


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО УрГУПС)

На правах рукописи



Тюшев Игорь Андреевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ**

Специальность 2.9.3 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Буйносов Александр Петрович

Екатеринбург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СИСТЕМА ОБСЛУЖИВАНИЯ, РЕМОНТА И МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛОКОМОТИВОВ.....	10
1.1 Обзор существующих методов оценки технического состояния оборудования современных локомотивов.....	10
1.2 Система технического обслуживания локомотивного комплекса.....	15
1.3 Анализ ситуации неплановых ремонтов электровозов 2ЭС6.....	21
1.4 Мониторинг технического состояния электровозов 2ЭС6.....	25
1.5 Выводы по главе 1.....	30
2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕГИСТРАЦИИ ДОСТОВЕРНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СООБЩЕНИЙ ПО ОБОРУДОВАНИЮ ЭЛЕКТРОВОЗА 2ЭС6.....	31
2.1 Анализ ситуации регистрации диагностических сообщений.....	31
2.2 Определение достоверности диагностических сообщений.....	37
2.3 Статистическая обработка диагностических сообщений.....	41
2.4 Модель прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений по оборудованию.....	47
2.5 Эффективность и результаты процесса прогнозирования.....	49
2.6 Выводы по главе 2.....	51
3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.....	52
3.1 Определение критериев в диагностических данных тяговых электродвигателей.....	52
3.2 Построение модели определения технического состояния тяговых электродвигателей.....	57
3.3 Результаты моделирования процесса определения технического состояния тяговых электродвигателей.....	60

3.4 Выводы по главе 3	63
4 СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЛИМИТИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОВОЗА ПО ДАННЫМ ИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ	64
4.1 Предпосылки к разработке способа и написанию программного обеспечения.....	64
4.2 Математическая основа программного обеспечения и возможности ее развития.....	68
4.3 Выводы по главе 4.....	71
5 ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ	72
5.1 Выбор предприятия-разработчика.....	72
5.2 Технологический эффект и этапы внедрения.....	75
5.3 Оценка экономической эффективности	78
5.4 Выводы по главе 5	82
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	83
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	86
ПРИЛОЖЕНИЕ А	108
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	111
ПРИЛОЖЕНИЕ В	113
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	117

ВВЕДЕНИЕ

Стратегия цифровой трансформации ОАО «РЖД» до 2025 года предусматривает снижение количества unplanned ремонтов за счет оперативного анализа технического состояния электровоза. Проект учитывает точное понимание текущего состояния узлов локомотивов за счет дистанционной и автоматизированной диагностики [1]. Грузовой локомотивный парк ОАО «РЖД» обновляется современными электровозами 2ЭС6, 3ЭС6 [2–4]. Установленные измерительные датчики комплексно связаны между собой в единую бортовую систему диагностики с возможностью передачи диагностической информации [4].

Увеличение грузооборота и производительности электровоза в эксплуатации требует особого подхода в зоне мониторинга его технического состояния. Бортовая диагностика грузовых электровозов 2ЭС6 показывает, что сохраняющаяся ситуация развития неисправностей оборудования, приводит к возникновению отказов технических средств и, как следствие, постановке электровоза на unplanned вид ремонта. В зоне повышенного внимания ученых и специалистов находятся тяговые электродвигатели [5, 6]. Совокупность регистрируемых диагностических сигналов по данному узлу позволяет комплексно оценить техническое состояние, но из-за расширенного электровозного парка 2ЭС6 индивидуальный анализ каждого электровоза затруднителен. Действующая система информирования по прогнозируемому результату работоспособности оборудования не дает детального анализа по некоторым отклонениям в диагностических данных.

Точное прогнозирование технического состояния на основе полученной диагностической информации требует предварительной обработки и анализа информации; это должен делать опытный специалист, обладающий определенными навыками, умением работать с колоссальным объемом информации в условиях многозадачности.

Существующие комплексные методы оценки технического состояния оборудования по электровозам, оснащенным бортовыми средствами диагностики, не обеспечивают точного прогнозирования состояния оборудования по электровозам серии 2ЭС6.

Актуальность темы исследования. Вектор развития предиктивной диагностики оборудования современных электровозов нашел свое отражение в нормативных документах ОАО «РЖД» [1, 7–9]. Развитие предиктивной диагностики может быть обеспечено использованием инструментов прогнозной аналитики. Развитие первых средств диагностики на электровозах серии ВЛ80р в 1974 г. позволило заложить базу в развитие микропроцессорных систем управления и диагностики, что в целом привело к тиражированию таких проектов, как «Умный локомотив», «Цифровое депо» [10–18].

С обновлением и расширением локомотивного парка ОАО «РЖД» увеличивается количество отказов технических средств, неплановых ремонтов по оборудованию локомотивов [19]. Оперативное принятие решений управленческим персоналом обслуживающих предприятий позволяет минимизировать сложившуюся ситуацию. Принятие решений зависит от качественного предоставления информации о состоянии оборудования и электровоза в целом. Технологическим группам в колоссальном объеме диагностической информации сосредоточиться именно на такой информации, которая обладает ценностью и достоверностью. Исследования, направленные на совершенствование методов оценки технического состояния оборудования современных электровозов, являются актуальной задачей, требующей детальной проработки вопроса.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в развитие направления бортовых средств диагностики оборудования и использования их диагностической информации в системе технического обслуживания и ремонта внесли А.П. Буйносов, В.А. Гапанович, А.Н. Головащ, А.Т. Головатый, В.В. Грачёв, Ю.А. Давыдов, В.И. Киселев, А.С. Космодамианский, И.К. Лакин, А.Т. Осяев, А.В. Плакс, А.А. Рауба, А.П. Семенов, В.В. Семченко,

В.П. Феокистов, В.А. Четвергов, Н.Г. Шабалин, С.Г. Шантаренко, E. Hedlund, J. Womak и др.

