	-2788,29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2788,29
13	Денежный поток по работе (стр.10+стр.12)	-2808,09	973,66	977,62	981,58	985,54	989,5	993,46	997,42	1001,38	1005,34	6097,41
14	Ставка дисконтирования (r)	0,0825	0,0825	0,0825	0,0825	0,0825	0,0825	0,0825	0,0825	0,0825	0,0825	-
15	Дисконтный множитель $(1+r)^{-t}$	0,92	0,85	0,79	0,73	0,67	0,62	0,57	0,53	0,49	0,45	-
16	Дисконтированный денежный поток (тыс. руб.) (стр. 13*стр.15)	-2594,1	830,9	770,7	714,8	663,0	615,0	570,4	529,0	490,6	455,0	3045,4
17	Чистый дисконтированный доход нарастающим итогом (тыс. руб.)	-2594,1	-1763,2	-992,5	-277,6	385,4	1000,4	1570,7	2099,7	2590,4	3045,4	-

Таблица 7.5 – Оценка эффективности варианта 1

Наименование показателя оценки эффективности	Значение показателя	Оценка эффективности
Чистый дисконтированный доход, тыс. руб.	3045,4	Мероприятие является эффективным
Срок окупаемости, лет	4,3	Мероприятие является эффективным

Вариант 2. В связи с тем, что неэффективный режим работы компрессорного оборудования ПТОЛ Иртышское обусловлен невозможностью частого включения/выключения компрессорного оборудования из-за высоких пусковых токов электродвигателей компрессоров, следует рассмотреть вариант внедрения устройства плавного пуска синхронных двигателей компрессоров 103ВП-20/8.

Устройство плавного пуска SSI-132/264-04 марки INSTART на двигатель мощностью 132 кВт имеет стоимость 83 тыс. руб. Требуется установка двух устройств.

Капитальные затраты в этом случае складываются из следующих составляющих:

1) проведение энергетического обследования с применением автоматизированной системы контроля и управления электропотреблением – 313,29 тыс. руб. (согласно договору №406-18 между ООО «СТМ-Сервис» и ОмГУПС);

2) стоимость двух устройств плавного пуска – 166 тыс. руб.;

3) доставка и монтаж оборудования (10 % от стоимости) – 16,6 тыс. руб.;

4) восстановление автоматики работы компрессоров – 50 тыс. руб.

Результирующие капитальные затраты составляют 545,89 тыс. руб.

Ожидаемое годовое снижение расхода электроэнергии – 269,4 тыс. кВт·ч, что при тарифе 2,76 руб./кВт·ч составит 743,5 тыс. руб.

Тогда повышение энергетической эффективности в результате реализации варианта 2 составит 14 %.

Расчет технико-экономических показателей приведен в таблицах 7.6 – 7.8.

Таблица 7.8 – Расчет чистого дисконтированного дохода по варианту 2

№	Показатели	Годы горизонта планирования										Всего
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Операционная деятельность												
1	Притоки от операционной деятельности (тыс. руб.)		743,5	1264,1	1264,1	1264,1	1264,1	1264,1	1264,1	1264,1	1264,1	10856,3
2	Оттоки от операционной деятельности (тыс. руб.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Увеличение/уменьшение остаточной стоимости основных средств (тыс. руб.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	на начало года	0	166	149,4	132,8	116,2	99,6	83	66,4	49,8	33,2	896,4
5	на конец года	166	149,4	132,8	116,2	99,6	83	66,4	49,8	33,2	16,6	913
6	Увеличение/уменьшение среднегодовой остаточной стоимости основных средств (тыс. руб.) (стр.4 + стр.5)/2	83	157,7	141,1	124,5	107,9	91,3	74,7	58,1	41,5	24,9	904,7
7	Увеличение/уменьшение налога на имущество организаций (тыс. руб.) (стр.6 * ставка налога на имущество организаций)	1,826	3,4694	3,1042	2,739	2,3738	2,0086	1,6434	1,2782	0,913	0,5478	19,9034
8	База по налогу на прибыль организаций (тыс. руб.) (стр. 1 - стр.2 - стр.7)	-1,826	740,0306	1260,9958	1261,361	1261,7262	1262,0914	1262,4566	1262,8218	1263,187	1263,5522	10836,397
9	Увеличение/уменьшение налога на прибыль организаций (тыс. руб.) (стр.8 * ставка налога на прибыль организаций)	-0,3652	148,00612	252,19916	252,2722	252,34524	252,41828	252,49132	252,56436	252,6374	252,71044	2167,2793
10	Денежный поток от операционной деятельности (тыс. руб.) (стр.1 - стр. 2 - стр. 7 - стр.9)	-1,4608	592,02448	1008,7966	1009,0888	1009,381	1009,6731	1009,9653	1010,2574	1010,5496	1010,8418	8669,1173
Инвестиционная деятельность												
11	Оттоки от инвестиционной деятельности (тыс. руб.)	545,89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	545,89
12	Денежный поток от инвестиционной деятельности (тыс. руб.) (стр.2-стр.11)	-545,89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-545,89
13	Денежный поток по работе (стр.10+стр.12)	-547,3508	592,02448	1008,7966	1009,0888	1009,381	1009,6731	1009,9653	1010,2574	1010,5496	1010,8418	8123,2273
14	Ставка дисконтирования (r)	0,0825	0,0825	0,0825	0,0825	0,0825	0,0825	0,0825	0,0825	0,0825	0,0825	-
15	Дисконтный множитель $(1+r)^{-t}$	0,92	0,85	0,79	0,73	0,67	0,62	0,57	0,53	0,49	0,45	-
16	Дисконтированный денежный поток (тыс. руб.) (стр. 13*стр.15)	-505,6	505,2	795,3	734,9	679,1	627,5	579,8	535,8	495,1	457,5	4904,6
17	Чистый дисконтированный доход нарастающим итогом (тыс. руб.)	-505,6	-0,4	794,9	1529,8	2208,8	2836,3	3416,2	3952,0	4447,1	4904,6	-

Сводные результаты расчета показателей экономической эффективности варианта 2 приведены в таблице 7.9.

Таблица 7.9 – Оценка эффективности варианта 2

Наименование показателя оценки эффективности	Значение показателя	Оценка эффективности
Чистый дисконтированный доход, тыс. руб.	4904,6	Мероприятие является эффективным
Срок окупаемости, лет	2,0	Мероприятие является эффективным

Мероприятие следует признать эффективным, так как ЧДД за 10 лет составит 4904,6 тыс. руб., а срок окупаемости 2,0 года.

Таким образом, наиболее экономически эффективным следует признать вариант 2.

7.5 Основные результаты и выводы

Анализ научных публикаций и патентной документации показал, что в настоящее время системы мониторинга и управления показателями энергоэффективности производственных процессов на железнодорожном транспорте не получили широкого распространения. Известные проекты направлены на контроль и управление отдельными элементами системы электроснабжения по условно-постоянной составляющей электропотребления (освещение, электроотопление и др.), непосредственно не связанной с производственным процессом. В то же время вопросам мониторинга и управления показателями энергоэффективности по переменной составляющей, которая связана непосредственно с производственным процессом, уделяется недостаточно внимания.

Разработана автоматизированная система контроля и управления электропотреблением производственных процессов на железнодорожном транспорте (патенты 151431 РФ, 183468 РФ), ключевой частью которой является устройство учета времени наработки электрооборудования (патент 179019 РФ). Основной задачей предложенного технического решения является оценка энергетической эф-

фективности производственного процесса объектов железнодорожного транспорта. Программная часть системы функционирует на основе разработанного алгоритма, предусматривающего формирование математической модели электропотребления на основе ННС, и реализуется в виде «Программного комплекса для контроля энергетической эффективности потребителей электрической энергии» (свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2017660179). Изготовлен опытный образец предлагаемой системы и выполнена его апробация на действующих предприятиях железнодорожного транспорта.

Опытное применение автоматизированной системы контроля и управления электропотреблением как устройства для мониторинга показателей энергетической эффективности производственных процессов, выполненное на компрессорной станции СЛД Московка в ходе энергетического обследования, доказало возможность использования предлагаемых технических решений для непрерывного мониторинга расхода электроэнергии, режимов работы электрооборудования и показателей энергоэффективности, что подтверждается актом об использовании результатов научных исследований и разработок в производстве.

Апробация переносного варианта предлагаемой системы для периодического контроля показателей энергоэффективности выполнена в ПТОЛ Иртышское, который является одним из наиболее проблемных подразделений ООО «СТМ-Сервис» с точки зрения нерационального использования ТЭР. По результатам проведенных исследований выявлены причины неэффективного режима работы компрессорной станции и предложены два варианта управляющих воздействий совместно с использованием предлагаемой системы:

- внедрение винтового компрессора с частотно-регулируемым приводом, что приведет к повышению энергоэффективности ПТОЛ Иртышское на 23,8 %;
- монтаж двух устройств плавного пуска, что приведет к повышению энергоэффективности на 14 %.

По результатам технико-экономического сравнения наиболее эффективным следует признать второй вариант, при котором ЧДД за 10 лет составит 4904,6 тыс. руб., а срок окупаемости 2,0 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований 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 топливно-энергетических ресурсов в производственных процессах на железнодорожном транспорте. Их внедрение позволяет повысить эффективность функционирования и качество организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. По результатам анализа и систематизации действующих методов и средств эффективного использования топливно-энергетических ресурсов 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 топливно-энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте в части делегирования полномочий по разработке проектов заданий по экономии энергоресурсов с уровня

центрального аппарата на уровень филиалов и линейных структурных подразделений.

2. Выполнены классификация и корреляционный анализ факторов, влияющих на использование топливно-энергетических ресурсов при организации производственных процессов, предложена методология отбора факторов, влияющих на расход ТЭР в производственных процессах на железнодорожном транспорте, по результатам апробации которой на действующих объектах железнодорожного транспорта для перевозочного процесса рекомендовано использовать метод «последовательный с исключением», а для неперевоочных 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 топливно-энергетических ресурсов, основанные на применении искусственных нейронных сетей, нечетких нейронных сетей, метода опорных векторов, демонстрируют существенно лучшие показатели точности, чем множественная регрессия, особенно для неперевоочных видов деятельности, при этом средняя относительная погрешность уменьшается в 1,29 – 1,92 раза, что позволяет рекомендовать данные модели для использования при организации ресурсосберегающих производственных систем.

4. Предложены методы и средства эффективного нормирования и прогнозирования топливно-энергетических ресурсов в производственных процессах на железнодорожном транспорте на основе применения новых информационных технологий. Для расчета прогнозных значений расхода ТЭР разработана «Методика планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды с использованием искусственных нейронных сетей» и программный комплекс, которые утверждены распоряжением ОАО «РЖД», внедрены на сети железных дорог и используется для нормирования расхода электроэнергии в неперевоочных видах деятельности. Определение обоснованного потенциала экономии ТЭР за счет реа-

лизации 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». Апробация предложенных организационных решений на объектах Свердловской и Западно-Сибирской ж.д., а также Центральной дирекции по управлению терминально-складским комплексом показывают, 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, 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. На основе предлагаемых подходов разработана утвержденная «Унифицированная методика по расчету экономии топливно-энергетических ресурсов от реализации мероприятий программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности структурных подразделений ОАО «РЖД», внедренная на сети железных дорог. Положительные результаты использования предлагаемых методов оценки энергетической эффективности подтверждены актами об использовании результатов научных исследований и разработок в производстве.

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 период 2016 – 2018 гг. показала, что их значения находятся в пределах прогнозного диапазона с погрешностями, не превышающими

ми 1,29 %, что позволяет говорить о достаточной эффективности применяемых методов.

7. Разработаны усовершенствованные методы и средства мониторинга использования топливно-энергетических ресурсов 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. Опытная апробация предложенных запатентованных технических решений и программы для ЭВМ при исследовании производственных процессов на действующих объектах железнодорожного транспорта доказала 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 10 лет составит 4904,6 тыс. руб., а срок окупаемости 2,0 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 ресурсосберегающих производственных систем, в том числе проблемы кадрового обеспечения для реализации программ энергосбережения и повышения эффективности существующих форм организации труда.

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТЭР	– топливно-энергетические ресурсы
УРЭ	– удельный расход электрической энергии
УРД	– удельный расход дизельного топлива
ЦТех	– департамент технической политики ОАО «РЖД»
ЦЭУ	– департамент экономики ОАО «РЖД»
ЦКЭР	– центральная комиссия ОАО «РЖД» по энергосбережению и повышению энергетической эффективности
СП	– структурное подразделение
SVM	– метод опорных векторов (Support Vector Machine)
ИНС	– искусственная нейронная сеть
ННС	– нечеткая нейронная сеть
ПТО	– пункт технического обслуживания
ТОР	– пункт текущего отцепочного ремонта
СПРВ	– специализированные пути ремонта вагонов
РЦКУ	– региональный центр корпоративного управления
ДЭЗ	– дирекция по эксплуатации зданий и сооружений
ДСС	– дирекция социальной сферы
ДАВС	– дирекция аварийно-восстановительных средств
НА	– административно-хозяйственный центр
УЦПК	– учебный центр профессиональных квалификаций
ЗСЦМ	– дорожный центр метрологии
НТЭЦ	– дорожный топливно-энергетический центр
ДИ	– дирекция инфраструктуры
П	– служба пути
Ш	– служба автоматики и телемеханики
В	– служба вагонного хозяйства
НТП	– служба технической политики
ДПМ	– дирекция по эксплуатации и ремонту путевых машин
ДРП	– дирекция по ремонту пути
ДКРЭ	– дирекция по ремонту и реконструкции объектов электрификации и электроснабжения
ДТВ	– дирекция по тепловодоснабжению
ДМ	– дирекция по управлению терминально-складским комплексом

Д	– дирекция управления движением
ДМТО	– дирекция материально-технического обеспечения
ДМВ	– дирекция моторвагонного подвижного состава
ДПО	– дирекция пассажирских обустройств
ИВЦ	– информационно вычислительный центр
НТЭ	– дирекция по энергообеспечению
НС	– дирекция связи
РДЖВ	– региональный центр железнодорожных вокзалов
Т	– дирекция тяги
ТР	– дирекция по ремонту тягового подвижного состава
ТЦФТО	– территориальный центр фирменного транспортного обслуживания
ПРММ	– путевые ремонтные механические мастерские
ПМС	– путевая машинная станция
ОПМС	– опытная путевая машинная станция
ЭЧ	– дистанция электроснабжения
ТЧЭ	– эксплуатационное локомотивное депо
ТЧприг	– моторвагонное локомотивное депо
ТЧР	– ремонтное локомотивное депо
СЛД	– сервисное локомотивное депо
ВЧД	– вагонное депо
ШЧ	– дистанция сигнализации, централизации и блокировки
ПЧ	– дистанция пути
МЧ	– механизированная дистанция погрузочно-разгрузочных работ и коммерческих операций
ДТВу	– территориальный участок дирекции по тепловодоснабжению
НГЧ	– дистанция гражданских сооружений
ТЭ	– тепловая энергия
МВПС	– моторвагонный подвижной состав
ЭО	– электрооборудование
ПВД	– подсобно-вспомогательная деятельность
ОМ	– организационные мероприятия по экономии топливно-энергетических ресурсов
ОТМ	– организационно-технические мероприятия по экономии топливно-энергетических ресурсов

АИС	– автоматизированная информационная система
ИПРС	– инвестиционный проект «Внедрение ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте»
ИПФ	– инвестиционные проекты филиалов ОАО «РЖД»
ТЭО	– технико-экономическое обоснование
ЦЭКР	– департамент экономической конъюнктуры и стратегического развития ОАО «РЖД»
МСЖД	– международный союз железных дорог
СЭнМ	– система энергетического менеджмента
ВСЖД	– Восточно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»
ГЖД	– Горьковская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»
ДВЖД	– Дальневосточная железная дорога – филиал ОАО «РЖД»
ЗабЖД	– Забайкальская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»
ЗСЖД	– Западно-Сибирская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»
КлгЖД	– Калининградская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»
КярЖД	– Красноярская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»
КбшЖД	– Куйбышевская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»
МЖД	– Московская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»
ОЖД	– Октябрьская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»
ПривЖД	– Приволжская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»
СЖД	– Северная железная дорога – филиал ОАО «РЖД»
СКЖД	– Северо-Кавказская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»
СвЖД	– Свердловская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»
ЮВЖД	– Юго-Восточная железная дорога – филиал ОАО «РЖД»
ЮУЖД	– Южно-Уральская железная дорога – филиал ОАО «РЖД»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий: Учебник. / Б. И. Кудрин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 672 с.
- 2 Кудрин, Б. И. Введение в технетику / Б. И. Кудрин. – Томский гос. ун-т. Томск, 1991. – 384 с.
- 3 Лагуткин, О. Е. Коэффициенты диатропики временного ряда электропотребления / О. Е. Лагуткин // Электрификация металлургических предприятий Сибири – Томск, 2003. – С. 32–35.
- 4 Кудрин, Б. И. Методика обеспечения почасового прогнозирования электропотребления предприятий с учетом погодных факторов / Б. И. Кудрин, А. В. Мозгалин. – Вестник МЭИ. – 2007. – № 2. – С. 45–47.
- 5 Хамитов, Р. Н. Краткосрочное прогнозирование электропотребления на сутки вперед для энергосбытовой компании методом аппроксимации / Р. Н. Хамитов, А. С. Грицай и др. // Промышленная энергетика. – 2017. – № 3. – С. 2–8.
- 6 Хамитов, Р. Н. Модель хранения и предварительной обработки ретроспективных данных при решении задачи краткосрочного прогнозирования электропотребления / Р. Н. Хамитов, А. С. Грицай и др. // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2016. – Т. 20. – № 4 (74). – С. 125–131.
- 7 Манусов, В. З. Модель прогнозирования потерь мощности в высоковольтных электрических сетях на основе искусственных нейронных сетей / В. З. Манусов, Ю. Б. Заиграева // Научный вестник НГТУ. – 2008. – № 1. – С. 131–147.
- 8 Манусов, В. З. Сравнительный анализ двух моделей прогнозирования электрической нагрузки промышленных предприятий, построенных на основе регрессионного анализа и искусственных нейронных сетей / В. З. Манусов, С. В. Хохлова // Научный вестник НГТУ. – 2008. – № 1. – С. 147–159.
- 9 Митрофанов, А. Н. Оценка технологических норм удельных расходов электроэнергии на тягу поездов на базе статистического анализа данных маршру-

тов машинистов / А. Н. Митрофанов, О. В. Табаков // Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта : материалы 2-й Междунар. научн-практ. конф. – Самарский гос. ун-т путей сообщения. – Самара, 2006. – С. 205–207.