В трудах А.А. Аболмасова, И.И. Лакина, В.А. Мельникова, М.В. Федотова, И.Ю. Хромова, И.В. Шестакова рассматривались методы определения технического состояния и системы мониторинга и предупреждения предотказных состояний оборудования в рамках концепции сервисного обслуживания локомотивов, оборудованных микропроцессорной системой управления.

Объект исследования. Электроподвижной состав, грузовые электровозы.

Предмет исследования. Автоматизация процессов технической диагностики и мониторинга технического состояния оборудования современных электровозов.

Цель диссертационной работы. Совершенствование методов оценки технического состояния оборудования современных электровозов посредством определения достоверной информации из объема диагностических данных.

В диссертации поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Исследованы результаты обработки диагностических сообщений, на основании которых разработана модель прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений по оборудованию электровоза.

2. Определены критерии в диагностических данных по работе оборудования в зоне потенциального возникновения неисправности и разработана модель определения технического состояния на примере работы тяговых электродвигателей в такой зоне.

3. Обоснован способ определения остаточного ресурса таких лимитирующих компонентов электровоза, как электрографитовые щетки тяговых электродвигателей, колесные пары и ползз токоприемника по данным их геометрических замеров.

Методология и методы исследования. При разработке темы диссертации использовались теория регрессионного анализа и теория вероятности. Достоверность каждого диагностического сообщения оценивалась в среде Microsoft Excel. Моделирование процессов прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений и определения технического состояния тяговых электродвигателей проведено с использованием платформы интеллектуального анализа Knime. Способ определения остаточного ресурса лимитирующих компонентов электровоза реализован в виде программного обеспечения, написанного на языке программирования Python.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- разработана модель прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений по оборудованию современного электровоза с использованием аппроксимирующих функций теории регрессионного анализа;
- разработана модель определения технического состояния тяговых электродвигателей с использованием таких критериев в диагностических данных, как разница тока якоря между смежными группами тяговых электродвигателей, разница корреляционной связи между диагностическими сигналами при переходе их работы в потенциальную зону возникновения неисправности;
- обоснован способ определения остаточного ресурса – оставшегося пробега до замены лимитирующих компонентов электровоза (электрографитовые щетки тяговых электродвигателей, колесные пары, ползз токоприемника).

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Определенный уровень достоверности каждого диагностического сообщения позволяет с использованием аппроксимирующих функций теории регрессионного анализа спрогнозировать достоверные диагностические сообщения по оборудованию современного электровоза (регистрация).
2. Определен уровень разницы токов якорей между смежными группами тяговых электродвигателей на уровне ± 150 А; это позволяет установить

исправное/неисправное техническое состояние тяговых электродвигателей; параметры корреляционной связи между парами диагностических сигналов позволяют конкретизировать причину возникновения электрической неисправности тягового электродвигателя.

3. Способ определения остаточного ресурса – оставшегося пробега до замены лимитирующих компонентов электровоза (электрографитовых щеток тяговых электродвигателей, колесные пары, полоза токоприемника) – позволяет исключить выдачу электровоза в эксплуатируемый парк с недостаточным ресурсом по механическому износу.

Положения, выносимые на защиту

1. Модель прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений, позволяющая оперативно рассматривать развитие потенциальных неисправностей по оборудованию современного электровоза с использованием аппроксимирующих функций теории регрессионного анализа.

2. Модель определения технического состояния тяговых электродвигателей с использованием критериев в диагностических данных, направленная на выявление их работы в потенциальной зоне развития неисправности.

3. Способ определения остаточного ресурса лимитирующих компонентов электровоза, реализованный в виде программного обеспечения с использованием геометрических замеров по таким элементам, направленный на определение оставшегося пробега до замены.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационного исследования по прогнозированию регистрации достоверных диагностических сообщений и определению технического состояния тяговых электродвигателей внедрены в производственный процесс ООО «СТМ-Сервис» и ОАО «РЖД». Теоретические результаты работы используются в учебном процессе ФГБОУ ВО УрГУПС по дисциплине «Производство и ремонт подвижного состава».

Степень достоверности результатов. Обеспечена корректностью формулировок поставленных задач, надежностью примененных теоретиче-

ских методов и специализированных программных пакетов, подтверждается сопоставлением результатов, полученных компьютерным моделированием, с данными практической достоверности диагностических сообщений. Объем обработанной статистической информации – 3,5 млн ед., по результатам которых расхождение экспериментальных расчетов с теоретическими находится в пределах 10 %, что указывает на адекватность построенных компьютерных моделей и достоверность результатов моделирования.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования доложены и обсуждены на Всероссийской научно-технической конференции «Транспорт Урала-2020» (Екатеринбург, 2020), Международной научно-практической конференции «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава» (Ростов-на-Дону, 2020, 2022), VI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов» (Омск, 2021), Международной научно-практической конференции «Наука и образование – транспорту» (Самара, 2021, 2022), Международной научно-практической конференции «Железнодорожный транспорт и технологии» (Екатеринбург, 2022).

Результаты диссертационной работы в полном объеме заслушаны и одобрены на расширенном заседании кафедры «Электрическая тяга», УрГУПС (Екатеринбург, 2023).

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 11 печатных работ, в том числе свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Четыре научные статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, одна – во входящем в перечень изданий, индексируемых в международной базе цитирования Scopus.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 190 наименований. Текст диссертации содержит 119 страниц, четыре таблицы, 40 рисунков, пять приложений.

1 СИСТЕМА ОБСЛУЖИВАНИЯ, РЕМОНТА И МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛОКОМОТИВОВ

1.1 Обзор существующих методов оценки технического состояния оборудования современных локомотивов

Исследования в области мониторинга технического состояния оборудования локомотивов проводились научными коллективами ВНИИЖТ, ВНИКТИ, ВЭЛНИИ, НИИТКД, ООО «НПО САУТ», АО НИИАС, ООО ПК НЭВЗ, ПКБ ЦТ ОАО «РЖД», ДЦВ Красноярской железной дороги, вузами РУТ, ОмГУПС, ИрГУПС, РГУПС, СамГУПС, ПГУПС, а также компаниями Siemens, General Electric, Alstom, Bombardier.

Значительный вклад в развитие направления бортовых средств диагностики оборудования и использования их диагностической информации в системе технического обслуживания и ремонта (ТОиР) внесли А.П. Буйносов [20–22], В.А. Гапанович [23, 24], А.Н. Головаш [25, 26], А.Т. Головатый [27, 28], В.В. Грачёв [29, 30], Ю.А. Давыдов [31, 32], В.И. Киселев [33], А.С. Космодамианский [34–36], И.К. Лакин [37–41], А.Т. Осяев [42–44], А.В. Плакс [45, 46], А.А. Рауба [47], А.П. Семенов [48–51], В.В. Семченко [52, 53], В.П. Феокистов [54, 55], В.А. Четвергов [56], Н.Г. Шабалин [57, 58], С.Г. Шантаренко [59–61], E. Hedlund [62], J. Womak [63] и др.

В трудах А.А. Аболмасова [64], И.И. Лакина [65], В.А. Мельникова [66], И.В. Пустового [67], М.В. Федотова [68–70], И. Ю. Хромова [71], И.В. Шестакова [72] рассматривались пути развития мониторинга технического состояния оборудования локомотивов с учетом применения диагностической информации от микропроцессорных систем управления (МСУ) в рамках концепции сервисного обслуживания.

В работе И.И. Лакина [65] доказано наличие корреляционной зависимости между параметрами однотипного оборудования по диагностическим

данным МСУ, по которым можно определять предотказное состояние. Отмечена высокая информативность некоторых диагностических данных, с помощью которых можно дать оценку техническому состоянию оборудованию и соблюдению правил и режимов эксплуатации оборудования. Предложена комплексная система мониторинга технического состояния оборудования.

В.А. Мельников [66] рассматривал диагностическую информацию, полученную от МСУ тепловозов 2ТЭ116. Им предложены способы и методы автоматизированного диагностирования однотипного оборудования при помощи корреляционного анализа. Так, отмечаются границы изменения коэффициента корреляции по диагностическим данным токов якорей тяговых электродвигателей (ТЭД), по которым определяется их техническое состояние и возможные причины неисправностей. Разработанные методы реализованы через программное обеспечение АРМ «Осцилограф-3» и «Умный локомотив» в виде алгоритмов и математических моделей. Ученые также предлагают реализацию разработанных методов алгоритмической защиты для предотвращения как нарушений режимов эксплуатации, так и возникновения предотказных состояний.

С учетом применения диагностической информации, ее анализа, обработки и применения в современной системе ТОиР весомые подходы предложены в трудах А.А. Аболмасова [64] и И.В. Пустового [67] в концепции сервисного обслуживания. В работе А.А. Аболмасова предлагается модель управления техническим состоянием локомотивов в виде трехконтурной системы управления инцидентами и методов «Встроенное качество». Предложен метод автоматизированного диагностирования предотказных состояний узлов грузовых тепловозов.

В изысканиях М.В. Федотова [68] предложены инструменты предиктивной аналитики. Так, рассматриваются нейросетевые решения при анализе диагностических данных, полученных от МСУ тепловозов ТЭП70БС. Предложен метод статистической классификации состояния оборудования по данным диагностической информации. Разработаны методы определения и

прогнозирования технического состояния оборудования. Доказано преимущество интеллектуального анализа данных при оценке технического состояния оборудования современных локомотивов.

Проведенный анализ зарубежного опыта также подтверждает широкое распространение систем мониторинга технического состояния подвижного состава в мировых странах. Компания General Electric (США) создала комплексную систему удаленного мониторинга и диагностики локомотивов Expert-On-Alert [73]. Система обеспечивает сбор диагностической информации и передачу в режиме реального времени в Центр мониторинга. Интеллектуальная система Expert-On-Alert прогнозирует возможные неисправности в эксплуатации, идентифицирует потенциальные проблемы, дает соответствующие рекомендации и уточняет потребность в ремонте и техническом состоянии. General Electric позиционирует свою систему мониторинга как высокоэффективную, благодаря этому повторные ремонты сокращаются на 50 %, время поиска неисправности – на 25 %, время непроизводительного простоя – на 23 % [74]. Аналогичный фирменный центр поддержки Siemens Rail Support Center по удаленному контролю подвижного состава в эксплуатации открыт компанией Siemens в Мюнхене (ФРГ) [75].

Электропоезда серии ICE-T и ICE-3 железных дорог ФРГ оборудованы комплексной системой SIBAS (система железнодорожной автоматизации Siemens) [76]. Собственная разработка компании Siemens AG в результате совместной работы по развитию с компанией Bombardier в составе Международного союза железных дорог (UIC) изменилась на поездную коммуникационную сеть TCN (Train Communication Network) (рисунок 1.1) [77].