10 Митрофанов, А. Н. Нормирование расхода электроэнергии на тягу поездов на участках железных дорог на базе математического моделирования и экспериментальных поездок / А. Н. Митрофанов, А. И. Крестовников // Электрификация и развитие железнодорожного транспорта России. Традиции, современность, перспективы: Eltrans' 2001: Тезисы докл. междунар. симпозиума Eltrans'2001. – СПб.: ПГУПС, 2001. – С. 132.

11 Черемисин, В. Т. Система постоянного контроля и мониторинга удельного расхода и небаланса электрической энергии на тягу поездов в границах Западно-Сибирской железной дороги / В. Т. Черемисин, А. Л. Каштанов // Ресурсосберегающие технологии в структурных подразделениях Западно-Сибирской железной дороги: Материалы науч.-практ. конф. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2005. – С. 17–19.

12 Черемисин, В. Т. Анализ и систематизация составляющих расхода электроэнергии на эксплуатационные нужды предприятий железной дороги / В. Т. Черемисин, В. Н. Зажирко, М. М. Никифоров, Д. В. Пашков // Энергосбережение и энергетика в Омской области. – Омск, 2003. – № 3 (8). – С. 63–69.

13 Левин, Б. А. О концепции построения моделей производственно-транспортных систем / Б. А. Левин, Э. А. Мамаев, В. В. Багинова // Наука и техника транспорта. – 2003. – № 4. – С. 8–17.

14 Бадер, М. П. Современные технологии для перехода к интеллектуальным системам электроснабжения / М. П. Бадер // Вестник РГУПС. – 2013. – № 2 (50). – С. 86–92.

15 Косарев, А. Б. Основы методологии планирования эксперимента и построения аппроксимационных моделей при внедрении АСКУЭ на электрифицированных железных дорогах ОАО «РЖД» / А. Б. Косарев, А. Н. Лисенков // Вестник ВНИИЖТа. – 2005. – № 3. – С. 1.

16 Лисенков, А. Н. Формализация и экспертное оценивание объектов управления в задачах энергосбережения / А. Н. Лисенков, Д. В. Сербиненко, И. В. Кузнецов // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2011. – № 2. – С. 26–29.

17 Гаев, Д. Внедрение энергосберегающих технологий / Д. Гаев, А. Ершов, Л. Баранов, В. Гречишников, М. Шевлюгин // Мир транспорта. – 2010. – Т. 8. – № 3 (31). – С. 3–8.

18 Бурков, А. Т. Автоматизация учета электрической энергии на электрифицированных железных дорогах / А. Т. Бурков, Б. А. Ковбаса, М. А. Лашков, В. С. Коган // Энергосбережение, качество электроэнергии, электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте: Сб. трудов. – МИИТ. – М., 1997. – С. 60–62.

19 Краснослободцева, Е. А. Использование альтернативных источников энергии для удаленных от основных источников энергии объектов ОАО «РЖД» / Е. А. Краснослободцева, С. В. Власьевский // Электропривод на транспорте и в промышленности: труды II Всероссийской научно-практической конференции. – Хабаровск, 2018. – С. 17–24.

20 Galkin, A.G. Integrated approach to the planning of energy consumption by non-traction railway consumers / A. G. Galkin, A. A. Kovalev, T. T. Shayukhov // MATEC Web of Conferences electronic edition.– 2018. – С. 01056.

21 Сай, В.М. Планетарные структуры управления на железнодорожном транспорте: Монография. / В. М. Сай. – М.: ВИНТИ РАН. – 2003. – 336 с.

22 Сай, В. М. Об организации взаимодействия хозяйствующих субъектов в сетях с разделенными интересами (на примере компании ОАО «РЖД») / В. М. Сай, И. Д. Громов // Вестник УРГУПС. – 2012. – № 3 (15). – С. 83–94.

23 Сай, В. М. Моделирование оценки взаимодействия компании «РЖД» с субъектами Российской Федерации : Монография / В. М. Сай, С. В. Шутюк. – Екатеринбург: УрГУПС, 2005. – 136 с.

24 Сай, В. М. Образование, функционирование и распад организационных сетей : Монография / В. М. Сай, С. В. Сизый – Екатеринбург : УрГУПС, 2010. – 272 с.

25 Сирина, Н. Ф. Организация территориального управления эксплуатационной работой на регионе обслуживания железной дороги / Н. Ф. Сирина, В. В. Зубков // Инновационный транспорт. – 2016. – № 2 (20). – С. 22–26.

26 Мишарин, А. С. Организация эффективного функционирования железнодорожного транспорта на основе современных информационных технологий: дис... д-ра. техн. наук: 05.02.22 / Александр Сергеевич Мишарин. – М., 2005. – 325 с.

27 Arzhannikov, V. A. Improvement of basic requirements for the system and devices of traction DC power supply / V. A. Arzhannikov, M. P. Bader, A. T. Burkov, A. V. Kotelnikov, I. O. Naboichenko // Russian Electrical Engineering. – 2016. – Т. 87. – № 9. – P. 525–531.

28 Дынькин, Б. Е. Особенности защиты тяговой сети при нетиповых условиях электроснабжения / Б. Е. Дынькин // Вестник ВНИИЖТ, 2001.– № 1. – С. 22–26.

29 Жарков, Ю. И. Автоматизация диагностирования систем релейной защиты и автоматики электроустановок: Монография / Ю. И. Жарков, В. Г. Лысенко, Е. А. Стороженко. – М., Маршрут, 2005. – 176 с.

30 Мамаев, Э. А. К оценке потерь экономики от неэффективности организации движения в транспортной сети / Э. А. Мамаев, Н. А. Ковалева // Вестник РГУПС. – 2014. – № 2 (54). – С. 64–69.

31 Энергосбережение на железнодорожном транспорте: Учебник / В. А. Гапанович, В. Д. Авилов и др. / Под редакцией В.А. Гапановича. – М.: Издательский дом МИСиС, 2012. – 620 с.

32 Шалимов, М. Г. Современное состояние и пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог / М. Г. Шалимов, Г. П. Маслов, Г. С. Магай. – Омск, 2002. – 49 с.

33 Молин, Н. И. Повышение эффективности использования электроэнергии на предприятиях железнодорожного транспорта / Н. И. Молин, А. В. Крюков // Проблемы энергосбережения и энергобезопасности в Сибири: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Барнаул: АлГТУ, 2003. – С. 139–143.

34 Сальников, В. Г. Электроснабжение транспортных объектов / В. П. Горелов, В. Г. Сальников и др. – М.: Москва-Берлин, 2015. – 379 с.

35 Крюков, А. В. Применение технологий распределенной генерации для электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, М. О. Арсентьев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2009. – Т. 37. – № 1. – С. 190–195.

36 Цыганов, В. В. Механизмы наставничества в организационных системах и повышение энергоэффективности железнодорожного транспорта / В. В. Цыганов, Д. Н. Федянин // Вестник УрГУПС. – 2019. – № 3 (43). – С. 55–66.

37 Марикин, А. Н. Математическое моделирование аварийных режимов в тяговом преобразователе с управляемым выпрямителем / А. Н. Марикин, В. В. Молчанинов // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2005. – Т. 12. – № 4. – С. 1034–1035.

38 Герман, Л. А. Современный метод расчета системы тягового электроснабжения железных дорог переменного тока / Л. А. Герман // Железнодорожный транспорт. – 2004. – № 1. – С. 45.

39 Манаков, А. Л. Транспортная стратегия Новосибирской области до 2030 года как составляющая стратегии социально-экономического развития региона / А. Л. Манаков, В. И. Хабаров, А. С. Баранов // Вопросы новой экономики. – 2018. – № 4 (48). – С. 29–43.

40 Genethliou, D. Statistical approaches to electric load forecasting / D. Genethliou. – State University of New York at Stony Brook, ProQuest, UMI Dissertations Publishing. – 2005. – 82 p.

41 Almeshaei, E. A methodology for Electric Power Load Forecasting / E. Almeshaei, H. Soltan // Alexandria Engineering Journal. – 2011. – № 50(2). – P. 137–144.

42 Wang, J. An annual load forecasting model based on support vector regression with differential evolution algorithm / J. Wang, L. Li, D. Niu, Z. Tan // Applied Energy. – 2012. – № 94. – P. 65–70.

43 Bunnoon, P. Multi-substation control central load area forecasting by using HP-filter and double neural networks (HP-DNNs) / P. Bunnoon, K. Chalermyanont, C. Limsakul // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2013. – № 44(1). – P. 561–570.

44 Bunnoon, P. Mid-Term Load Forecasting: Level Suitably of Wavelet and Neural Network based on Factor Selection / P. Bunnoon, K. Chalermyanont, C. Limsakul // Energy Procedia. – 2012. – № 14. – P. 438–444.

45 Badri, A. Application of Artificial Neural Networks and Fuzzy logic Methods for Short Term Load Forecasting / A. Badri, Z. Ameli, A. M. Birjandi // Energy Procedia, 2012. – № 14. – P. 1883–1888.

46 Zhang, W. Short-term Forecast Technology in Load of Electrified Railway based on Wavelet-extreme Learning Machine / W. Zhang, W. Zhao, X. Du // Journal of Networks. – 2014. – № 9(6). – P. 1502–1508.

47 Park, C. B. Prediction and analysis of the energy consumption considering the electric railway vehicle's driving / C. B. Park, B. S. Lee, H. W. Lee // Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers. – 2012. – № 61 (5). DOI: 10.5370/KIEE.2012.61.5.777.

48 Manuel, G. A Statistical Approach in Determining the Electrical Short Term Demand in a Rapid Railway System / G. Manuel, J.-H. C. Pretorius // Power and Energy Systems. – 2011. – P. 428–433.

49 Sengor, I. Smart railway station energy management considering regenerative braking and ESS / I. Sengor, H. C. Kılıçkiran, H. Akdemir, B. Kekezoglu, O. Erdinc and J. P. S. Catalão // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe). – Torino, 2017. – P. 1–6.

50 Zhou, H. Demand-Side Energy Management: FTTH -Based Mode for Smart Homes / H. Zhou, J. G. Lai, W. S. Hu, Q. J. Deng // American Control Conference. – 2014.

51 Schoonenberg, W. C. H. A dynamic model for the energy management of microgrid-enabled production systems / W. C. H. Schoonenberg, A. M. Farid // Journal of Cleaner Production. – 2017. – №. 164. – P. 816–830.

52 Martínez Fernández, P. A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption / P. Martínez Fernández, I. Villalba Sanchís, V. Yepes, R. Insa Franco // Journal of Cleaner Production. – 2019. – № 222. – P. 153–162.

53 Руденко, Ю. Н. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике / Ю. Н. Руденко, В. А. Семенов. – М.: МЭИ, 2000. – 648 с.

54 Владимирова, Л. П. Прогнозирование и планирование в условиях рынка / Л. П. Владимирова. – М.: Дашков и К, 2000. – 307 с.

55 Черныш, Е. А. Прогнозирование и планирование / Е. А. Черныш, Н. П. Молчанова и др. – М.: Экспертное бюро, 1999. – 172 с.

56 Hong, Tao. Short Term Electric Load Forecasting / Tao Hong // North Carolina State University, ProQuest, UMI Dissertations Publishing. – 2010. – 82 p.

57 Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2537р от 14.12.2016 г. – М.: ОАО «РЖД». – 2016.

58 Бэнн, Д. В. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки / Д. В. Бэнн, Е. Д. Фармер. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.

59 Громова, Н. М. Основы экономического прогнозирования: Монография / Н. М. Громова, Н. И. Громова. – М.: Академия Естествознания, 2006. – 150 с.

60 Пальчиков, А. С. Существующие способы прогнозирования электропотребления объектов в металлургической отрасли // Современные научные исследования и инновации. – Сентябрь 2012. – № 9 [Электронный ресурс]. А. С. Пальчиков – Электрон. текстовые дан. Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2012/09/16877>, свободный.

61 Закарюкин, В. П. Моделирование и прогнозирование процессов электропотребления на железнодорожном транспорте: Монография / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Н. В. Раевский, Д. А. Яковлев // Иркутский государственный университет путей сообщения. – Иркутск, 2007. – 98 с.

62 Токочакова, Н. В. Нормирование и прогнозирование расхода электрической энергии предприятий транспорта нефти в заданных условиях функционирования / Н. В. Токочакова // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2006. – № 4 (27). С. 67–77.

63 Руководящий технический материал. Указания по расчету электрических нагрузок РМ 36.18.32.4-92. – М.: Тяжпромэлектропроект им. Ф. Б. Якубовского, 1992.

64 Инструктивные и информационные материалы по проектированию электроустановок. – М.: Тяжпромэлектропроект им. Ф. Б. Якубовского, 1997. – № 5.

65 Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю. Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

66 Жохов, Б. Д. Анализ причин завышения расчетных нагрузок и возможной их коррекции / Б. Д. Жохов // Промышленная энергетика. – М., 1989. – № 7. С. 7–9.

67 Киреева, Н. В. Оперативное планирование производственного процесса как основа повышения эффективности управления энергозатратами на производство продукции / Н. В. Киреева, Ю. В. Бабанова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. – 2013. – Т. 7. – № 2. – С. 116–122.

68 Климук, В. В. Нормирование использования материальных ресурсов как инструмент экономичности / В. В. Климук // Современные технологии управления. – 2014. – № 8 (44). – С. 18–22.

69 Горяев, Н. К. Совершенствование нормирования расхода топлива на транспортную работу / Н. К. Горяев, Е. Н. Вавилова // Вестник Южно-Уральского

государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. – 2014. – Т. 8. – № 2. – С. 195–197.

70 Куликова, Т. А. Прогрессивная система норм и нормативов как ключевая составляющая развития промышленных предприятий / Т. А. Куликова // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2014. – № 3 (11). – С. 45–49.

71 Гальперова, Е. В. Методы исследования и прогнозирования электропотребления на региональном уровне: дис... канд. техн. наук: 05.14.01 / Гальперова Елена Васильевна. – Иркутск, 2004. – 115 с.

72 Комяков, А. А. Совершенствование системы контроля и анализа расхода электрической энергии нетяговыми железнодорожными потребителями: дис... канд. техн. наук : 05.22.07 / Комяков Александр Анатольевич. – Омск, 2009. – 145 с.

73 Кротков, Е. А. Повышение точности прогноза графиков электрической нагрузки систем электроснабжения крупных мегаполисов на основе спектрального анализа / Е. А. Кротков, А. Ю. Алексеев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2010. – № 3 (28). – С. 123–130.

74 Грицай, А. С. Гибридный метод краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии для энергосбытового предприятия с учетом метеофакторов: дис... канд. техн. наук: 05.09.03 / Грицай Александр Сергеевич. – Омск, 2017. – 136 с.

75 Грицай, А. С. Гибридный метод краткосрочного прогнозирования электропотребления в условиях оптового рынка электроэнергии / А. С. Грицай, Д. А. Тюньков и др. // Электроэнергетика глазами молодежи - 2017: Материалы VIII Международной научно-технической конференции. – 2017. – С. 163–166.

76 Mbamalu, G. A. N., Load forecasting suboptimal seasonal autoregressive models and iteratively reweighted least squares estimation / G. A. N. Mbamalu,

M. E. El-Hawary // IEEE Transactions on Power Systems. – 1993. – V. 8. № 1. doi:10.1109/59.221222.

77 Espinoza, M. Using Kernel-based modeling for nonlinear system identification / M. Espinoza, J. A. K. Suykens, R. Belmans, B. De Moor // IEEE control systems magazine. – 2007. – № 27. – P. 43–57.

78 Картавых, Н. Я. Прогнозирование электропотребления по группам потребителей региона с использованием модели Холта-Винтера / Н. Я. Картавых, Э. М. Косматов // XXIX Неделя науки СПбГТУ: Материалы межвузовской науч. конф. / Санкт-Петербургский гос. техн. ун-т. – СПб, 2001. – С. 156–157.

79 Кирилова, Т. Н. Прогнозирование графиков нагрузки как основа энергосбережения неритмично работающих предприятий / Т. Н. Кирилова // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования. – Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск, 2012. – С. 68–70.

80 Шулле, Ю. А. Прогнозирование электрических нагрузок с использованием R/S-анализа временных рядов / Ю. А. Шулле // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 6 (99). – С. 53–56.

81 Li, J. A survey on the application of Kalman filtering method in power system / J. Li, Y. W. Wang, C. Wei, P. Zhang // Dianli Xitong Baohu Yu Kongzhi/Power System Protection and Control. – 2014. – № 42 (6). – P. 135–144.