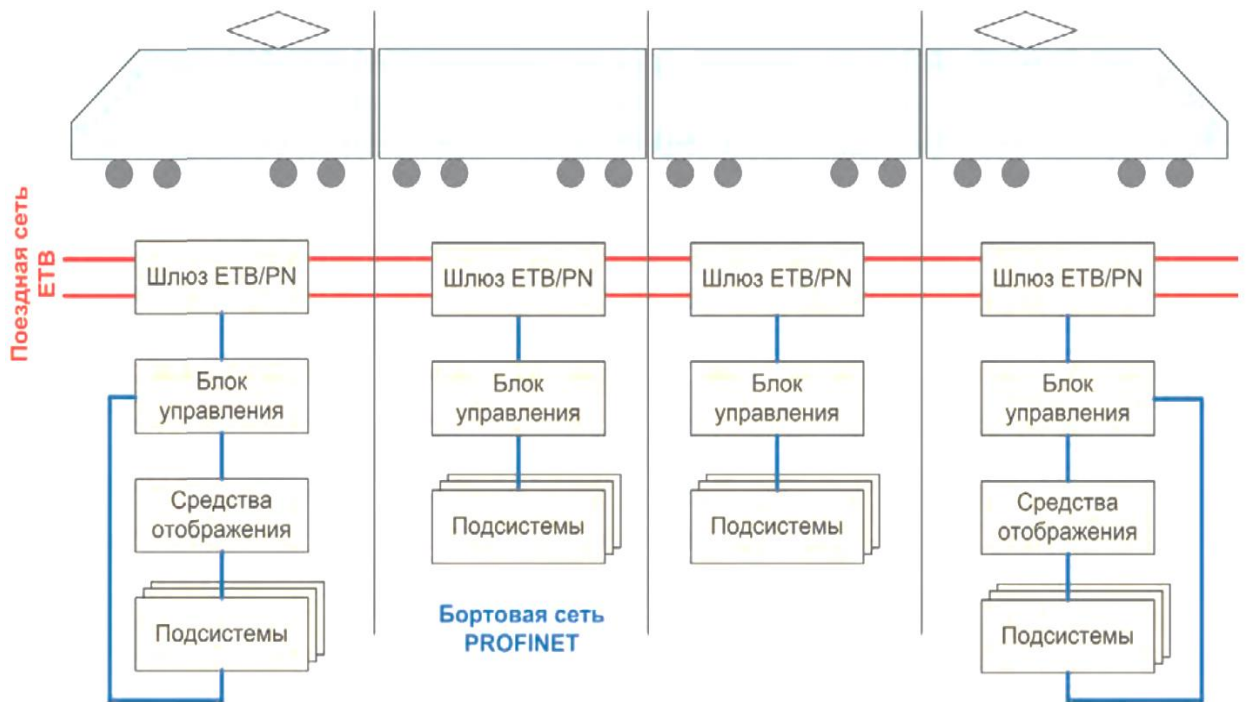


Рисунок 1.1 – Поездная коммуникационная сеть TCN

В составе системы присутствуют модули распределенного ввода/вывода, регистрирующие и поступающие от разного оборудования сигналы. На выходе блока диагностики локомотивная бригада информируется о состоянии узлов, агрегатов и случившихся отказах, также информация передается по радио в пункт технического осмотра и ремонта [77, 78].

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что в общей системе мониторинга технического состояния оборудования локомотивов как в ОАО «РЖД», так и в зарубежных компаниях прослеживается аналогичная структура (рисунок 1.2).

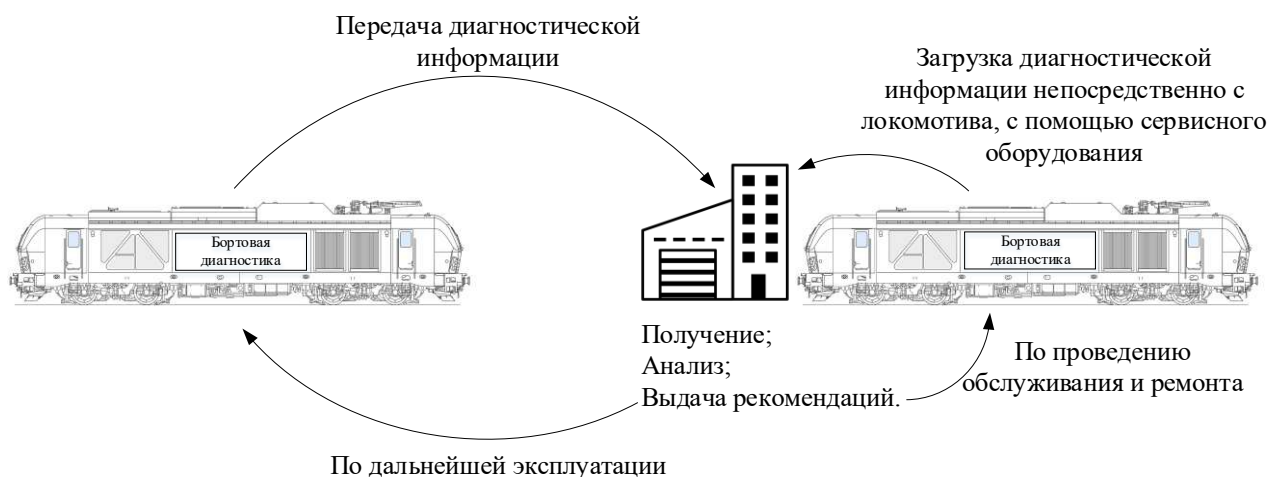


Рисунок 1.2 – Общая структура системы мониторинга

Локомотивы оборудованы измерительными средствами диагностики, контролирующими параметры работоспособности основных узлов (рисунок 1.2). Диагностическая информация накапливается и передается с помощью систем передачи данных, аккумулируется на самом локомотиве с последующей возможностью считывания и загрузки на персональный компьютер. Специалисты получают диагностическую информацию, анализируют и обрабатывают ее и выдают оперативные решения и рекомендации по текущей эксплуатации локомотивным бригадам либо по проведению ремонта и обслуживанию оборудования [79]. Главные отличия таких систем зависят от развития технического прогресса, спроса на услуги, разновидности локомотивов по типу движения.

Отечественные методы, концепции и системы имеют высокий уровень развития технической диагностики оборудования в целом и не уступают зарубежным аналогам. Основное направление исследований связано с предиктивной диагностикой оборудования тепловозов. Все это способствует достижению двух целей: повышение надежности локомотивного парка и сокращение расходов на его техническое обслуживание и текущий ремонт [80].