82 Liu, N. A hybrid forecasting model with parameter optimization for short-term load forecasting of micro-grids / N. Liu, Q. Tang, J. Zhang, W. Fan, J. Liu // Applied Energy. – 2014. – № 129. – P. 336–345.

83 Приходько, В. М. Методика прогнозирования электропотребления судоремонтного предприятия / В. М. Приходько, М. Л. Ивлев, И. В. Приходько // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2012. – № 1. – С. 67–73.

84 Черненко, П. А. Учет влияния внешних факторов при краткосрочном прогнозировании электрической нагрузки энергообъединения / П. А. Черненко,

А. В. Мартинюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1 (100). – С. 48–53.

85 Черненко, П. А. Многоуровневое краткосрочное прогнозирование суммарной электрической нагрузки энергообъединения / П. А. Черненко, А. В. Мартинюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 2 (95). – С. 74–80.

86 Рогальский, Б. С. Усовершенствование методов прогнозирования электрических нагрузок промышленных предприятий на основе теории распознавания образов / Б. С. Рогальский, Ю. А. Лисогор // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005. – № 2 (59). – С. 59–68.

87 Бодунов, В. Н. Учет метеорологической информации при прогнозировании электрических нагрузок / В. Н. Бодунов // Вестник Черниговского государственного технологического университета. Серия: Технические науки. – 2011. – № 1 (47). – С. 70–74.

88 Лагуткин О.Е. Прогнозирование параметров электропотребления в условиях нестабильности / О. Е. Лагуткин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – № 2 – С. 205–209.

89 Чубукова, И. А. Data Mining / И.А. Чубукова. – 2-е изд., испр. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий, 2008. – 383 с. – (Основы информационных технологий). - ISBN 978-5-94774-819-2 ; [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=233055>.

90 Vapnik, V. N. Support-Vector Networks / V. N. Vapnik, S. Cortes // Machine Learning. – 1995. – № 20.

91 Graf, H. P. Parallel support vector machines: The cascade SVM / H. P. Graf, E. Cosatto, L. Bottou, I. Durdanovic, V. Vapnik // Advances in Neural Information Processing Systems. Neural information processing systems foundation. – 2004.

92 Воронцов, К. В. Лекции по методу опорных векторов [Электронный ресурс] / К. В. Воронцов. – 2007. – Электрон. текстовые дан. Режим доступа: <http://www.ccas.ru/voron/download/SVM.pdf>, свободный.

93 Smola, A. A tutorial on support vector regression / A. Smola, B. Schoelkopf // *Statistics and Computing*. – 2004. – № 14. – P. 199–222.

94 Надтока, И. Краткосрочное прогнозирование нагрузки с помощью теории наименьших квадратов опорных векторов (LS-SVM) / И. Надтока, Б. Аль-Зихери // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 6. – С. 108–114.

95 Васильев, Д. А. Прогнозирование активных нагрузок промышленных предприятий на основе кластеризации данных / Д. А. Васильев, В. А. Иващенко // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2009. – Т. 4. – № 2с (43). – С. 96–98.

96 Suykens J. A. K. Least Squares Support Vector Machines / J. A. K. Suykens, T. Van Gestel, J. De Brabanter, B. De Moor, J. Vandewalle. – World Scientific Publishing Co, 2002. – 310 p.

97 Hebb, D. O. *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory* / D. O. Hebb. – Lawrence Erlbaum Associates, 2002. – 335 p.

98 Rosenblatt, F. *Principles of neurodynamics: perceptrons and the theory of brain mechanisms* / F. Rosenblatt. – Spartan Books, 1962. – 616 p.

99 Уиндроу, Б. Адаптивная обработка сигналов / Б. Уиндроу, С. Стирнз. – М.: Радио и связь. – 1989. – 440 с.

100 Минский, М. Перцептроны / М. Минский, С. Пейперт. – М.: Мир, 1971. – 264 с.

101 Kohonen, T. Self-organizing neural projections / T. Kohonen // *Neural networks : the official journal of the International Neural Network Society*. – 2006. – № 19. – P. 723–733.

102 Hopfield, J. J. Separating objects and neural computation / J. J. Hopfield, C. D. Brody // *Compte Rendus Biologies*. – 2003. – № 326. – P. 219–222.

103 Галушкин, А. И. Теория нейронных сетей. Нейрокомпьютеры и их применение / А. И. Галушкин. – М.: ИПРЖР, 2000. – 416 с.

104 Дунин-Барковский, В.Л. Многонейронные структуры: теория и эксперимент / В. Л. Дунин-Барковский. – Успехи физических наук. – 1986. – Т. 150, вып. 2. – С. 321–323.

105 Царегородцев, В. Г. Предобработка обучающей выборки, выборочная константа Липшица и свойства обученных нейронных сетей / В. Г. Царегородцев // Материалы X Всеросс. семинара «Нейроинформатика и ее приложения» – Красноярск, 2002. – С.146–150.

106 Горбань, А. Н. Нейроинформатика / А. Н. Горбань, В. Л. Дунин-Барковский, А. Н. Кирдин и др. – Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. – 296 с.

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

108 Коломоец, О. А. Повышение энергетической эффективности нетяговых железнодорожных потребителей за счет совершенствования методов анализа и определения расхода электрической энергии: дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Коломоец Ольга Анатольевна. – Омск, 2013. – 159 с.

109 Мунхжаргал, С. Разработка и исследование нейросетевых алгоритмов краткосрочного прогнозирования нагрузки центральной электроэнергетической системы Монголии: дис... канд. техн. наук: 05.14.02 / Сухбаатарын Мунхжаргал. – Новосибирск, 2004. – 177 с.

110 Васильев, Д. А. Модели автоматизированного прогнозирования электрических нагрузок промышленных предприятий / Д. А. Васильев, М. В. Колоколов // Управление большими системами: сборник трудов. – 2011. – № 34. – С. 254–266.

111 Deihimi, A. Short-term electric load and temperature forecasting using wavelet echo state networks with neural reconstruction / A. Deihimi, O. Orang, H. Showkati // Energy. – 2013. – № 57. – P. 382–401.

112 Lin, C.-T. A hybrid economic indices based short-term load forecasting system / C.-T. Lin, L.-D. Chou, Y.-M. Chen, L.-M. Tseng // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2014. – № 54. – P. 293–305.

113 Hsu, C.-C. Regional load forecasting in Taiwan – applications of artificial neural networks / C.-C. Hsu, C.-Y. Chen // *Energy Conversion and Management*. – 2003. – № 44(12). – P. 1941–1949.

114 Tang, N. Application of a Load Forecasting Model Based on Improved Grey Neural Network in the Smart Grid / N. Tang, D.-J. Zhang // *Energy Procedia*. – 2011. – № 12. – P. 180–184.

115 Carpinteiro, O. A. S. Long-term load forecasting via a hierarchical neural model with time integrators / O. A. S. Carpinteiro, R. C. Leme, A. C. Z. de Souza, C. A. M. Pinheiro, E. M. Moreira // *Electric Power Systems Research*. – 2007. – № 77(3-4). – P. 371–378.

116 Amina, M. A hybrid intelligent approach for the prediction of electricity consumption / M. Amina, V. S. Kodogiannis, I. Petrounias, D. Tomtsis // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2012. – № 43(1). – P. 99–108.

117 Infield, D. G. Optimal smoothing for trend removal in short term electricity demand forecasting / D. G. Infield, D. C. Hill // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 1998. – № 13(3). – P. 1115–1120.

118 Kadir Sheikh, S. Short-term load forecasting using ANN technique / S. Kadir Sheikh, M. Unde // *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*. – 2012. – № 1(2). DOI: 10.7323/ijeset/v1_i2_12.

119 Taylor, J. W. Neural Network Load Forecasting with Weather Ensemble Predictions / J. W. Taylor, R. Buizza // *IEEE Trans. on Power Systems*. – 2002. – № 17. – P. 626–632.

120 Chis, V. ANN based Short-Term Load Curve Forecasting / V. Chis, C. Barbulescu, S. Kilyeni, S. Dzitac // *International Journal of Computers Communications & Control*. – 2018. – № 13. – P. 938–955. DOI: 10.15837/ijccc.2018.6.3385.

121 Томин, Н. В. Анализ и прогнозирование режимных параметров и характеристик для субъектов розничного рынка электроэнергии на базе технологий

искусственного интеллекта: дис... канд. техн. наук: 05.14.02 / Томин Никита Викторович. – Иркутск, 2007. – 211 с.

122 Шевченко, В. В. Нейросетевое моделирование режимов систем электроснабжения промышленных предприятий: дис... канд. техн. наук: 05.14.02 / Шевченко Вадим Валерьевич. – Красноярск, 2006. – 123 с.

123 Шумилова, Г. П. Краткосрочное прогнозирование электрических нагрузок с использованием искусственных нейронных сетей / Г. П. Шумилова, Н. Э. Готман, Т. Б. Старцева // Электричество. – 1999. – № 10. – С. 6–12.

124 Шумилова, Г. П. Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейросетевых структур: Монография / Г. П. Шумилова, Н. Э. Готман, Т. Б. Старцева. – Сыктывкар: КНЦ УрО РАН, 2008. – 77 с.

125 Крысанов, В. Н. Особенности реализации технологии Smart Grid в региональных системах электроснабжения / В. Н. Крысанов, А. Л. Руцков, Шукур Омар Шукур Махмуд // Вестник ВГТУ. – 2014. – № 5-1. – С. 92–97.

126 Zadeh, L. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes / L. Zadeh // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1973. – № 3(1). – P. 28–44.

127 Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 452 с.

128 Бирюков, Е. В. Практическая реализация нечеткой нейронной сети при краткосрочном прогнозировании электрической нагрузки [Электронный ресурс] / Е. В. Бирюков, М. С. Корнев // Портал магистров ДонНТУ : сайт. - URL: http://www.masters.donntu.edu.ua/2006/kita/chuykov/library/library/article_5.htm.

129 Ярушкина, Н. Г. Основы теории нечетких и гибридных систем: учебное пособие / Н. Г. Ярушкина. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с.

130 Крысанов, В. Н. Прогнозирование потребления электроэнергии промышленными предприятиями с использованием методов искусственных нейронных и нейро-нечетких сетей / В. Н. Крысанов, А. Л. Руцков // Труды VIII между-

народной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск, 2014. – С. 122–125.

131 Манусов, В. З. Краткосрочное прогнозирование электрической нагрузки на основе нечеткой нейронной сети и ее сравнение с другими методами / В. З. Манусов, Е. В. Бирюков // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 6. – С. 153–157.

132 Манжула, В. Г. Нейронные сети Кохонена и нечеткие нейронные сети в интеллектуальном анализе данных / В. Г. Манжула, Д. С. Федяшов // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 4. – С. 108–114.

133 Аль-Гунаид, М. Нейронечеткая модель краткосрочного прогнозирования потребления электроэнергии / М. Аль-Гунаид // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 2 (22). – С. 47–56.

134 Глебов, А. А. Модель краткосрочного прогнозирования электропотребления с помощью нейро-нечетких систем: дис... канд. техн. наук: 05.13.10 / Глебов Андрей Александрович. – Астрахань, 2006. – 112 с.

135 Сахно, Е. П. К вопросу краткосрочного прогнозирования электрических нагрузок с применением нечетких нейронных сетей / Е. П. Сахно, Р. А. Дьяченко, М. Г. Решетняк и др. // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – С. 162–169.

136 Lou, C. W. A novel random fuzzy neural networks for tackling uncertainties of electric load forecasting / C. W. Lou, M. C. Dong // International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015. – № 73. – P. 34–44.

137 Jarndal, A. Load forecasting for power system planning using a genetic-fuzzy-neural networks approach / A. Jarndal // 7th IEEE GCC Conference and Exhibition (GCC). – 2013. – P. 44–48.

138 Alfares, H. K. Electric load forecasting: Literature survey and classification of methods / H. K. Alfares, M. Nazeeruddin // International Journal of Systems Science. – 2002. – № 33(1). – P. 23–34.

139 Бакланов, А. А. Энергетика движения поезда и нормирование расхода электрической энергии на тягу: дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Бакланов Александр Алексеевич. – Омск, 1988. – 228 с.

140 Игин, В. Н. Научные основы анализа и контроля энергетической эффективности эксплуатируемого парка тепловозов: дис.... д-ра техн. наук : 05.22.07 / Игин Валерий Николаевич. – М., 2002. – 300 с.

141 Молярчук, В. С. Нормирование расхода электрической энергии на тягу поездов / В. С. Молярчук. – М.: Трансжелдориздат, 1962. – 61 с.

142 Мугинштейн, Л. А. О нормировании и анализе расхода топливно-энергетических ресурсов в депо / Л. А. Мугинштейн, А. В. Лохач // Локомотив. – 2002. – № 3. – С. 35–37.

143 Сидорова, Е. А. Снижение затрат в локомотивном хозяйстве железных дорог путем совершенствования системы учета и анализа эксплуатационных показателей: дис... д-ра. техн. наук: 05.22.07 / Сидорова Елена Анатольевна. – Омск, 2003. – 384 с.

144 Сидорова, Е. А. Статистический метод нормирования энергии рекуперации / Е. А. Сидорова, А. И. Давыдов // Локомотив. – М., 2012. – № 5. – С. 35–36.

145 Leung, P. C. M. Estimation of electrical power consumption in subway station design by intelligent approach / P. C. M. Leung, E. W. M. Lee // Applied Energy. – 2013. – № 101. – P. 634–643.

146 Centra, M. Hourly electricity load forecasting: An empirical application to the Italian railways / M. Centra // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2011. – № 80. – P. 1026–1033.

147 Qin, H. T. Prediction of the power quality caused by electrified railways based on Monte Carlo / H. T. Qin, Q. Z. Li, Y. Liu, X. Dong // Dianli Xitong Baohu Yu Kongzhi/Power System Protection and Control. – 2011. № 39(13).

148 Методика анализа результатов расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов : утверждена распоряжением МПС РФ от 20.06.1997 г. №ЦТД-26. М.: МПС, 1997.

149 Положение о планировании и нормировании расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов в ОАО «РЖД» : утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 17.09.2007 г. № 1808р. М.: ОАО «РЖД», 2007.

150 Методика анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 26.12.2014 г. № 512. М.: ОАО «РЖД», 2014.

151 Давыдов, А. И. Повышение эффективности системы анализа и нормирования энергопотребления на тягу поездов : дис... канд. тех. наук : 05.22.07 / Давыдов Алексей Игоревич. – Омск, 2012. – 178 с.

152 Методика планирования расходов на потребляемую электроэнергию на эксплуатационные нужды по хозяйствам железных дорог. – М.: МПС РФ, 1999. 74 с.

153 Методика определения норм расхода электрической энергии на эксплуатационные нужды объектов локомотивного хозяйства и планирования затрат на ее потребление. – М.: МПС РФ, 1999. 59 с.

154 Методика определения норм расхода электрической энергии для объектов вагонного хозяйства. – М.: МПС СССР, 1988. 72 с.

155 Методика определения норм расхода электрической энергии на эксплуатационные нужды объектов пассажирской службы. – М.: Транспорт, 1975. 30 с.

156 Временная методика определения норм расхода электрической энергии на эксплуатационные нужды объектов службы движения. – М.: Транспорт, 1976. 16 с.

157 Методика определения норм расхода электрической энергии для объектов грузовой службы. – М.: Транспорт, 1976. 31 с.

158 Методика нормирования расхода электроэнергии для стационарных объектов хозяйства электрификации и электроснабжения железных дорог (первая редакция). – М.: ВНИИЖТ, 2000. 25 с.

159 Методика определения норм расхода электрической энергии на эксплуатационные нужды объектов службы пути. – М.: Транспорт, 1975. 31 с.

160 Методика определения норм расхода электрической энергии для объектов служб гражданских сооружений и отдела водоснабжения и санитарно-технических устройств. – М.: Транспорт, 1975. 31 с.

161 Сальников, А. Х. Нормирование потребления и экономия топливно-энергетических ресурсов / А. Х. Сальников, Л. А. Шевченко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.

162 Комяков, А. А. Анализ методик нормирования расхода электроэнергии на эксплуатационные нужды по хозяйствам железных дорог / А. А. Комяков // Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта: Сб. науч. ст. аспирантов и студентов / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2006. – С. 152–156.

163 Методика расчета потребности железных дорог в топливе и тепловой энергии на нетяговые нужды : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 03.08.2007 г. №1507р. – М.: ОАО «РЖД», 2007.

164 Рожицкий, Д. Б. Опыт оценки энергоэффективности на основе применения автоматизированной системы учета топливно-энергетических ресурсов на железнодорожном транспорте / Д. Б. Рожицкий, М. С. Филаткин // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – № 4 (60). – С. 60–62.

165 Финиченко, А. Ю. Методика нормирования расхода тепла в стационарном производстве на железнодорожном транспорте / А. Ю. Финиченко // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 34–37.

166 Финиченко, А. Ю. Совершенствование методов нормирования, анализ и прогнозирование расхода тепловой энергии в стационарной теплоэнергетике железнодорожного транспорта: дис... канд. тех. наук: 05.14.04 / Финиченко Александра Юрьевна. – М., 2011. – 134 с.

167 Симак, Р. С. Бюджетное планирование затрат на топливно-энергетические ресурсы в рамках системы энергоэкономической паспортизации предприятий ОАО «РЖД» / Р. С. Симак, А. Н. Шендалев, Д. А. Тайкешев // Вестник ВНИИЖТа. – 2009. – № 4. – С. 40–43.

168 Никифоров, М. М. Энергоэкономическая паспортизация в системе организации производства на железнодорожном транспорте / М. М. Никифоров, Р. С. Симак // Известия Транссиба. – 2010. – № 1. – С. 118–122.

169 Каштанов, А. Л. Автоматизированный программный комплекс по контролю и управлению энергопотреблением в границах железнодорожного узла по данным АСКУЭ / А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, И. Ю. Норкин // Известия Транссиба. – 2010. – № 2(2). – С. 71–76.

170 Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

171 Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.

172 Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1980. – 608 с.

173 Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1998. – 480 с.

174 Типовое положение о системе управления энергоэффективностью производственных процессов (энергоруководство) структурного подразделения : утверждено распоряжением ОАО «РЖД» №166р от 01.02.2016 г. – М.: ОАО «РЖД», 2016.

175 Типовая методика энергетического анализа производственно-хозяйственной деятельности железнодорожной станции : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» №166р от 01.02.2016 г. – М.: ОАО «РЖД», 2016.

176 Типовая методика энергетического анализа производственно-хозяйственной деятельности эксплуатационного вагонного депо : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» №166р от 01.02.2016 г. – М.: ОАО «РЖД», 2016.

177 Типовая методика энергетического анализа производственно-хозяйственной деятельности дистанции пути : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» №166р от 01.02.2016 г. – М.: ОАО «РЖД», 2016.

178 Типовая методика энергетического анализа производственно-хозяйственной деятельности дистанции сигнализации, централизации и блоки-

ровки : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» №166р от 01.02.2016 г. – М.: ОАО «РЖД», 2016.

179 Типовая методика энергетического анализа производственно-хозяйственной деятельности дистанции электроснабжения : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» №166р от 01.02.2016 г. – М.: ОАО «РЖД», 2016.

180 Типовая методика энергетического анализа производственно-хозяйственной деятельности моторвагонных депо : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» №166р от 01.02.2016 г. – М.: ОАО «РЖД», 2016.

181 Типовая методика энергетического анализа производственно-хозяйственной деятельности участков тепловодоснабжения : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» №166р от 01.02.2016 г. – М.: ОАО «РЖД», 2016.

182 Типовая методика энергетического анализа производственно-хозяйственной деятельности отделов материально-технического обеспечения : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» №166р от 01.02.2016 г. – М.: ОАО «РЖД», 2016.

183 Типовая методика энергетического анализа производственно-хозяйственной деятельности дистанции гражданских сооружений : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» №166р от 01.02.2016 г. – М.: ОАО «РЖД», 2016.

184 Никифоров, М. М. Методические основы системы анализа и планирования расхода электроэнергии на эксплуатационные нужды стационарных потребителей железнодорожного транспорта / М. М. Никифоров, Д. В. Пашков, А. А. Комяков // Наука, инновации и образование: актуальные проблемы развития транспортного комплекса России: Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Уральский гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург, 2006. – С. 98–99.

185 Система анализа и планирования расхода электрической энергии на не-тяговые нужды в ОАО «РЖД» / В. Т. Черемисин, А. А. Комяков и др. // Инновационные проекты и новые технологии на железнодорожном транспорте: Сб. науч. ст. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2007. – С. 15–24.

186 Методика анализа и планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды в ОАО «РЖД» : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2507р от 29.12.2007 г. – М.: ОАО «РЖД», 2007.

187 Методика планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды с использованием искусственных нейронных сетей : утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2626р от 06.12.2011 г. – М.: ОАО «РЖД», 2011.

188 Сергеев, А. Г. Метрология, стандартизация и сертификация в 2 ч. Часть 1. Метрология : учебник и практикум для академического бакалавриата / А. Г. Сергеев. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 324 с.

189 Яновский, Л. П. Введение в эконометрику: учебное пособие / Л. П. Яновский, А. Г. Буховец; под ред. Л. П. Яновского. – М.: КНОРУС, 2007. – 256 с.

190 Айвазян, С. А. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика. 1989. – 607 с.

191 Воронцов, К. В. Оценивание моделей и отбор признаков [Электронный ресурс] / К. В. Воронцов. – 2011. Электрон. текстовые дан. Режим доступа: <http://www.MachineLearning.ru/wiki>, свободный.

192 Борисова, Т. С. Методы выбора оптимального набора информативных признаков для задач классификации текстов [Электронный ресурс] / Т. С. Борисова. – Электрон. текстовые дан. Режим доступа: <http://www.myshared.ru/slide/357026/>, свободный.

193 Скляр, Д. РНР. Рецепты программирования / Д. Скляр, А. Трахтенберг. – СПб.: Питер, 2015. – 784 с.

194 Жвалевский, О. В. Отбор информативных признаков: постановка задачи и методика ее решения / О. В. Жвалевский // Труды СПИИРАН. – Вып. 4. – 2007. С. 416–426.

195 Гладков Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – М.: Физматлит, 2010. – 317 с.

196 Матвеев, М. Г. Модели и методы искусственного интеллекта. Применение в экономике: учебное пособие / М. Г. Матвеев, А. С. Свиридов, Н. А. Алейникова. – М.: Финансы и статистика, 2011. – 448 с.

197 Волкова, С. С. Отбор информативных признаков в непараметрической оценке регрессии с использованием генетических алгоритмов / С. С. Волкова, Р. Б. Сергиенко // Вестник ТГУ. – 2013. – № 1(22). С. 40–48.

198 Гайдель, А. В. Методы согласованного отбора признаков для классификации полутоновых диагностических изображений / дис... канд. техн. наук : 05.13.17 / Гайдель Андрей Викторович. – Самара, 2015. – 156 с.

199 Kohavi, R. Wrappers for feature selection / R. Kohavi, G. John // Artificial Intelligence. – 1997. – № 97(1-2). – P. 273–324.

200 Ведерникова, О. Г. Разработка генетического алгоритма для транспортных задач / О. Г. Ведерникова // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2015. – № 3 (5). – С. 11–14.

201 Чернышев, Ю. О. Способ комбинирования метода генетического поиска и метода имитации отжига / Ю. О. Чернышев, О. Г. Ведерникова // Вестник РГУПС. – 2002. – № 1 (7). – С. 116–120.

202 Соколовский, А. Р. Подготовка данных для построения нейросетевых моделей при малом количестве экспериментов / А. Р. Соколовский, И. Ю. Соколовская // Научный журнал КубГАУ. – 2010. – № 62(08). – С. 1–9.

203 Курейчик, В. В. Концептуальная модель представления решений в генетических алгоритмах / В. В. Курейчик, П. В. Сороколетов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – С. 7–12.

204 Белов, М. П. Оптимизация параметров нейронных сетей генетическим алгоритмом в системах управления электромеханическими объектами / М. П. Белов, О. И. Золотов // Материалы конференции SCM-2015. – СПб, 2015. – С. 336–339.

205 Ткаченко, М. Г. Применение искусственной нейронной сети, оптимизированной генетическим алгоритмом, в задаче анализа состояния технологического

оборудования нефтегазодобывающей промышленности / М. Г. Ткаченко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – С. 262–270.

206 Якупов, А. И. Генетический алгоритм для отбора признаков при разработке скоринговых карт / А. И. Якупов, С. В. Уланов // Вестник ИжГТУ. – 2010. – № 2(46). – С. 54–57.

207 Буреева, Н. Н. Многомерный статистический анализ с использованием ППП «STATISTICA»: учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Применение программных средств в научных исследованиях и преподавании математики и механики»/ Н. Н. Буреева. – Нижний Новгород, 2007. – 112 с.

208 Комяков, А. А. Применение метода главных компонент для формирования математической модели процесса электропотребления на железнодорожном транспорте / А. А. Комяков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т.4. – №3. – С. 27–32.

209 Коломоец, О. А. Метод выбора наилучшей конфигурации нейросетевой модели для целей прогнозирования расхода электрической энергии предприятий железнодорожного транспорта / О. А. Коломоец, А. А. Комяков, А. В. Пономарев // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2013. Материалы научно-практической интернет-конференции / Одесса, 2013. – С. 78–82.

210 Короткий С. Нейронные сети. Алгоритм обратного распространения [Электронный ресурс] / С. Короткий. – Электрон. текстовые дан. Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/86088/>, свободный.

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

212 Комяков, А. А. Методические основы нейросетевого моделирования электропотребления на нетяговые нужды железнодорожного транспорта / А. А. Комяков, А. В. Пономарев, О. А. Комякова // Инновационные проекты и но-

вые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы научно-практической конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2011. – С. 173–177.

213 Комяков, А. А. Анализ основных методов планирования электропотребления на железнодорожном транспорте / А. А. Комяков, А. В. Пономарев, О. А. Комякова // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2012. – С. 231–235.

214 Применение искусственных нейронных сетей для анализа и планирования расхода электроэнергии на нетяговые нужды / А. А. Комяков, В. И. Гутников и др. // Труды первой науч.-техн. конф. «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте «ИСУЖТ-2012» / НИИАС. – М., 2012. – С. 274–276.

215 Komyakov, A. A. Application of artificial neural networks for electric load forecasting on railway transport / A. A. Komyakov, V. V. Erbes, V. I. Ivanchenko // Environment and Electrical Engineering (EEEIC) : 15th International Conference, Rome, 10-13 June 2015. – pp. 43 – 46. – doi: 10.1109/EEEIC.2015.7165296.

216 Komyakov, A. A. Construction of electricity consumption mathematical models on railway transport used artificial neural network and fuzzy neural network / A. A. Komyakov, M. M. Nikiforov, V. V. Erbes etc. // Environment and Electrical Engineering (EEEIC) : 16th International Conference, Florence, 7-10 June 2016. – pp. 1-4. – doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555450.

217 Cheremisin, V. T. Simulation of power consumption in railway power supply systems with of artificial intelligence aids / V. T. Cheremisin, V. V. Erbes, A. A. Komyakov // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) : 3rd International Conference, St. Petersburg, 16-19 May 2017. – pp. 1-5. – doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076242.

218 Черемисин, В. Т. Моделирование процессов электропотребления в системе нетягового электроснабжения железнодорожного транспорта: Научная монография / В. Т. Черемисин, А. А. Комяков. – Омск : Омский гос. ун-т путей

сообщения, 2017. – 161 с.

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

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

221 Штовба, С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику: Монография / С.Д. Штовба. – Винница: Континент-Прим, 2013. –198 с.

222 Мельник, Л. Ю. Интеллектуальные информационные системы: учебное пособие / Л. Ю. Мельник. – Екатеринбург: Уральский гос. лесотехнический ун-т, 2009. – 31 с.

223 Дьяконов, В. П. Математические пакеты расширения MATLAB: специальный справочник / В. П. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.

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

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

226 Комяков, А. А. Разработка математической модели объема потребления электрической энергии в системе тягового электроснабжения на основе нечетких нейронных сетей / А. А. Комяков, В. И. Иванченко, В. В. Эрбес // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: Материалы международной научно-практической конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 129–134.

227 Комяков, А. А. Математическая модель электропотребления на железнодорожном транспорте, основанная на методах искусственного интеллекта / А. А. Комяков, В. В. Эрбес, О. О. Комякова // Энергосберегающие технологии, контроль и управление для предприятий железнодорожного транспорта: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 37–42.

228 Каштанов, А. Л. Методы и алгоритмы построения математических моделей процесса электропотребления на тягу поездов и нетяговые нужды / А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, В. В. Эрбес // VIII Международный симпозиум «Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта» Eltrans'2015. – Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – СПб, 2015. – С. 222–231.

229 Комяков, А. А. Анализ влияния типа и количества функций принадлежности нечеткой нейронной сети на точность моделирования процесса электропотребления / А. А. Комяков, В. В. Эрбес, Д. О. Силуянов // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием в трех частях. Часть 3 / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 153–158.

230 Эрбес, В. В. Повышение эффективности эксплуатации систем электропитания железных дорог за счет внедрения энергосберегающих устройств и технологий: дис... канд. техн. наук : 05.22.07 / Эрбес Виктор Владимирович. – Омск, 2016. – 148 с.

231 Саутин, А. С. Разработка и исследование методов построения регрессионных моделей на основе алгоритма опорных векторов и его модификаций: дис... канд. техн. наук: 05.13.17 / Саутин Александр Сергеевич. – Новосибирск, 2010. – 177 с.

232 Электронный учебник по статистике [Электронный ресурс]. М., StatSoft Inc, 2012. Режим доступа: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>, свобод-

ный.

233 Vapnik, V. Statistical Learning Theory / V.Vapnik. – N.Y.: John Wiley. – 1998. – 736 p.

234 Абдурахманов, А. М. Методы прогнозирования электропотребления в распределительных сетях (обзор) / А. М. Абдурахманов, М. В. Володин, Е. Ю. Зыбин, В. Н. Рябченко // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2016. Т. 3, № 1. – С. 3–23.

235 Шеремет, А. И. Регрессионный анализ во взаимосвязанных электромеханических системах на базе метода опорных векторов [Электронный ресурс] / А. И. Шеремет, А. В. Садовой // Информационно-управляющие системы. – 2014. – №1 (68). – С. 48–56. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/regressionnyy-analiz-vo-vzaimosvyazannyh-elektromehnicheskikh-sistemah-na-baze-metoda-opornyh-vektorov>, свободный.

236 Cherkassky, V. Practical selection of SVM parameters and noise estimation for SVM regression / V. Cherkassky, Y. Ma // Neural Networks. 2004. – № 17. – P. 113–126.

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

238 Комяков, А. А. Исследование точности математических моделей расхода электроэнергии нетяговых потребителей, основанных на методе опорных векторов / А. А. Комяков, В. И. Иванченко // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – С. 333–338.

239 Эконометрика: Учебник / И. И. Елисеева, С. В. Курышева, Т. В. Костеева [и др.]; Под ред. И. И. Елисеевой. – М.: Финансы и статистика, – 2005. – 576 с.

240 Каштанов, А. Л. Совершенствование порядка формирования заданий по экономии топливно-энергетических ресурсов на нетяговые нужды / А. Л. Каш-

танов, А. А. Комяков, М. М. Никифоров // Вестник УрГУПС. – 2018. – № 4(40). – С. 77 – 84. – DOI: 10.20291/2079-0392-2018-4-77-84.

241 Порядок формирования заданий филиалам ОАО «РЖД» по экономии топливно-энергетических ресурсов на нетяговые нужды : утвержден распоряжением ОАО «РЖД» № 2754р от 24 декабря 2018 г. – М.: ОАО «РЖД», 2018.

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

243 Орлов, А. И. Двухвыборочный критерий Вилкоксона — анализ двух мифов / А. И. Орлов // Научный журнал КубГАУ - Scientific Journal of KubSAU. – 2014. – № 104. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dvuhvyborochnyy-kriteriy-vilkoksona-analiz-dvuh-mifov> (дата обращения: 05.04.2020).

244 Боллинджер Д. Боллинджер о лентах Боллинджера / Д. Боллинджер. – М.: Издательство ИК «Аналитика», 2005. – 244 с.

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

246 Автоматизированная информационная система энергосбережения и повышения энергетической эффективности ОАО «РЖД» (АИС «Энергоэффективность»): руководство пользователя (82462078.12109.100.ИЗ.05). М.: НИИАС, 2016. 103 с.

247 Методические подходы при оценке эффективности работ плана научно-технического развития ОАО «РЖД»: утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 26.12.2016 № 2666р. – М.: ОАО «РЖД», 2016.

248 Методика оценки экономической целесообразности проведения мероприятий по снижению теплопотребления в зданиях и сооружениях, эксплуатируемых ОАО «РЖД»: утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 27.12.2016 № 2725р. – М.: ОАО «РЖД», 2016.

249 Методика оценки топливной эффективности применения энергосберегающего моторного масла SAE15W40 на тепловозах с дизелями Д49. – М.: ОАО «ВНИИЖТ», 2015. – 29 с.

250 Методические рекомендации по определению эффекта от использования внедренных в ОАО «РЖД» ресурсосберегающих технических средств и технологий: утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 13.07.2015 № 1720р. – М.: ОАО «РЖД», 2016.

251 Методика оценки энергоэффективности применения лубрикации контакта «колесо-рельс»: утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 09.10.2012 № 1998р. – М.: ОАО «РЖД», 2012.

252 Методика оценки эффективности энергосберегающих технических средств, внедряемых на тяговом подвижном составе: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 27.11.2012 № 2400р. – М.: ОАО «РЖД», 2012.

253 Методика расчета экономии дизельного топлива и дизельного масла от использования автономных систем прогрева тепловоза: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 11.03.2010 № 482р. – М.: ОАО «РЖД», 2010.

254 Методика определения экономии средств на закупку дизельного топлива от внедрения инвестиционного проекта по реконструкции складов топлива. – М.: ЗАО «КИПЭНЕРГО», 2014. – 15 с.

255 Комяков, А. А. Оценка эффективности параллельной работы выпрямительных преобразователей тяговых подстанций на основе данных измерительных систем / А. А. Комяков, В. Л. Незевак, В. В. Эрбес // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 2(46). – С. 137–143.

256 Каштанов, А. Л. Анализ эффективности работы сглаживающих устройств тяговых подстанций электрифицированных железных дорог постоянного тока по данным измерительных систем / А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, Т. В. Комякова // Омский научный вестник. – 2015. – № 3 (143). – С. 233–237.

257 Cheremisin, V. T. Evaluation of the Actual Effectiveness of Energy-Saving Devices based on Artificial Intelligence / V. T. Cheremisin, V. V. Erbes, A. A. Komayakov // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) : 2nd Inter-

national Conference, Chelyabinsk, 19-20 May 2016. – pp. 1-4. – doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7911416.