1.2 Система технического обслуживания локомотивного комплекса

Структурообразующим фактором экономического развития России в области транспортно-логистических услуг является железнодорожный транспорт, которому принадлежит практически половина грузооборота страны [81]. Аппарат управления данного вида движения – ОАО «РЖД», вертикально интегрированная компания транспортного комплекса России [82]. Для поддержания и увеличения высоких показателей работы железнодорожного транспорта (безопасность движения, бесперебойность графика движения поездов, рост объема перевозок, повышение надежности и эффективности комплекса тяги) организация управления перевозочных процессов и научно-техническая система ОАО «РЖД» реформируется для совершенствования технических средств инфраструктуры, подвижного состава и локомотивного комплекса в целом [83–85]. Коэффициент технической готовности (КТГ) локомотивного парка грузовых современных электровозов и эффективность их системы ТОиР обеспечивают выполнение этих факторов [86]. Поэтому для выполнения показателей результативности ОАО «РЖД» утверждались и принимались к исполнению различные постановления и стратегии [1, 7–9].

Одно из стратегических направлений – переход на полное сервисное обслуживание локомотивного парка ОАО «РЖД» [87–90]. В 2014 г. ОАО «РЖД» по договорам между компаниями ООО «СТМ-Сервис» и ООО «ЛокоТех-Сервис» (ТМХ-Сервис») произведен переход на сервисное обслуживание локомотивного парка отрасли [90, 91]. Доход сервисных компаний напрямую зависит от наработанного пробега магистральных локомотивов и часов работы маневровых локомотивов, поэтому поставленные задачи направлены на повышение эффективности ТОиР, увеличение общего показателя КТГ локомотивного парка [92]. Увеличение показателей КТГ обуславливает экономическую эффективность сервисных компаний, перед которыми стоит задача по увеличению оборота локомотивов в эксплуатации. Для обес-

печения гибкости ТООР локомотивного комплекса сервисным компаниям требовалось минимизировать возникновение отказов технических средств (ОТС), сократить время нахождения локомотивов на неплановом ремонте, а также повысить техническую надежность оборудования и узлов [93, 94].

Для реализации поставленных целей сервисные компании начали развивать все организационные и технические инструменты, повышающие качество технического обслуживания и текущего ремонта [95]. Перед сервисными компаниями стояла одна из актуальных задач: мониторинг технического состояния электровоза, акцентированный именно на предупреждение ОТС всеми существующими средствами диагностики как бортовыми, так и стационарными [96]. Диагностическая информация, полученная с бортовых и стационарных средств диагностики, использовалась при техническом обслуживании и текущем ремонте, однако с учетом изменения технического состояния оборудования с течением времени под воздействием множества внутренних и внешних факторов не было четкого определения характера и момента изменений [97–100].

Перспективный вектор развития сервисных компаний направлен на расширение возможностей существующих систем и совершенствование методов технической диагностики оборудования локомотивов [101–103].

Компания ООО «ЛокоТех» в 2012 г. успешно реализовала автоматизированную систему управления «Сетевой график» [104–106]. В одну из функций этой системы заложена концепция анализа и расшифровки диагностических данных, регистрируемых МСУ локомотивов [107]. Расшифровка производилась по заходу локомотивов в депо, цель которой заключалась в определении текущего технического состояния оборудования и предотвращении возникновения предотказных состояний на основании составления сверхцикловых работ по обслуживанию локомотивов.

Накопленный положительный опыт позволил применить все инструменты инновационного проекта «Умный локомотив» ко всем современным локомотивам, оборудованным МСУ [14, 15, 108]. Основная цель проекта –

оценка технического состояния оборудования инструментами предиктивной аналитики по регистрируемым параметрам. Функции проекта:

- автоматический контроль и удаленный мониторинг технического состояния основного оборудования электровоза;
- информирование локомотивных бригад о текущем состоянии оборудования, ошибках, ограничениях в работе оборудования, выдаче предупреждающих советов по дальнейшей эксплуатации;
- непрерывный контроль критических значений параметров основных агрегатов и систем индикации, их выход за допустимые пределы и аварийное автоматическое отключение (с учетом обеспечения безопасности движения) или изменение режима работы электровоза;
- регистрация, хранение, передача, защита диагностической информации и значений контрольных параметров;
- создание системы мониторинга технического состояния, которое позволяет в реальном времени оценивать состояние подвижного состава и прогнозировать его изменения [109–111].

Одним из успешных аналогичных примеров реализации проекта «Умный локомотив» принято считать тиражирование микропроцессорной системы управления и диагностики (МПСУиД) на электровозах 2ЭС6 «Синара». Экономия эксплуатационных расходов от приобретения таких электровозов достигается за счет улучшения по сравнению с локомотивами-аналогами КТГ, снижения продолжительности и изменения структуры ТОиР, повышения надежности электровозов, снижения удельного расхода топливно-энергетических ресурсов, роста производительности труда локомотивных бригад [112, 113].

Совместно с компаниями ООО «НПО САУТ» и НПП «ТрансИнфоПроект» с помощью системы взаимодействия с локомотивом (цифровая радиосвязь) МПСУиД передает в реальном времени диагностическую информацию в Центры мониторинга технического состояния локомо-

тивов новых серий, входящих в состав ООО «СТМ-Сервис», по всему контролируемому оборудованию [112, 114].

Общая структура ТОиР локомотивного комплекса представлена на рисунке 1.3 [115–117].

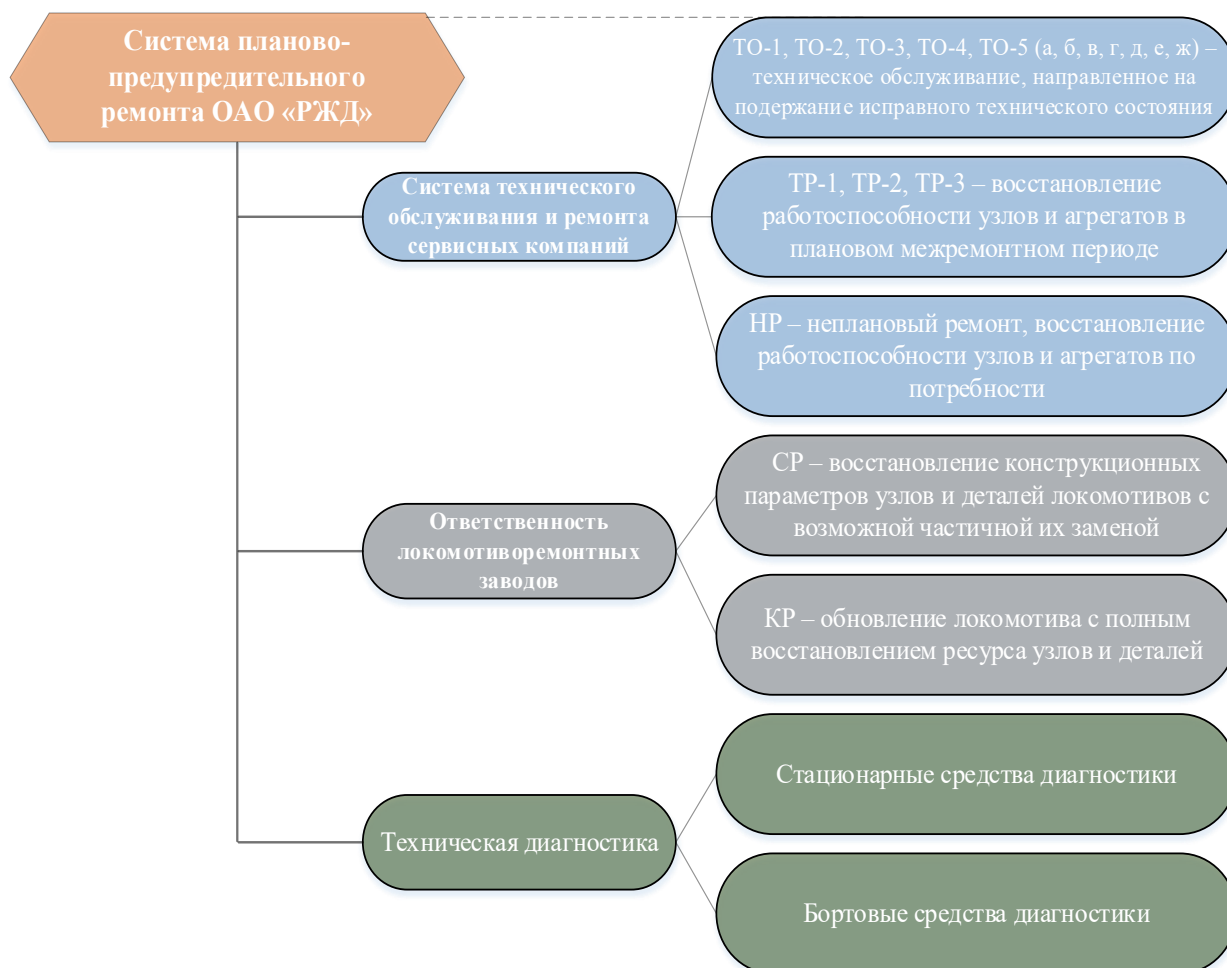


Рисунок 1.3 – Система технического обслуживания и ремонта локомотивного комплекса ОАО «РЖД»

ТО – техническое обслуживание; ТР – текущий ремонт, НР – неплановый ремонт; СР – средний ремонт; КР – капитальный ремонт

Зона ответственности сервисных компаний относится к циклам технического обслуживания, текущему ремонту всех видов и неплановым ремонтам. Ответственность за выполнение циклов среднего и капитального видов ремонтов возлагается на локомотиворемонтные заводы. Дополнением к

ТОиР следует отнести техническую диагностику, проводимую стационарными и бортовыми средствами диагностики [118, 119]. Система планово-предупредительного ремонта ОАО «РЖД» обеспечивает постоянный контроль технического состояния локомотивов, поддержание его исправности, заблаговременную замену и контроль узлов, отвечающих за безопасную эксплуатацию независимо от технического состояния единицы. Систему регламентируют инструкции, правила и стандарты для каждой серии локомотивов [116, 120]. С учетом установленных межремонтных пробегов и, несмотря на недостатки системы планово-предупредительного ремонта, сервисные компании поддерживают на установленном уровне КТГ локомотивного парка ОАО «РЖД» [121, 122].

На основе представленного обзора составлена схема диссертационного исследования (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Схема диссертационного исследования

1.3 Анализ ситуации неплановых ремонтов электровозов 2ЭС6

Несмотря на ежегодное пополнение локомотивного парка электровозов 2ЭС6, ситуация с неплановыми ремонтами не улучшается [123] (рисунок 1.5).

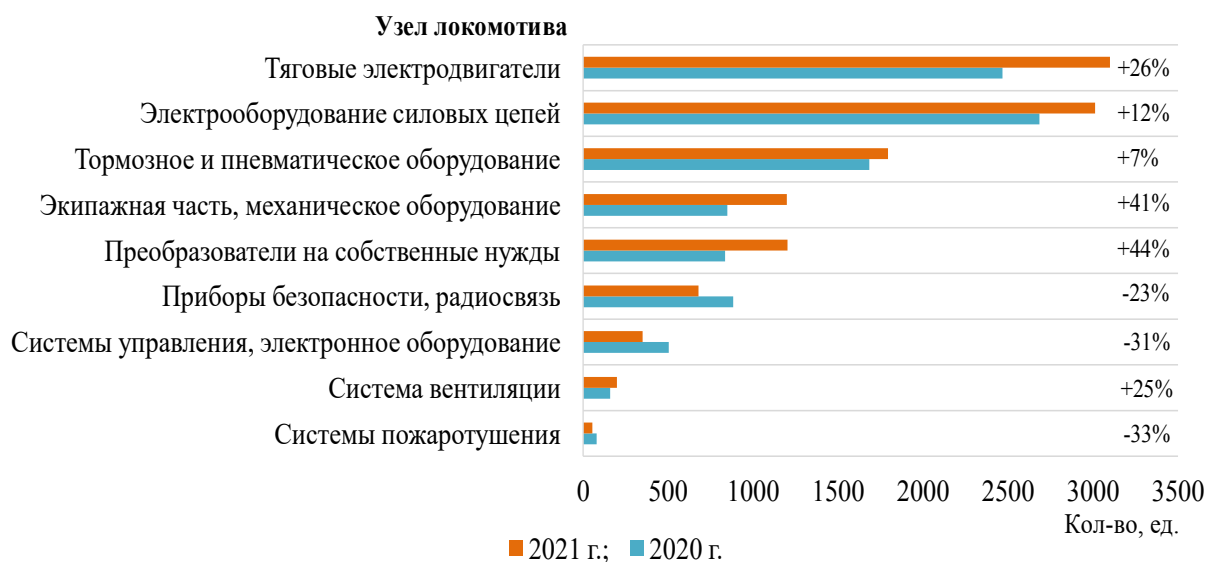


Рисунок 1.5 – Статистика неплановых ремонтов по оборудованию, 2020–2021 гг.