258 Комяков, А. А. Разработка стенда для оценки энергетической эффективности энергосберегающих устройств / А. А. Комяков, П. Г. Петров, В. В. Эрбес // Международная научно-практическая конференция «Транспорт-2014». – Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2014. – С. 259–261.

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

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

261 Горевой, И. М. Применение энергосберегающих технологий на железнодорожном транспорте / И. М. Горевой // Проблемы безопасности российского общества. — 2013. – №2/3. – С. 65–75.

262 Тульчинская, Я. И. Методика оценки эффективности замены светильников и ламп на энергосберегающие / Я. И. Тульчинская // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – №4. – С. 570–588.

263 Методика расчета значений целевых показателей в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, в том числе в сопоставимых условиях : утверждена приказом Министерства регионального развития Российской Федерации № 273 от 07.06.2010 г. М., 2010.

264 EVO International Performance Measurement & Verification Protocol [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.nrel.gov/docs/fy02osti/31505.pdf, свободный.

265 Вильгельм, А. С. Апробация расчетной модели системы тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока для оценки потенциала энер-

гоэффективности рекуперативного торможения / А. С. Вильгельм, В. И. Гутников, М. М. Никифоров // Известия Транссиба. – 2014. – № 1 (17). – С. 50–57.

266 Никифоров, М. М. Оценка технологических потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока / М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, А. В. Язов // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: материалы VI научно-практической конференции, посвященной Дню Российской науки. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – С. 40–45.

267 Черемисин, В. Т. Основные положения методики оценки эффективности использования энергии рекуперации / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм // Вестник РГУПС. – 2017. – № 1 (65). – С. 114–120.

268 Черемисин, В. Т. Эффективность использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного и переменного тока: монография / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм. – Омск, 2018. – 216 с.

269 Гателюк, О. В. Апробация алгоритма оценки эффективности энергосберегающих устройств и технологий в системе тягового электроснабжения / О. В. Гателюк, А. А. Комяков, В. В. Эрбес // Известия Транссиба. – 2014. – № 4(20). – С. 79–85.

270 Комяков, А. А. Подход к оценке эффективности работы энергосберегающих устройств в сетях электроснабжения железнодорожных узлов с учетом производственных и климатических факторов / А. А. Комяков, В. В. Эрбес, А. Л. Каштанов, Сунгквун Чой // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – С. 257–263.

271 Комяков, А. А. Разработка математической модели объема потребления электрической энергии в системе тягового электроснабжения на основе нечетких нейронных сетей / А. А. Комяков, В. И. Иванченко, В. В. Эрбес // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: Материалы меж-

дународной научно-практической конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 129–134.

272 Комяков, А. А. Повышение достоверности определения энергетической эффективности эксплуатации энергосберегающих устройств и технологий в системах электроснабжения железных дорог / А. А. Комяков, В. В. Эрбес, О. О. Комякова // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 13–17.

273 Комяков, А. А. Исследование законов распределения расхода электроэнергии в системах тягового и нетягового электроснабжения / А. А. Комяков, В. Л. Незевак // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 186–191.

274 Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 416 с.

275 Комяков, А.А. Обоснование выбора непараметрических методов математической статистики для оценки эффективности внедрения энергосберегающих устройств на железнодорожном транспорте / А. А. Комяков, М. М. Никифоров, В. В. Эрбес // Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы : тр. Всерос. науч.-практ. конф., г. Хабаровск, 19–20 ноября 2015 г. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. – С. 86–89.

276 Каштанов, А. Л. Влияние уровня напряжения на энергетическую эффективность эксплуатации электрооборудования / А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, В. В. Эрбес // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 258–264.

277 Cheremisin, V. T. Nonparametric statistical approach to evaluating the effectiveness of energy-saving devices / V. T. Cheremisin, V. V. Erbes, A. A. Komyakov // Environment and Electrical Engineering (EEEIC) : 14th International Conference, Krakow, 10-12 May 2014. – pp. 58 – 60. – doi: 10.1109/EEEIC.2014.6835836.

278 Разработка методики оценки энергетической эффективности энерго-сберегающих устройств и технологий в системе тягового электроснабжения: отчет о НИР / Комяков А. А., Пашков Д. В., Каштанов А. Л. и др. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2016. 60 с.

279 Каштанов, А. Л. Актуализация энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» / А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, М. М. Никифоров // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 141–147.

280 Каштанов, А. Л. О работе по актуализации энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года / А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, М. М. Никифоров // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: Материалы второй международной научно-практической конференции. – Омск, 2016. – С. 159 – 165.

281 Титова, Т. С. Оценки энергоэффективности работы железнодорожного транспорта применением специализированных удельных единиц измерения / Т. С. Титова, А. М. Евстафьев, М. Ю. Изварин, М. В. Евстафьева // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – № 1. – С. 119–126.

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

283 Первый умный вокзал в России // Здания высоких технологий. – 2013. – №1. – С. 60–64.

284 Al-Ali, A. R. A smart home energy management system using IoT and big data analytics approach / A. R. Al-Ali, I. A. Zualkernan, M. Rashid, R. Gupta, M. Ali-karar // IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 2017. – № 63-4. – P. 426–434.

285 Ayan, O. Smart home energy management technologies based on demand side management and a review of smart plugs with smart thermostats / O. Ayan. B. E. Turkey // 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). – 2017. – P. 1247–1252.

286 Gheydi, M. The effect of demand response on operation of smart home energy system with renewable energy resources / M. Gheydi, P. Farhadi. R. Ghafari // 2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE). – 2016. – P. 1–6.

287 Ilupeju, S. A. O. Smart electricity distribution for sustainable development in Southern Africa sub-urban settlements / S. A. O. Ilupeju, F. L. Inambao // 2014 11th International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy. – 2014. – P. 376–383.

288 Kuzlu, M. A Comprehensive Review of Smart Grid Related Standards and Protocols / M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn, S. Rahman // 2017 5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair. – 2017. – P. 12–16.

289 Brusakova, I. A. Prospects for the Development of IIOT Technology in Russia / I. A. Brusakova, A. D. Borisov, G. R. Gusko, D. Y. Nekrasov, K. E. Malenkova // 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference. – 2017. – P. 1315–1317.

290 Khan, I. Segmentation of Factories on Electricity Consumption Behaviors Using Load Profile Data / I. Khan, J. Z. Huang, M. A. Masud, Q. S. Jiang // IEEE Access. – 2016. – Vol. 4. – P. 8394–8406.

291 Kulikov, A. L. Automatic Control System of Power Supply of Active Consumers / A. L. Kulikov, M. V. Sharygin // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. – 2017. DOI:10.1109/ICIEAM.2017.8076236

292 Mukhopadhyay, P. Approach to make Smart Grid a Reality / P. Mukhopadhyay, H. K. Chawla // 2014 International Conference on Advances in Energy Conversion Technologies. – 2014. – P. 77–82.

293 Pineda, R. Service Systems Engineering: Emerging Skills and Tools / R. Pineda, A. Lopes, B. Tseng, and O. H. Salcedo // Conference on Systems Engineering Research. – 2012. – Vol. 8. – P. 420–427.

294 Wang, C. Y. Research on the Bid Data Technique in Electric Power Industry / C. Y. Wang, W. C. Li, L. J. Wu, Y. Yang, X. J. Shu, Y. Zhang // Proceedings of the 2016 4th International Conference on Electrical & Electronics Engineering and Computer Science. – 2016. – Vol. 50. – P. 679–682.

295 Wu, G. H. Design and Implement of Baseband Circuits for a Wireless Automatic Meter Reading Application / G. H. Wu et al. // IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC). – 2019.

296 Haibo, D. Research on Energy Optimal Scheduling Based on Supply and Demand Forecast for Iron and Steel Enterprises / D. Haibo; Z. Weifeng // 6th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). – 2014.

297 Yang, Y. Design and Development of Management System for Enterprise Energy Consumption and Cost / Y. Yang, Q. Liu, L. Song // IEEE International Conference on Communication Problem-Solving (ICCP). – 2015.

298 Ле Конг Зань. Управление режимами активно-адаптивных электрических сетей на основе моделирования и параметрической идентификации узлов нагрузки: дис. ...канд. техн. наук: 05.13.06 / Ле Конг Зань. – Иркутск, 2015. 24 с.

299 Пат. на полезную модель 123192 РФ. МПК G06Q10/00, G06Q20/00. Автоматизированная система постоянно действующего аудита энергоэффективности / А. Н. Беляев, В. В. Валиков, А. В. Валиков, В. Н. Червяков (РФ) – № 2012117862/08; Заявлено 27.04.2012; Опубл. 20.12.2012. Бюл. № 35.

300 Пат. на изобретение 2503015 РФ. МПК G01R11/00. Система управления электропотреблением промышленных предприятий и производств / Ю. Н. Варавин, А. Ю. Шахов, О. А. Трифанова, А. Н. Дергунов, И. И. Мельников,

С. В. Первунин, В. М. Куркин, С. Е. Шибяев (РФ) – №2012109175/28; Заявлено 11.03.2012; Оpubл. 27.12.2013. Бюл. № 36.

301 Комяков, А. А. Автоматизированная система контроля и управления энергетической эффективностью производственных процессов на железнодорожном транспорте / А. А. Комяков, В. В. Эрбес // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы научной конференции / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2015. – С. 104–108.

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

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

304 Быковский, Ю. М. Разработка метода оценки параметров распределенного магнитного поля с помощью датчика Холла / Ю. М. Быковский, В. В. Левченко // Водный транспорт. – 2012. – № 1 (13). – С. 75–83.

305 Маланин, В. П. Разработка интеллектуального бесконтактного высокочастотного датчика тока с использованием элемента Холла / В. П. Маланин, С. В. Мыльников, А. А. Кателкин // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: сборник статей Международной научн.-техн. конф. – Пенза, 2013. – С. 230–233.

306 Комяков, А. А. Применение лабораторной станции NI ELVIS II для проведения натуральных испытаний датчиков контроля режимов работы электрооборудования / А. А. Комяков, В. В. Эрбес // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте. Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2016. – С. 191–196.

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

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

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

310 Комяков, А. А. Разработка программного комплекса для определения эффективности энергосберегающих устройств и технологий в производственном процессе предприятия / А. А. Комяков, А. В. Пономарев, В. В. Эрбес // Омский научный вестник. – 2018. – № 3 (159). – С. 31–36. – DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-31-36.

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

312 Cheremisin, V. T. Development of Device for Monitoring of Energy Efficiency of Production Processes at Enterprises / V. T. Cheremisin, V. V. Erbes, A. A. Komyakov // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) : 4th International Conference, Moscow, 15-18 May 2018. – pp. 1-5. – doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728612.

313 Komyakov, A. A. Application of an Intelligent System for the Monitoring of Energy Efficiency Indicators at Service Locomotive Depots / A. A. Komyakov, A. V. Ponomarev, V. V. Erbes / Industrial Engineering and Modern Technologies

(FarEastCon) : International Multi-Conference, Vladivostok, 3-4 Oct 2018. – pp. 1-7.– doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602926.

314 Cheremisin, V. T. Technology for reducing the consumption and losses of electrical energy in the power supply systems of railway consumers / V. T. Cheremisin, Yu. V. Demin, A. A. Komyakov etc. // MATEC Web of Conferences, Vol. 239. – 2018. – Siberian Transport Forum - TransSiberia 2018. – pp. 1-7. – doi.org/10.1051/mateconf/201823901033.

315 Комяков, А. А. Система управления энергетической эффективностью предприятий железнодорожного транспорта на основе технологий Smart Grid / А. А. Комяков, В. И. Иванченко // IX Международный симпозиум «Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта» Eltrans'2017: тезисы докладов. – СПб: Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2017. – С. 46–47.

316 Иванченко, В. И. Экспериментальные исследования энергетической эффективности нетяговых железнодорожных потребителей / В. И. Иванченко, А. А. Комяков, В. В. Эрбес // Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности: Материалы всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – С. 81–88.

317 Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности предприятий по сервисному обслуживанию локомотивов на базе концепции «Умное предприятие» / В. Т. Черемисин, В. И. Иванченко, А. А. Комяков, В. В. Эрбес // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: материалы третьей международной научно-практической конференции. – М.: ООО «ЛокоТех», 2018. – С. 372–376.

318 Ожегов, С. И. Толковый словарь русского языка: 80 000 слов и фразеологических выражений / С. И. Ожегов, Н. Ю. Шведова. – М., 1997. – 944 с.

319 О внедрении системы нормирования удельного расхода энергоресурсов на единицу конечной продукции и утверждения Регламента по учету тепловой

энергии, воды и стоков: Распоряжение начальника Свердловской железной дороги №Н-182р/НТЭЦ от 22.07.2009. – Екатеринбург: ОАО «РЖД», 2009.

320 Иванченко, В. И. Повышение эффективности эксплуатации нетяговых железнодорожных потребителей за счет совершенствования технологии электропотребления : дис... канд. техн. наук : 05.22.07 / Иванченко Владимир Иванович. – Омск, 2019. – 155 с.

321 Методические рекомендации по оценке эффективности реализации мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в промышленности: утверждены Приказом Минэкономразвития РФ от 29.07.2018 г. № 468. – М.: Минэкономразвития, 2018.

322 Анализ результатов реализации энергетической стратегии холдинга «РЖД» в 2008 – 2015 годах и оценка текущего состояния холдинга «РЖД», а также сравнение уровня энергоэффективности железных дорог России и мира, актуализированные целевые параметры энергетической стратегии на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года, а также результаты PEST и SWOT анализа: отчет о НИР по х.д. 365/16, шифр 9.063 / Черемисин В. Т., Никифоров М. М., Комяков А. А. и др. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2016. – 272 с.

323 Купчинская, Ю. А., Основы управления качеством: цикл PDCA / Ю. А. Купчинская, С. А. Чеховская // Бизнес-образование в экономике знаний. – 2016. – №3 (5). – С. 36–39.

324 Жемчугов, А. М. Цикл PDCA Деминга. Современное развитие / А. М. Жемчугов, М. К. Жемчугов // Проблемы экономики и менеджмента. – 2016. – №2 (54). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsikl-pdca-deminga-sovremennoe-razvitiie> (дата обращения: 24.03.2020).

325 Туликова, О. В. Чем измерить экономию? / О. В. Туликова // Энергоэффективность и энергосбережение. – 2012. – № 5. – С. 14–17.

326 Комяков, А. А. Совершенствование методологии контроля выполнения заданий по экономии топливно-энергетических ресурсов на предприятиях железнодорожного транспорта / А. А. Комяков // Инновационные проекты и технологии

машиностроительных производств: Материалы третьей всероссийской научно-технической конференции, Омск, 2019. – С. 27–32.

327 Давыдов, А. И. Общие принципы сравнительного анализа эффективности использования электроэнергии на тягу поездов по участкам железных дорог // А. И. Давыдов, М. М. Никифоров / Наука и образование транспорту: материалы VI Междун. науч.-практ. конф. / Самарский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 237–240.

328 Рожицкий, Д. Б. К вопросу об оперативной оценке влияния расхода топлива с учетом изменения температуры атмосферного воздуха / Д. Б. Рожицкий, М. С. Филаткин и др. // Энергосбережение и водоподготовка. – 2017. – №6 (110). – С. 45–52.

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

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

331 Степанец, В. А. Оценка энергетической эффективности производственной деятельности холдинга «РЖД» / В. А. Степанец, Д. Б. Рожицкий // Главный энергетик. – 2012. – № 3. – С. 22–25.

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

Приложение А

Выборки исходных данных, используемые
при формировании математических моделей

Таблица А.1 – Выборка исходных данных для ТЧЭ Карасук (фрагмент)

$t, ^\circ\text{C}$	W, кВт·ч	УРЭ, кВт·ч/ 10 тыс. т·км бр.	$V_{\text{уч}}, \text{км/ч}$	$V_{\text{тех}}, \text{км/ч}$	$T_{\text{прост}}, \text{ч}$	$m_c, \text{т}$	$q, \text{т}$
-5,30	5280,00	95,83	75,45	75,45	0,00	2623,81	9,37
20,90	7350,00	95,83	74,12	74,12	0,00	3652,38	12,86
6,80	9880,00	95,83	71,59	71,59	0,00	4909,52	18,88
14,60	5780,00	95,85	75,00	75,00	0,00	2871,43	10,56
-5,70	4290,00	95,97	68,48	74,56	0,00	2128,57	7,10
12,80	10160,00	96,03	74,12	74,12	0,00	5038,10	20,31
19,50	6100,00	96,06	65,97	65,97	0,00	3023,81	10,50
-15,90	3960,00	96,12	75,90	75,90	0,00	1961,90	5,91
-1,70	12690,00	96,21	62,38	62,38	0,00	6280,95	22,76
-1,40	7690,00	96,25	74,12	74,12	0,00	3804,76	13,59
16,40	7520,00	96,29	38,41	51,85	0,00	3719,05	12,56
-24,30	6890,00	96,50	70,39	70,39	0,00	3400,00	12,50
-7,10	7740,00	96,51	73,68	73,68	0,00	3819,05	12,90
-25,00	9200,00	96,54	74,12	74,12	0,00	4538,10	15,76
13,40	3940,00	96,57	60,58	75,45	0,10	1942,86	7,96
-4,70	6370,00	96,66	67,02	67,02	0,00	3138,10	10,67
-19,00	5400,00	96,77	73,26	73,26	0,20	2657,14	8,63
1,10	6990,00	96,81	63,96	63,96	0,00	3438,10	11,62
-2,70	8180,00	96,92	72,00	72,00	0,00	4019,05	15,00
15,70	8920,00	97,17	30,88	72,83	0,00	4371,43	15,39
-2,50	8690,00	97,20	67,02	67,02	0,00	4257,14	15,65
14,00	12870,00	97,21	66,67	75,00	0,00	6304,76	23,18
17,10	6300,00	97,22	70,00	70,00	0,60	3085,71	11,02
-16,10	9280,00	97,27	73,68	73,68	0,70	4542,86	15,77
-5,40	5400,00	97,30	57,80	57,80	0,00	2642,86	9,18
-11,00	7250,00	97,45	68,85	68,85	0,00	3542,86	12,65
-12,70	6270,00	97,51	71,59	74,12	0,00	3061,90	11,09
16,10	6670,00	97,51	72,83	72,83	0,00	3257,14	10,86
-1,40	7670,00	97,58	70,39	70,39	0,10	3742,86	22,28
0,30	8490,00	97,59	69,23	69,23	0,00	4142,86	14,00
-4,00	3220,00	97,87	72,00	72,00	0,00	1566,67	3,96
-4,30	4610,00	97,88	75,00	75,00	0,00	2242,86	11,68
20,80	7400,00	97,88	65,97	65,97	0,30	3600,00	13,24
5,50	7190,00	97,96	75,45	75,45	0,00	3495,24	12,22
-14,60	7060,00	98,06	74,56	74,56	1,00	3428,57	11,90
14,60	7320,00	98,12	71,19	71,19	0,30	3552,38	11,53
12,50	7530,00	98,17	71,19	75,45	0,00	3652,38	12,68
9,90	6040,00	98,21	75,00	75,00	0,00	2928,57	11,09

$t, ^\circ\text{C}$	$W, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	УРЭ, кВт·ч/ 10 тыс. т·км бр.	$V_{\text{уч}}, \text{км}/\text{ч}$	$V_{\text{мех}}, \text{км}/\text{ч}$	$T_{\text{прот}}, \text{ч}$	$m_c, \text{т}$	$q, \text{т}$
-27,50	10660,00	98,25	70,79	74,12	0,10	5166,67	15,02
-16,30	8060,00	98,29	72,00	72,00	0,00	3904,76	23,24
16,20	6280,00	98,43	75,00	75,00	0,00	3038,10	10,70
-3,10	7540,00	98,43	74,12	74,12	0,00	3647,62	12,67
8,80	7570,00	98,44	67,38	67,38	2,00	3661,90	12,54
4,20	9660,00	98,47	70,00	70,00	0,20	4671,43	16,00
-14,60	12960,00	98,48	70,00	70,00	0,00	6266,67	22,71
-7,50	7160,00	98,49	75,00	75,00	0,00	3461,90	12,02
10,40	7900,00	98,50	74,12	74,12	0,00	3819,05	13,45
22,30	7290,00	98,51	69,61	69,61	0,00	3523,81	12,59
-2,20	8130,00	98,55	63,00	63,00	0,00	3928,57	14,23
21,00	6890,00	98,57	74,12	74,12	0,00	3328,57	12,06
-27,50	7000,00	98,59	73,68	73,68	0,00	3380,95	13,63
16,30	7020,00	98,60	75,45	75,45	0,00	3390,48	11,30
-8,90	12890,00	98,62	62,38	62,38	0,00	6223,81	22,88
5,80	7730,00	98,72	71,59	71,59	0,00	3728,57	13,51
-7,40	9790,00	98,79	67,38	67,38	0,40	4719,05	16,62
21,00	9820,00	98,79	65,28	65,28	0,00	4733,33	16,67
14,20	9250,00	98,82	44,06	44,06	0,40	4457,14	15,26
-18,10	5170,00	98,85	60,58	65,63	0,30	2490,48	16,38
5,80	7540,00	99,08	67,02	67,02	0,00	3623,81	13,13
12,20	8850,00	99,10	73,26	73,26	4,00	4252,38	14,56
13,20	8860,00	99,11	72,83	72,83	0,00	4257,14	15,65
-0,70	5580,00	99,11	61,17	61,17	0,00	2680,95	10,64
15,70	6920,00	99,14	56,00	71,19	0,00	3323,81	11,87
-16,40	4640,00	99,15	74,12	74,12	0,00	2228,57	5,93
-8,80	7250,00	99,18	70,00	70,00	0,00	3480,95	13,39
22,80	9420,00	99,26	70,79	70,79	0,00	4519,05	15,48
-19,00	6780,00	99,27	74,12	74,12	0,00	3252,38	12,14
13,80	7710,00	99,36	73,68	73,68	0,00	3695,24	13,79
-11,90	7930,00	99,37	70,00	70,00	0,00	3800,00	12,84
5,10	13150,00	99,40	67,38	67,38	0,00	6300,00	23,16
-1,70	9260,00	99,46	75,90	75,90	0,00	4433,33	17,32
-4,00	3930,00	99,49	57,80	57,80	0,30	1880,95	7,71
-27,50	5990,00	99,50	75,00	75,00	0,00	2866,67	10,09
20,60	10330,00	99,52	68,11	68,11	0,00	4942,86	18,72
15,10	8520,00	99,53	67,74	75,00	0,10	4076,19	15,44
11,20	6610,00	99,55	74,56	74,56	0,00	3161,90	11,29
5,80	7620,00	99,61	42,14	73,68	0,00	3642,86	13,20
-25,00	8160,00	99,63	70,39	74,12	0,00	3900,00	13,93
16,10	8170,00	99,63	67,74	67,74	0,30	3904,76	13,95
16,40	6680,00	99,70	63,00	66,67	0,00	3190,48	10,63
8,00	4920,00	99,80	68,85	68,85	0,00	2347,62	5,93
-14,60	6130,00	99,84	47,73	47,73	0,30	2923,81	9,88
13,10	6890,00	99,86	39,01	75,00	0,00	3285,71	11,65
-13,50	8600,00	100,00	72,41	72,41	0,00	4095,24	15,51
-6,00	7000,00	100,00	71,59	71,59	0,00	3333,33	11,74

$t, ^\circ\text{C}$	W, кВт·ч	УРЭ, кВт·ч/ 10 тыс. т·км бр.	$V_{уч}, \text{км/ч}$	$V_{техн}, \text{км/ч}$	$T_{прот}, \text{ч}$	$m_c, \text{т}$	$q, \text{т}$
13,10	6770,00	100,15	74,12	74,12	0,00	3219,05	11,33
14,20	6550,00	100,15	74,12	74,12	0,00	3114,29	10,81
13,10	6110,00	100,16	66,67	66,67	0,00	2904,76	11,17
19,40	8700,00	100,23	62,07	62,07	0,30	4133,33	14,55
-18,10	4230,00	100,24	72,41	72,41	0,00	2009,52	10,05
13,10	6830,00	100,29	46,32	48,84	0,00	3242,86	11,58
0,00	6450,00	100,47	61,76	61,76	0,00	3057,14	12,74
9,40	5990,00	100,50	72,83	72,83	0,30	2838,10	16,50
-20,20	8420,00	100,60	70,39	70,39	0,00	3985,71	14,03
-12,70	6590,00	100,61	77,78	77,78	0,00	3119,05	10,68
4,10	6230,00	100,65	66,67	66,67	0,00	2947,62	10,53
-1,70	7450,00	100,81	73,68	73,68	0,00	3519,05	13,13
-12,70	7330,00	100,83	75,90	75,90	0,00	3461,90	12,19
16,30	7150,00	100,85	72,00	72,00	0,00	3376,19	12,23

Таблица А.2 – Выборка исходных данных для ТЧЭ Барабинск (фрагмент)

$t, ^\circ\text{C}$	W, кВт·ч	$T_{наг}, \text{мин}$	УРЭ, кВт·ч/ 10 тыс. т·км бр.	$V_{уч}, \text{км/ч}$	$V_{техн}, \text{км/ч}$	$T_{прот}, \text{ч}$	$m_c, \text{т}$	$q, \text{т}$
20	2462	0	105,67	75,35	77,14	0,00	719,14	14,98
14,2	2463	0	105,71	75,35	77,14	0,00	719,14	14,98
19,5	1650	0	105,77	73,64	74,77	0,00	481,48	15,05
15,3	2877	0	105,77	73,36	75,64	0,00	839,51	14,99
5,5	3905	0	105,83	83,79	84,52	0,00	1138,89	14,99
11,8	3535	0	105,84	83,79	84,52	0,00	1030,86	14,32
12,5	2265	0	105,84	98,18	101,25	0,00	660,49	15,01
20,8	3292	0	105,85	75,35	77,14	0,00	959,88	15,00
14,5	3294	2	105,92	83,79	85,26	0,00	959,88	15,00
-14,3	2362	0	105,92	74,48	75,06	0,00	688,27	14,34
22,3	2193	0	105,94	74,48	75,06	0,00	638,89	7,26
9,6	3136	0	105,95	78,70	79,35	0,00	913,58	15,75
5,8	2469	0	105,97	75,35	77,14	0,00	719,14	14,98
17,1	2268	0	105,98	78,70	79,35	0,00	660,49	15,01
20,8	2470	0	106,01	74,48	74,48	0,00	719,14	14,98
14,2	2354	-1	106,04	66,58	73,64	0,00	685,19	14,27
19,4	2683	0	106,05	66,58	73,92	0,00	780,86	15,02
0,3	2885	0	106,07	75,35	77,14	0,00	839,51	14,99
15,1	2886	4	106,10	83,08	86,79	0,00	839,51	14,99
13,1	2547	7	106,13	73,36	77,76	0,00	740,74	14,25
5,8	2059	0	106,13	78,70	79,35	0,00	598,77	14,97
11,8	2272	0	106,17	81,34	82,72	0,00	660,49	15,01
15,7	2474	0	106,18	83,79	84,52	0,00	719,14	14,98
21	3103	0	106,27	83,79	84,52	0,00	901,23	15,02
22,3	1862	0	106,40	73,64	74,77	0,00	540,12	15,00
16,2	2320	1	106,42	81,34	82,37	0,00	672,84	14,02
20,9	2895	3	106,43	74,20	76,54	0,00	839,51	14,99
19,1	2895	0	106,43	89,17	90,00	0,00	839,51	14,99
20	2480	0	106,44	81,34	82,72	0,00	719,14	14,98
14,2	2065	0	106,44	74,48	75,35	0,00	598,77	14,97

$t, ^\circ\text{C}$	$W, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	$T_{\text{наг}}, \text{МИН}$	УРЭ, кВт·ч/ 10 тыс. т·км бр.	$V_{\text{уч}}, \text{км/ч}$	$V_{\text{техн}}, \text{км/ч}$	$T_{\text{прот}}, \text{ч}$	$m_c, \text{т}$	$q, \text{т}$
-1,7	2278	0	106,45	77,45	77,45	0,00	660,49	15,01
-7,5	2161	0	106,45	68,94	73,08	0,00	626,54	14,24
15	3513	0	106,45	75,35	77,14	0,00	1018,52	14,98
14,8	2694	0	106,48	94,37	94,37	0,00	780,86	15,02
16,2	2482	5	106,52	69,43	73,36	0,00	719,14	14,98
12,4	2281	0	106,59	77,45	77,45	0,00	660,49	15,01
17,8	2697	3	106,60	67,27	74,77	0,00	780,86	15,02
9,4	1866	0	106,63	68,94	72,00	0,00	540,12	15,00
20,8	2699	0	106,68	94,37	94,37	0,00	780,86	15,02
8,5	1867	0	106,69	78,70	79,35	0,00	540,12	15,00
22,5	3320	0	106,75	83,79	84,52	0,00	959,88	15,00
19,4	2702	0	106,80	83,79	84,52	0,00	780,86	15,02
20	1869	0	106,80	68,94	73,08	0,00	540,12	15,00
10,4	2491	0	106,91	83,79	84,52	0,00	719,14	14,98
8,5	2708	0	107,04	73,36	75,64	0,00	780,86	15,02
19,5	2494	0	107,04	74,48	74,48	0,00	719,14	14,98
23,9	3533	0	107,06	68,45	81,00	0,00	1018,52	14,98
20,6	2292	0	107,10	68,94	69,93	0,00	660,49	15,01
15,3	2078	0	107,11	78,70	79,35	0,00	598,77	14,97
17,6	3535	0	107,12	83,79	84,52	0,00	1018,52	14,98
16,4	2916	8	107,21	69,43	74,20	0,00	839,51	14,99
14,2	2498	0	107,21	68,45	81,00	0,00	719,14	14,98
16,1	2080	0	107,22	74,48	74,48	0,00	598,77	14,97
19	2713	6	107,23	66,58	75,64	0,00	780,86	15,02
22,8	2714	7	107,27	73,36	77,76	0,00	780,86	15,02
-9,1	2501	0	107,34	68,94	69,93	0,00	719,14	14,98
12,8	2501	0	107,34	74,48	75,06	0,00	719,14	14,98
12,8	2502	0	107,38	66,58	73,92	0,00	719,14	14,98
19,4	2923	0	107,46	94,37	94,37	0,00	839,51	14,99
-1,2	2085	0	107,47	68,94	69,93	0,00	598,77	14,97
5,8	2302	0	107,57	66,58	72,00	0,00	660,49	15,01
-2,2	2507	7	107,60	73,36	77,76	0,00	719,14	14,98
13,4	1884	0	107,66	68,94	73,08	0,00	540,12	15,00
12,5	2315	0	107,67	74,48	74,48	0,00	663,58	15,08
13,4	2305	0	107,71	73,36	75,64	0,00	660,49	15,01
-4	2305	0	107,71	77,45	77,45	0,20	660,49	15,01
2,4	1885	0	107,71	68,94	69,93	0,00	540,12	15,00
15	2306	0	107,76	73,64	74,77	0,00	660,49	15,01
0	2306	0	107,76	77,45	77,45	0,00	660,49	15,01
14,8	2513	0	107,85	74,48	74,48	0,00	719,14	14,98
15	2590	0	107,92	78,70	79,35	0,00	740,74	14,25
19,4	2094	0	107,94	74,48	75,06	0,00	598,77	14,97
13	2731	0	107,94	74,48	74,48	0,00	780,86	15,02
12,9	2516	0	107,98	73,36	75,64	0,00	719,14	14,98
8,5	2311	0	107,99	78,70	79,35	0,00	660,49	15,01
4,1	2312	0	108,04	77,45	77,45	0,00	660,49	15,01
-4,1	2518	0	108,07	74,48	75,06	0,00	719,14	14,98
22,3	2735	0	108,10	68,45	82,37	0,00	780,86	15,02
0,3	2098	0	108,14	74,48	75,06	0,00	598,77	14,97
2,4	4207	0	108,15	83,79	84,52	0,00	1200,62	15,01
14,9	2737	0	108,18	83,79	84,52	0,00	780,86	15,02
4,2	3614	0	108,20	83,79	84,52	0,00	1030,86	14,32
23	3614	0	108,20	83,79	84,52	0,00	1030,86	14,32

$t, ^\circ\text{C}$	$W, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	$T_{\text{наг}}, \text{МИН}$	УРЭ, кВт·ч/ 10 тыс. т·км бр.	$V_{\text{уч}}, \text{км/ч}$	$V_{\text{техн}}, \text{км/ч}$	$T_{\text{прот}}, \text{ч}$	$m_c, \text{т}$	$q, \text{т}$
3,4	3160	2	108,22	75,35	77,76	0,00	901,23	15,02
18,7	3160	1	108,22	75,35	77,14	0,00	901,23	15,02
13,8	2316	0	108,22	68,94	73,08	0,00	660,49	15,01
19,4	2524	0	108,33	68,45	78,39	0,00	719,14	14,98
20,8	3619	2	108,35	68,45	81,68	0,00	1030,86	14,32
25,1	3175	0	108,36	73,36	75,64	0,00	904,32	15,07
4,9	2103	0	108,40	68,94	69,93	0,00	598,77	14,97
13,4	2526	0	108,41	83,79	84,52	0,00	719,14	14,98
5,8	2104	0	108,45	75,35	77,14	0,00	598,77	14,97
12,5	2321	0	108,46	73,36	75,64	0,00	660,49	15,01
14,2	3168	0	108,49	68,45	81,00	0,00	901,23	15,02
3,4	2528	0	108,50	73,64	74,77	0,00	719,14	14,98
6,8	2745	0	108,50	75,35	77,14	0,00	780,86	15,02
13,1	2746	0	108,54	94,37	94,37	0,00	780,86	15,02
19,4	2746	0	108,54	94,37	94,37	0,00	780,86	15,02
22,5	1900	0	108,57	73,64	74,77	0,00	540,12	15,00

Таблица А.3 – Выборка исходных данных для ТЧприг Омск (фрагмент)