Статистика (2020–2021 гг.) неплановых ремонтов [123, 124] отмечает, что их количество по шести узлам электровоза растет и только по трем узлам показатели снижаются (приборы безопасности, радиосвязь, системы управления, электронное оборудование, системы пожаротушения). Критические показатели наблюдаются по тяговым электродвигателям и электрооборудованию силовых и вспомогательных цепей. В рассматриваемом периоде только 27 % неплановых ремонтов от общего количества приходится на ТЭД и 26 % – на электрооборудование силовых и вспомогательных цепей. Поэтому 53 % неплановых ремонтов проводится только по двум узлам. Ситуация по остальным узлам тоже требует разработки технических мероприятий по минимизации возникновения неисправностей. Самые частые причины неплановых ремонтов по ТЭД представлены на рисунке 1.6.

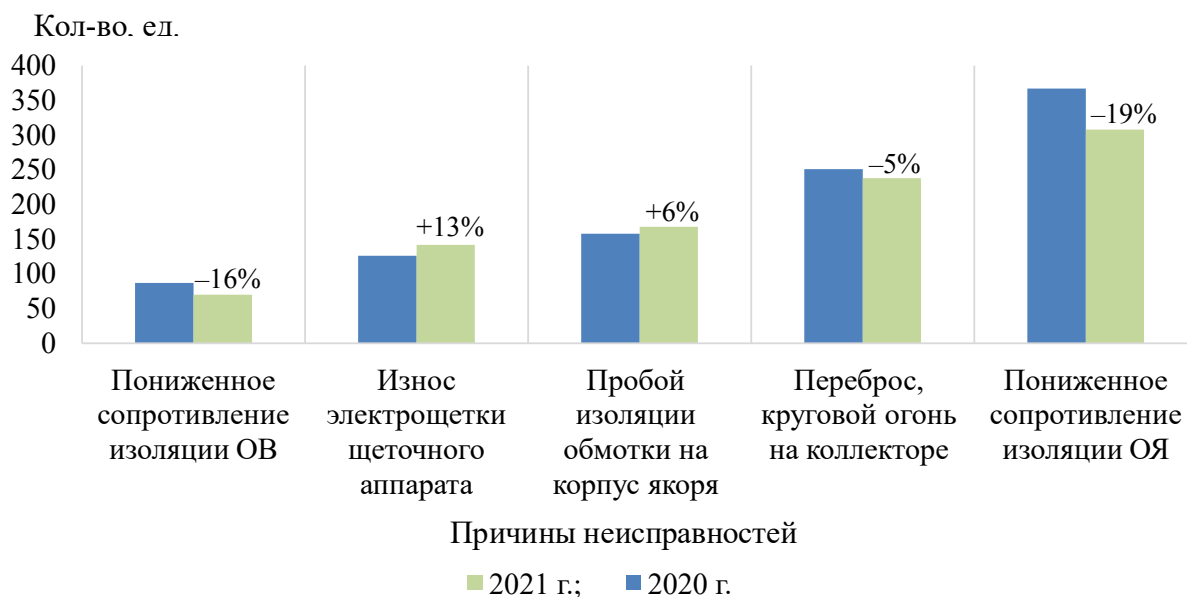


Рисунок 1.6 – Причины unplanned ремонтов по тяговым электродвигателям
 ОВ – обмотка возбуждения; ОЯ – обмотка якоря

Могут быть и неточности вводимой ремонтными диспетчерами сервисных локомотивных депо (СЛД) информации в автоматизированные системы, но, согласно статистике причин (рисунок 1.6), часто встречающиеся можно классифицировать как электрические повреждения. Лидирующую позицию занимает пониженное сопротивление изоляции обмотки якоря ТЭД: по этой причине проводится 13 % unplanned ремонтов от общего количества, из-за переброса, кругового огня наличия искрения на коллекторе ТЭД – 10 %, пробоя изоляции обмотки на корпус – 7 %, износа электрографитовой щетки щеточного аппарата – 4,9 %, пониженного сопротивления изоляции обмотки возбуждения – 3,2 %. Все это логически связано между собой. Недостаточный контакт электрографитовых щеток щеточного аппарата с коллектором ТЭД (из-за их неравномерного износа) вызывает искрение, которое провоцирует появление кругового огня на коллекторе с последующим развитием электрических повреждений как коллекторно-щеточного аппарата, так и обмоток ТЭД [125–127]. В 2020–2021 гг. эти причины определяли постановку электровозов 2ЭС6 на unplanned ремонт по ТЭД.

Аналогичная ситуация сложилась по электрооборудованию силовых и вспомогательных цепей; это комплексный узел и включает в себя все оборудование, установленное в высоковольтной камере (рисунок 1.7).