$t, ^\circ\text{C}$	$W, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	$W_{\text{рек}}, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	УРЭ, кВт·ч/ 10 тыс. т·км бр.	$V_{\text{уч}}, \text{км/ч}$	$V_{\text{техн}}, \text{км/ч}$	$d_{\text{аэп}}, \text{отн. ед.}$	$m_c, \text{т}$	$q, \text{т}$
20,6	397	92,5	246,98	61,89	68,78	0,00	95,00	5,94
18,3	797,25	282,5	247,74	49,65	67,73	0,68	190,00	11,88
15,9	798	136,75	247,98	62,02	67,45	0,92	190,00	11,88
16,7	800,75	198,75	248,83	62,46	68,85	0,76	190,00	11,88
8,8	444,75	51,75	250,62	103,55	97,49	0,45	95,00	5,94
13,4	807,25	189	250,85	62,44	68,72	0,88	190,00	11,87
9,8	809,5	117	251,64	61,51	67,88	0,82	190,00	7,92
21	1218	411	252,33	62,11	68,02	0,69	285,00	11,87
15,9	812,25	271,75	252,40	61,29	67,49	0,78	190,00	11,87
18,8	1219	346	252,53	61,59	67,96	0,67	285,00	11,88
21	1219,25	328,25	252,58	62,48	68,26	0,17	285,00	11,88
13	814	201,75	252,94	62,58	68,66	0,70	190,00	11,88
20,5	814,5	236,75	253,11	62,19	67,52	0,72	190,00	11,87
14,3	408,5	72,75	253,79	60,61	64,63	0,89	95,00	5,94
19	816	100,5	254,20	61,64	67,77	0,84	190,00	11,88
12,1	409,25	60,5	254,39	61,93	67,10	0,93	95,00	5,94
1,1	1133	193,5	254,46	56,93	62,90	0,00	285,00	11,88
19,8	410,25	131,25	255,03	62,31	67,98	0,84	95,00	5,94
11,9	823,5	230	255,89	62,34	69,66	0,82	190,00	11,88
9,2	515,75	39,5	256,81	92,17	110,58	0,66	95,00	3,96
4,8	826,5	158,5	257,41	92,01	68,38	0,00	190,00	11,87
10,4	828,5	191,25	257,45	62,13	67,53	0,00	190,00	11,88
11,4	414,5	78,25	257,61	62,00	67,61	0,92	95,00	5,94
18,3	823,75	225	258,00	61,57	70,24	0,63	190,00	7,92
-11,9	781	71,5	258,05	58,07	68,65	0,00	190,00	7,92
18,2	830,5	170,25	258,07	62,28	67,19	0,75	190,00	11,88
19,7	830,5	264	258,07	62,05	69,02	0,76	190,00	11,88
20,6	830,5	107,5	258,13	62,14	67,28	0,83	190,00	11,88
12,2	1249,25	341,75	258,80	62,23	66,67	0,00	285,00	11,87
12,8	416,5	100,25	258,99	62,37	68,82	0,00	95,00	5,94

$t, ^\circ\text{C}$	$W, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	$W_{\text{рек}}, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	УРЭ, кВт·ч/ 10 тыс. т·км бр.	$V_{\text{уч}}, \text{км}/\text{ч}$	$V_{\text{техн}}, \text{км}/\text{ч}$	$d_{\text{авт}}, \text{отн.}$ ед.	$m_c, \text{т}$	$q, \text{т}$
14,9	1250,5	209,75	259,14	62,03	67,57	0,00	285,00	11,88
13,4	830	217,5	259,48	45,31	68,89	0,83	190,00	11,88
20,8	839,75	210,5	260,94	62,22	68,52	0,00	190,00	11,87
16,2	420,5	82,75	261,34	62,12	66,28	0,89	95,00	5,94
13,3	839,25	259,75	261,35	61,92	69,41	0,56	190,00	11,87
6	841,75	136,5	261,56	62,06	66,66	0,91	190,00	7,92
13,4	842,75	197,25	261,90	62,75	67,96	0,85	190,00	11,88
22,2	841,75	105,5	262,16	61,79	67,40	0,83	190,00	11,87
9,8	422,25	105,25	262,33	60,85	65,10	0,89	95,00	5,94
21,4	846,5	149,75	262,95	60,62	63,90	0,86	190,00	11,88
-4	846,25	0	262,97	62,09	67,32	0,00	190,00	7,92
11,4	425	120,5	264,13	62,18	67,21	0,79	95,00	5,94
20,6	1267	139,25	264,34	95,87	67,31	0,83	285,00	11,87
16,5	425,5	66,25	264,45	62,31	67,61	0,92	95,00	5,94
15,2	425,5	70,5	264,53	61,83	67,79	0,00	95,00	5,94
20,8	683	83,5	264,79	67,56	72,10	0,84	190,00	11,88
14,3	426,25	68,25	264,91	61,96	67,29	0,92	95,00	5,94
19,7	854	194,75	265,38	62,24	67,78	0,81	190,00	11,88
25,6	851	127,5	265,55	61,95	69,35	0,00	190,00	11,88
11,9	855	141	265,58	60,28	64,02	0,90	190,00	11,88
15,4	855	135,25	265,58	93,18	63,89	0,89	190,00	11,87
13,3	854,75	141,75	265,70	62,16	70,01	0,78	190,00	7,92
11,8	1265	200	266,07	61,24	69,93	0,80	285,00	11,88
-8,6	428,5	101	266,38	61,97	66,67	0,89	95,00	3,96
8,5	852,25	187,25	266,71	61,78	67,88	0,75	190,00	11,88
16,2	428	118,5	266,73	63,02	69,75	0,00	95,00	5,94
18,8	1288,75	185,5	266,98	62,10	66,97	0,91	285,00	11,88
20,9	1289	317,75	267,03	62,17	68,33	0,00	285,00	11,88
26,2	859,5	141	267,08	61,71	67,98	0,92	190,00	11,88
-1,3	429,75	157,75	267,08	62,03	69,82	0,03	95,00	3,96
22,3	860,25	190	267,37	62,13	67,86	0,00	190,00	11,87
14,8	860,75	139,5	267,37	60,94	65,03	0,91	190,00	11,88
16,5	636	77,25	267,45	44,13	69,05	0,00	190,00	11,87
22,5	1292,25	257,5	267,70	61,69	68,14	0,73	285,00	11,88
7,4	861,5	239	267,80	75,74	69,04	0,00	190,00	11,88
16,3	431	126,5	267,86	61,92	67,88	0,38	95,00	5,94
17	431	72,25	267,86	62,30	66,90	0,90	95,00	5,94
22,5	1295	315,25	268,26	62,20	69,51	0,00	285,00	11,88
-4	862	0	268,53	62,41	64,21	0,00	190,00	7,92
9,8	1299,75		269,30	61,96	69,93	0,86	285,00	11,87
21	869,75	121,5	270,18	60,57	63,55	0,00	190,00	11,88
16,7	870,25	218,25	270,43	45,70	68,65	0,75	190,00	11,88
12,5	435,25	122	270,50	62,24	68,60	0,80	95,00	5,94
25,2	1306,75	239	270,70	58,47	64,19	0,00	285,00	11,88
6,8	1308,25	319,75	271,02	62,33	68,14	0,83	285,00	11,88
0	874,5	359	271,74	61,86	68,38	0,00	190,00	7,92
15,6	875	155,25	271,90	63,04	68,02	0,91	190,00	11,87
15,2	437,75	120,25	272,13	61,29	67,35	0,00	95,00	5,94
11,9	871,75	118,25	272,34	63,33	72,19	0,81	190,00	11,88
16,5	438,5	121	272,52	61,84	67,73	0,00	95,00	5,94
0,7	875,75	86,5	272,54	61,76	67,81	0,82	190,00	11,87
15,6	647,25	75,25	272,56	44,82	68,56	0,74	190,00	11,88
11,4	877	111	272,59	61,38	66,97	0,85	190,00	7,92

$t, ^\circ\text{C}$	$W, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	$W_{рек}, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	УРЭ, кВт·ч/ 10 тыс. т·км бр.	$V_{уч}, \text{км}/\text{ч}$	$V_{техн}, \text{км}/\text{ч}$	$d_{авт}, \text{отн.}$ ед.	$m_c, \text{т}$	$q, \text{т}$
11,9	1315,75	168	272,67	62,17	68,40	0,78	285,00	11,87
11,3	825,5	345	273,17	58,85	74,11	0,81	190,00	11,88
14,8	439,75	99,75	273,30	62,89	68,23	0,00	95,00	5,94
14,3	880,25	148	273,43	95,37	64,69	0,87	190,00	11,88
12,8	440	86,25	273,46	61,94	67,21	0,75	95,00	5,94
4,1	440,25	69	273,61	62,02	67,10	0,92	95,00	5,94
6,9	1279,75	302	273,64	60,58	70,68	0,00	285,00	11,87
1,9	439,25	93,25	274,13	62,02	68,46	0,00	95,00	5,94
20,9	1325	285	274,49	62,02	67,85	0,72	285,00	11,88
13,4	884	210	274,69	52,05	68,78	0,82	190,00	11,88
20,5	883,75	203,75	274,75	62,37	69,16	0,73	190,00	11,87
21,3	442,5	48	275,09	61,92	66,86	0,74	95,00	5,94
15,6	886	197,75	275,31	62,17	68,51	0,68	190,00	11,88
17,1	443	121,75	275,39	62,14	69,48	0,00	95,00	5,94
13,4	886	117,25	275,40	62,24	68,35	0,75	190,00	11,88
20	440,25	104,25	275,53	61,47	68,43	0,86	95,00	5,94
21	444	113,5	275,93	61,01	67,09	0,00	95,00	5,94
11,1	1332,25	174,75	276,16	62,34	67,60	0,90	285,00	11,88

Таблица А.4 – Выборка исходных данных для СЛД Аркаим

$W, \text{тыс.}$ $\text{кВт}\cdot\text{ч}$	$V_{произв}, \text{прив. ед.}$	$t, ^\circ\text{C}$	$T_{св.дня}, \text{с};$	$Cl, \%$	$F_w, \text{м}/\text{с}$	$Sn, \text{отн.}$ ед.
642	417,1	-16,9	30100	58,97984	2,3	0,375
604	496,4	-10,6	35799	46,1055	3,1	0,358
429	440,5	-1,6	42853	61,08871	3,1	0,202
491	456,4	5,7	50087	61,87083	4,3	0,058
365	456,0	13,4	56418	59,8871	3,6	
329	425,1	16,5	59780	36,475	3,3	
317	451,1	21,6	58097	35,79032	3,1	
319	469,6	19,7	52470	52,46774	2,6	
359	465,8	9,7	45503	45,90833	2,2	
332	514,8	5,5	38323	48,25806	2,5	0,004
369	469,2	1,1	31850	76,07083	2,7	0,092
469	457,1	-9,0	28340	70,40726	2,6	0,391
420	332,0	-13,4	30100	58,97984	2,3	0,375
388	381,8	-12,6	35799	46,1055	3,1	0,358
284	341,6	-4,2	42853	61,08871	3,1	0,202
259	391,6	3,0	50087	61,87083	4,3	0,058
235	373,7	13,2	56418	59,8871	3,6	
263	390,2	19,8	59780	36,475	3,3	
235	382,2	18,5	58097	35,79032	3,1	
216	353,7	17,0	52470	52,46774	2,6	
258	378,8	13,0	45503	45,90833	2,2	
315	358,0	5,2	38323	48,25806	2,5	0,004
310	332,3	-3,7	31850	76,07083	2,7	0,092
394	356,0	-14,4	28340	70,40726	2,6	0,391
333	295,0	-20,7	30100	44,49583	1,9	0,333
408	359,8	-17,4	35799	43,76339	2,4	0,313
284	389,3	-7,3	42853	58,35484	3,6	0,415
325	423,4	5,5	50087	57,03333	3,6	
197	379,7	14,9	56418	45,33871	3,3	

W, тыс. кВт·ч	$V_{\text{произв}}$, прив. ед.	t , °C	$T_{\text{св.дня}}$, °C;	Cl , %	F_w , м/с	Sn , отн. ед.
247	362,9	22,3	59780	41,39583	3,1	
194	350,6	20,8	58097	27,62097	3,2	
243	334,5	20,6	52470	36,13765	3,3	
272	307,9	12,6	45503	51,82083	2,8	
325	352,6	3,2	38323	65,89431	2,6	
378	341,8	0,3	31850	66,3875	3,8	0,133
363	355,6	-12,1	28340	82,52227	3,8	0,235
321	310,1	-19,4	30100	57,44355	3,2	0,298
414	322,1	-17,8	35799	61,14732	2,3	0,518
360	380,8	-9,2	42853	65,47984	3,8	0,310
340	354,3	5,2	50087	66,1375	3,1	0,008
205	363,8	13,5	56418	42,97581	3,1	

Таблица А.5 – Выборка исходных данных для ШЧ Брянск-Льговский

W, тыс. кВт·ч	$V_{\text{произв}}$, техн. ед.	t , °C	$T_{\text{св.дня}}$, °C;	Cl , %	F_w , м/с	Sn , отн. ед.
619,937	278,38	-5,8	28291	87,0	1,3	0,440
505,259	279,38	-4,9	34734	74,7	1,1	0,266
578,623	281,38	-0,6	42565	74,9	1,1	0,157
413,617	282,87	5,2	50736	50,1	1,5	
391,457	282,38	13,8	58050	55,4	1,0	
330,775	287,38	17,3	62144	67,5	1,1	
334,191	280,37	18,8	60301	62,8	0,9	
400,118	282,38	15,5	53850	67,3	1,0	
368,648	281,38	13,2	45973	64,4	0,8	
455,905	282,38	5,2	37879	77,4	1,1	0,008
459,27	279,38	2,8	30277	96,1	1,1	0,021
578,883	278,38	-8,1	27445	76,5	1,2	0,234
626,834	283,17	-13,8	28291	59,0	0,9	0,392
549,041	266,55	-8,0	34734	73,2	1,4	0,451
533,444	269,42	-0,3	42565	62,5	1,3	0,093
386,808	267,73	9,3	50736	60,8	1,1	
360,912	269,10	17,1	58050	60,2	1,1	
321,953	269,62	19,1	62144	48,9	1,0	
359,097	275,08	26,8	60301	36,4	0,9	
341,117	272,08	19,5	53850	69,6	1,0	
385,692	271,53	10,7	45973	67,4	0,6	
462,988	277,52	4,1	37879	67,8	1,2	
464,835	279,85	-0,1	30277	84,9	1,5	0,100
612,794	272,86	-6,7	27445	90,1	1,1	0,543
583,313	278,92	-7,5	28291	84,7	1,2	0,645
595,904	269,28	-11,0	34734	77,8	1,6	0,339
512,699	271,44	-2,0	42565	63,8	1,6	0,141
417,506	269,68	6,4	50736	64,5	1,3	
354,634	275,53	14,6	58050	49,5	1,2	
326,996	286,12	19,0	62144	51,2	1,4	
336,569	276,16	23,4	60301	52,1	1,0	
378,607	275,37	18,7	53850	52,0	1,0	
375,138	277,86	12,1	45973	77,3	0,9	
421,108	280,14	6,6	37879	83,2	1,2	
490,492	277,98	0,2	30277	83,6	1,6	0,025
527,271	282,21	-0,1	27445	91,4	1,6	0,207

W, тыс. кВт·ч	V _{произв} , техн. ед.	t, °C	T _{св.дня} , °C;	Cl, %	F _w , м/с	Sn, отн. ед.
526,07	277,83	-6,8	28291	70,8	1,3	0,263
579,639	274,02	-11,5	34734	77,3	1,3	0,417
514,514	274,18	-3,1	42565	66,2	1,6	0,169
410,351	274,51	8,2	50736	72,5	1,3	0,029
304,504	275,00	15,1	58050	57,6	1,3	
325,619	274,00	17,1	62144	63,9	1,1	
368,846	271,94	20,9	60301	59,1	0,8	
372,916	271,24	17,7	53850	66,5	1,2	
371,311	271,00	12,9	45973	69,1	0,9	
439	271,00	6,5	37879	88,7	1,1	0,020
511	271,00	1,6	30277	90,3	1,2	0,083
552	271,00	-8,4	27445	73,3	1,4	0,167

Таблица А.6 – Выборка исходных данных для МЧ Апатиты

W, тыс. кВт·ч	V _{произв} , тыс.т.	t, °C	T _{св.дня} , °C;	Cl, %	F _w , м/с	Sn, отн. ед.
700	921,0	-11,4	8227	70,04	5,69	0,52
580	668,0	-12,2	27131	77,75	4,30	0,26
600	1086,0	-6,6	42211	68,19	4,14	0,22
440	1525,0	1,7	57701	82,61	4,37	0,01
240	1124,0	6,9	77560	78,53	3,88	0,00
220	1240,0	9,1	86400	88,71	4,13	0,00
280	1583,0	15,1	83510	88,39	3,80	0,00
520	1226,0	8,8	63813	86,32	4,22	0,00
60	1172,0	8,0	47821	92,09	3,59	0,00
360	1018,0	2,0	32759	86,76	5,41	0,00
480	918,0	-6,9	15528	79,34	4,43	0,12
620	1020,0	-11,4	1891	70,26	4,81	0,48
600	568,0	-11,3	8227	70,26	4,81	0,33
680	638,6	-16,6	27131	80,60	4,64	0,52
540	1146,1	-3,5	42211	56,98	5,01	0,19
341	1023,6	2,1	57701	68,23	6,25	0,00
220	827,0	5,7	77560	81,96	3,99	0,00
220	1164,0	11,3	86400	88,03	3,96	0,00
160	374,0	14,1	83510	81,29	4,39	0,00
260	233,0	11,0	63813	84,33	3,79	0,00
160	415,0	9,4	47821	63,42	3,00	0,00
160	511,0	4,2	32759	79,05	3,78	0,00
340	441,0	-1,0	15528	86,28	4,56	0,07
600	681,0	-2,1	1891	83,64	5,37	0,03
640	281,0	-9,4	8227	67,02	3,97	0,15
340	438,0	-11,0	27131	63,57	6,03	0,25
500	522,0	-3,5	42211	69,36	4,76	0,08
140	290,0	-0,3	57701	77,30	3,68	0,01
180	586,0	6,3	77560	75,59	4,73	0,00
160	609,0	9,7	86400	80,30	4,56	0,00
80	346,0	12,3	83510	83,11	4,30	0,00
100	420,0	10,2	63813	72,23	2,95	0,00
60	191,0	7,9	47821	80,78	3,97	0,00

Приложение Б

Распоряжение о вводе в действие «Порядка формирования заданий филиалам
ОАО «РЖД» по экономии топливно-энергетических ресурсов на нетяговые
нужды»



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ»
(ОАО «РЖД»)

РАСПОРЯЖЕНИЕ

		г. Москва	№ _____
--	--	-----------	---------

**Об утверждении Порядка формирования заданий филиалам ОАО «РЖД»
по экономии топливно-энергетических ресурсов на нетяговые нужды**

В целях совершенствования системы планирования расхода топливно-энергетических ресурсов:

1. Утвердить прилагаемый Порядок формирования заданий филиалам ОАО «РЖД» по экономии топливно-энергетических ресурсов на нетяговые нужды (далее – Порядок).

2. Начальникам департаментов экономики Гапонько В.В., технической политики Андрееву В.Е. и руководителям филиалов обеспечить:

а) доведение Порядка до причастных структурных подразделений;

б) расчет заданий филиалам ОАО «РЖД» по экономии топливно-энергетических ресурсов на нетяговые нужды в соответствии с Порядком, начиная с формирования бюджетов филиалов на 2020 год.

3. Контроль за исполнением настоящего распоряжения возложить на начальника Департамента экономики Гапонько В.В.

Заместитель генерального директора –
главный инженер ОАО «РЖД»

С.А.Кобзев

Исп. Фролов В.Н., ЦЭУ
(499) 262-25-22

Электронная подпись. Подписал: Кобзев С.А.
№2754/р от 24.12.2018

Приложение В

Распоряжение о вводе в действие «Методики планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды с использованием искусственных нейронных сетей»



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ»
(ОАО «РЖД»)

РАСПОРЯЖЕНИЕ

« 6 » декабря 2011 г.

Москва

№ 2626р

Об утверждении Методики планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды с использованием искусственных нейронных сетей

В целях совершенствования системы планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды в филиалах ОАО «РЖД» и их структурных подразделениях:

1. Утвердить и ввести в действие с 1 января 2012 г. Методику планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды с использованием искусственных нейронных сетей (далее – Методика).

2. Начальнику Управления планирования и нормирования материально-технических ресурсов Звереву А. В. обеспечить рассылку электронного приложения к Методике филиалам ОАО «РЖД».

3. Руководителям филиалов ОАО «РЖД» довести до сведения структурных подразделений Методику, обеспечить рассылку электронного приложения к Методике структурным подразделениям и обеспечить планирование расхода электрической энергии на нетяговые нужды в соответствии с Методикой.

4. Контроль за исполнением настоящего распоряжения возложить на начальника Управления планирования и нормирования материально-технических ресурсов Зверева А. В.

Старший вице-президент
ОАО «РЖД»



В. А. Гапанович

Приложение Г

Акт об использовании результатов научных исследований и разработок в производстве

Дорожный топливно-энергетический центр
Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД»

АКТ

от «26» _____ марта _____ 2020 г.

УТВЕРЖДАЮ

г. Новосибирск

Начальник Дорожного топливно-энергетического центра
Западно-Сибирской железной
дороги – филиала ОАО «РЖД»

Об использовании
результатов научных исследований
и разработок в производстве

 А. Г. Звягинцев

«26» _____ марта _____ 2020 г.

Основание: Разработки Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС) в области организации ресурсосберегающих производственных систем железнодорожного транспорта, выполненные под руководством и (или) при личном участии к.т.н., доцента Комякова А. А.:

1. Методика анализа и планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды с использованием искусственных нейронных сетей.

2. Методика оценки эффективности организационных, технических и технологических решений, используемых при организации ресурсосберегающих производственных систем железнодорожного транспорта. Экспертное заключение о целесообразности применения энергосберегающих систем FORCE на объектах Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

Разработки выполнены в соответствии с договорами между ОмГУПСом и ОАО «РЖД» №195/11/681 от 29.06.2011 г., №275/13/1278 от 26.12.2013 г.

Составлен комиссией в составе:

Представитель НТЭЦ Западно-Сибирской железной дороги:

начальник отдела М. В. Рябушкин

Представители ОмГУПСа:

д.т.н., профессор В. Т. Черемисин

к.т.н., доцент А. А. Комяков

1. Разработки ОмГУПСа, характеризующиеся основными особенностями (признаками):

1.1. Разработана методика анализа и планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды с использованием искусственных нейронных сетей, которая предназначена для определения лимитов потребления электроэнергии в производственных процессах структурных подразделений ОАО «РЖД».

1.2. Разработана методика оценки эффективности организационных, технических и технологических решений, используемых при организации ресурсосберегающих производственных систем железнодорожного транспорта, которая использована при расчете технико-экономического эффекта от внедрения энергосберегающей системы FORCE в производственных процессах Западно-Сибирской железной дороги. В результате применения методики подготовлено экспертное заключение о дальнейшей нецелесообразности применения FORCE в ресурсосберегающих производственных системах на железнодорожном транспорте.

2. Технико-экономическая или иная эффективность:

2.1. Применение разработанной методики планирования расхода электрической энергии на нетяговые нужды с использованием искусственных нейронных сетей позволяет повысить точность определения расхода электроэнергии в производственных процессах

2.2. Разработанные ОмГУПСом методы оценки энергоэффективности внедряемых организационных, технических и технологических решений позволили оценить их фактический вклад в снижение расхода ТЭР и сформулировать предложения о целесообразности их дальнейшего внедрения при организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте.

3. Предложения о дальнейшем использовании и другие замечания:

Рекомендовать использование разработанных ОмГУПСом решений при организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте.

Составлен в четырех экземплярах:

1-й экземпляр – ОмГУПС, НИЧ;

2-й экземпляр – НТЭЦ ЗСЖД;

3-й, 4-й экземпляр – ОмГУПС, разработчику.

Приложение Д

Акт об использовании результатов научных исследований и разработок в производстве

Департамент технической политики ОАО «РЖД»

АКТ

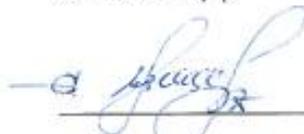
от «16» марта 2020 г.

УТВЕРЖДАЮ

г. Москва

Зам. начальника Департамента
технической политики
ОАО «РЖД»

Об использовании
результатов научных исследований
и разработок в производстве

 Б. И. Иванов
«16» марта 2020 г.

Комиссия в составе главного специалиста Департамента технической политики ОАО «РЖД» В. В. Кошлакова, д.т.н., профессора, директора НИИЭ Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС) В. Т. Черемисина, к.т.н., доцента ОмГУПС А. А. Комякова, к.т.н., заместителя директора НИИЭ ОмГУПС М. М. Никифорова под председательством заместителя начальника Департамента технической политики ОАО «РЖД» Б. И. Иванова составила настоящий акт о том, что научно-методологические разработки ОмГУПС в области организации ресурсосберегающих производственных систем железнодорожного транспорта, выполненные в рамках договоров между ОмГУПСом и ОАО «РЖД» №365/16 от 06.10.2016 г. «Актуализация Энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года», №2900006 от 27.04.2018 г. «Разработка Порядка формирования заданий филиалам ОАО «РЖД» по экономии топливно-энергетических ресурсов на нетяговые нужды», №417/18 от 21.06.2018 г. «Разработка унифицированной методики по расчету экономии топливно-энергетических ресурсов от реализации мероприятий программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности структурных подразделений ОАО «РЖД» при личном участии В. Т. Черемисина, А. А. Комякова, М. М. Никифорова, используются в производственной деятельности ОАО «РЖД».

Краткое описание научно-методологических решений.

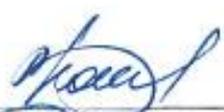
Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 г. №2537р, разработана с целью

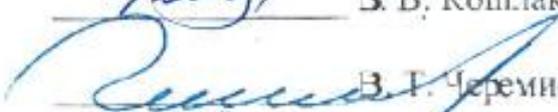
повышения технологического уровня бизнес-блоков холдинга «РЖД» для максимально рационального использования энергетических ресурсов, дальнейшей минимизации негативного воздействия железнодорожного транспорта на окружающую среду и поддержания лидерских позиций холдинга в области энергоэффективности железнодорожных пассажирских и грузовых перевозок среди транспортных компаний мира и является одним из основных стратегических документов ОАО «РЖД» в области энерго- и ресурсосбережения.

Порядок формирования заданий филиалам ОАО «РЖД» по экономии топливно-энергетических ресурсов на нетяговые нужды, утвержденный распоряжением ОАО «РЖД» от 24.12.2018 г. №2754р, применяется при формировании бюджетов филиалов ОАО «РЖД» с 2020 г.

Унифицированная методика по расчету экономии топливно-энергетических ресурсов от реализации мероприятий программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности структурных подразделений ОАО «РЖД», утвержденная распоряжением от 28.06.2019 г. № ЦТех-45, используется для расчета энергетической эффективности мероприятий, внедренных в структурных подразделениях филиалов ОАО «РЖД», и при подготовке отчетов в АИС «Энергоэффективность».

Члены комиссии:


_____ В. В. Кошляков


_____ В. Г. Черемисин


_____ А. А. Комяков


_____ М. М. Никифоров

Приложение Е

Распоряжение о вводе в действие «Унифицированной методики по расчету экономии топливно-энергетических ресурсов от реализации мероприятий программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности структурных подразделений ОАО «РЖД»

**УНИФИЦИРОВАННАЯ МЕТОДИКА
по расчету экономии топливно-энергетических ресурсов
от реализации мероприятий программ энергосбережения и
повышения энергетической эффективности структурных
подразделений ОАО «РЖД»**

І. Общие положения

1. Настоящая Методика предназначена для оценки (расчета) энергетической эффективности мероприятий, внедренных в структурных подразделениях филиалов ОАО «РЖД» (далее – структурные подразделения) по программам энергосбережения и повышения энергетической эффективности (далее – мероприятия), по перечню согласно оглавлению, и используется, в том числе, при подготовке отчетов в АИС «Энергоэффективность».

2. Принципы методологического подхода при оценке энергетической эффективности указанных мероприятий основаны на сравнении фактического расхода топливно-энергетических ресурсов (далее – ТЭР) за отчетный период – после внедрения энергосберегающего мероприятия, и расчетного их расхода, приведенного к условиям к условиям отчетного периода, до внедрения энергосберегающего мероприятия (например, за базовый период), с использованием теоретических положений и известных математических зависимостей по определению расхода ТЭР на тягу поездов и другие (нетяговые) нужды или же с использованием подтвержденных экспертных данных об энергоэффективности внедряемого технического средства или технологии.

Изменение расхода ТЭР от внедрения энергосберегающего мероприятия определяется как разница между их расходом до его внедрения, приведенным к условиям отчетного периода, и их расходом за отчетный период – после внедрения такого мероприятия. При положительном значении такой разницы считается, что достигнута экономия, при отрицательном значении (росте

Приложение Ж

Акт об использовании результатов научных исследований и разработок в
производстве

Свердловская дирекция инфраструктуры – структурное подразделение
Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД»
(полное название предприятия и его почтовый адрес)

620013, Россия, г. Екатеринбург, Челюскинцев, д. 11

город Екатеринбург

«25» января 2016 г.

А К Т

об использовании результатов научных исследований
и разработок в производстве

Основание: разработка Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), отчет (авторское свидетельство) № ХД-275/13/1278.

Выполнение работ по теме: Сравнительный анализ эффективности внедрения
(название отчета (авторского свидетельства))
инновационных систем экономии электроэнергии на объектах ОАО «РЖД»

Договор № ХД-275/13/1278 от 26 декабря 2013 г.

Стоимость 4 288,19 тыс. руб.

Составлен комиссией в составе:

Представители предприятия Главный инженер службы электрификации и
(должность, фамилия, инициалы)
электроснабжения Свердловской дирекции инфраструктуры – структурного
подразделения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД»
Вербицкий В. А., начальник дорожной электротехнической лаборатории службы
электрификации и электроснабжения Свердловской железной дороги
Пятецкий И. А.

Представители ОмГУПС профессор Черемисин В.Т., нач. НПЛ «ЭТ и ЭМС»
(должность, фамилия, инициалы)

Никифоров М.М., доцент Комяков А.А., инженер-проектировщик НИЧ Эрбес В.В.

В соответствии с договором ОАО «РЖД» № 275/13/1278 от 26 декабря 2013 г.
(указать вид и номер документа, на основании которого проводилось внедрение)

1. Разработка (авторское свидетельство) ОмГУПС, характеризующая основными особенностями (признаками) Разработана методика по формированию рекомендаций выбора места
(перечень принятых к исполнению рекомендаций)
установки и повышению эффективности эксплуатации энергосберегающих
устройств и технологий в системах тягового и нетягового электроснабжения

принята к использованию и с 30 декабря 2013 года внедрена в структурных
подразделениях Свердловской дирекции инфраструктуры.
(название предприятия)

2. Техничко-экономическая или иная эффективность Внедрение методики позволяет достоверно рассчитывать значение экономии электрической энергии и оценивать (объемы внедрения (измеритель) количество эффективность внедрения инновационных систем экономии электроэнергии. и результаты, полученные от использования рекомендаций)

3. Предложения по дальнейшему использованию и другие замечания Распространить использование разработанной методики для оценки технико-экономической эффективности инновационных систем в структурных подразделениях ОАО «РЖД» на сети железных дорог.

Составлен в 5 экземплярах.



В. А. Вербицкий

Члены комиссии:

 И. А. Пятецкий

 В. Т. Черемисин

 М. М. Никифоров

 А. А. Комяков

 В. В. Эрбес

Приложение 3

Акт об использовании результатов научных исследований и разработок в
производстве

Западно-Сибирская дирекция инфраструктуры – структурное подразделение
Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД»
(полное название предприятия и его почтовый адрес)

630004, Россия, г. Новосибирск, Вокзальная магистраль, д. 12

город Новосибирск

«15» апреля 2015 г.

А К Т

об использовании результатов научных исследований
и разработок в производстве

Основание: разработка Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), отчет (авторское свидетельство) № ХД-275/13/1278.

Выполнение работ по теме: Сравнительный анализ эффективности внедрения
(название отчета (авторского свидетельства))
инновационных систем экономии электроэнергии на объектах ОАО «РЖД»

Договор № ХД-275/13/1278 от 26 декабря 2013 г.

Стоимость 4 288,19 тыс. руб.

Составлен комиссией в составе:

Представители предприятия Начальник службы электрификации и электроснабжения
(должность, фамилия, инициалы)
Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры – структурного подразделения
Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД»
Дербилов Е. М., электромеханик ДЭЛ Кващук В. А.

Представители ОмГУПС профессор Черемисин В.Т., нач. НПЛ «ЭТ и ЭМС»
(должность, фамилия, инициалы)
Никифоров М.М., доцент Комяков А.А., инженер-проектировщик НИЧ Эрбес В.В.

В соответствии с договором ОАО «РЖД» № 275/13/1278 от 26 декабря 2013 г.
(указать вид и номер документа, на основании которого проводилось внедрение)

1. Разработка (авторское свидетельство) ОмГУПС, характеризующая основными особенностями (признаками) Разработана методика по формированию рекомендаций выбора места
(перечень принятых к исполнению рекомендаций)
установки и повышению эффективности эксплуатации энергосберегающих
устройств и технологий в системах тягового и нетягового электроснабжения
принята к использованию и с 30 декабря 2013 года внедрена в структурных
подразделениях Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры.
(название предприятия)

2. Техничко-экономическая или иная эффективность внедрение Методики позволяет
(объемы внедрения (измеритель) количество
достоверно рассчитать величину экономии электрической энергии и оценить
и результаты, полученные от использования рекомендаций)
эффективность внедрения инновационных систем экономии электроэнергии.

3. Предложения по дальнейшему использованию и другие замечания Распространить
использование разработанной методики для оценки технико-экономической эф-
фективности инновационных систем в структурных подразделениях ОАО «РЖД»
на сеть железных дорог.

Составлен в 5 экземплярах.

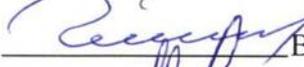


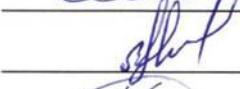
Председатель комиссии

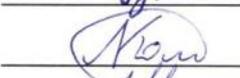
Е. М. Дербилов

Члены комиссии:


 В. А. Кващук


 В. Т. Черемисин


 М. М. Никифоров


 А. А. Комяков


 В. В. Эрбес

Приложение И

Акт об использовании результатов научных исследований и разработок в
производстве

ООО «СТМ-Сервис»

АКТ

от «10» апреля 2018 г

«УТВЕРЖДАЮ»

г. Омск

И.о. главного инженера
сервисного локомотивного депо
«Московка»Об использовании
результатов научных исследований
и разработок в производстве

С.В. Сухецкий

«...» _____ 2018 г.

Основание: Разработки Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), выполненные под руководством д.т.н., профессора Черемисина В.Т., к.т.н., доцента Комякова А.А., к.т.н., с.н.с. Эрбеса В.В. при личном участии аспиранта Иванченко В.И.

Методика определения эффективного расхода электрической энергии нетяговых железнодорожных потребителей на основе метода опорных векторов.

Технология мониторинга и регулирования электропотребления нетяговых железнодорожных потребителей.

Составлен комиссией в составе:

Представитель ООО «СТМ-Сервис»:

О.Г. Кондратьева.

Представители ОмГУПС:

д.т.н., профессор Черемисин В.Т.;

к.т.н., доцент Комяков А.А.;

к.т.н., с.н.с. Эрбес В.В.;

аспирант Иванченко В.И.