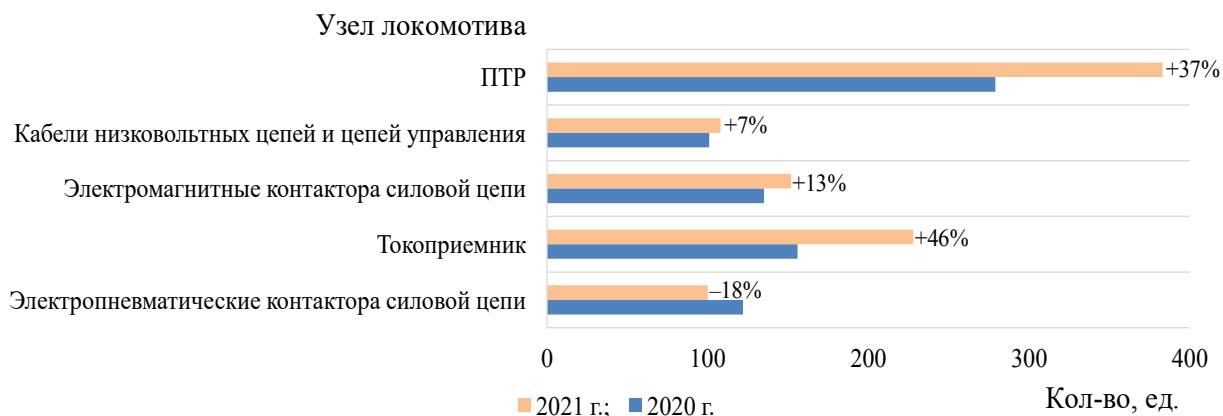


Рисунок 1.7 – Статистика unplanned ремонтов по электрооборудованию ПТР – пускотормозные резисторы

Статистика unplanned ремонтов по электрооборудованию отмечает тенденцию роста неисправностей по пускотормозным резисторам на 37 %, неисправностей по токоприемникам – на 46 % к уровню 2021 г. На электромагнитные и электропневматические контакторы силовой цепи приходится 15 % unplanned ремонтов из-за нарушения сопряжений по контактными пластинами и приводам, на кабели низковольтных цепей и цепей управления – 5 % из-за замечаний к сопротивлению изоляции (от общего количества за 2020–2021 гг.). Основные причины неисправности пускотормозных резисторов и токоприемников представлены на рисунке 1.8.

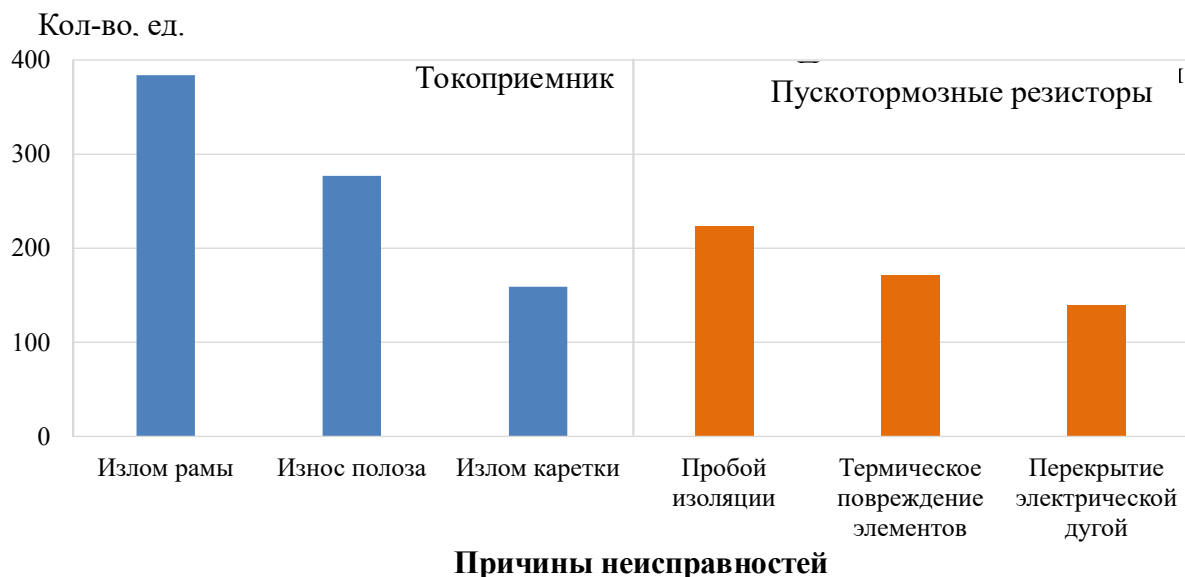


Рисунок 1.8 – Основные причины unplanned ремонтов по токоприемникам и пускатормозным резисторам за период 2020–2021 гг.

Причины неисправностей с токоприемниками (рисунок 1.8) связаны с механической составляющей износа и излома его составных частей. Здесь полоз токоприемника, а именно, его высота контролируется ремонтным персоналом в пунктах технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ) или в СЛД путем визуальной оценки. По пускатормозным резисторам причины связаны с электрической составляющей по пробоем изоляции, термическому повреждению, перекрытию электрической дугой [128–130].

Таким образом, отмечены наиболее уязвимые узлы электровоза 2ЭС6, которые больше всего подвергаются развитию неисправностей. Актуальным становится определение работы такого оборудования в зоне развития потенциальной неисправности для предупреждения развития ущерба по оборудованию. Возникающие проблемы по ТЭД и электрооборудованию обуславливают 35 % простоя электровозов 2ЭС6 в неэксплуатируемом парке, что, в свою очередь, отражается на показателе КТГ.

1.4 Мониторинг технического состояния электровозов 2ЭС6

Мониторинг технического состояния электровозов 2ЭС6 отслеживается в Центрах мониторинга технического состояния локомотивов новых серий технической дирекции ООО «СТМ-Сервис», дислоцируемых в СЛД Свердловск и Южный-Урал [131, 132]

МПСУиД обеспечивает регистрацию 41 аналогового и 263 дискретных сигналов с установленных измерительных датчиков на электровозе 2ЭС6 [132]. Аналоговые величины измеряются с помощью преобразователей напряжения в код. Дискретные сигналы от органов управления вводятся блоком связи с пультом по двухканальной линии связи интерфейса RS-485 [133, 134] (рисунок 1.9).

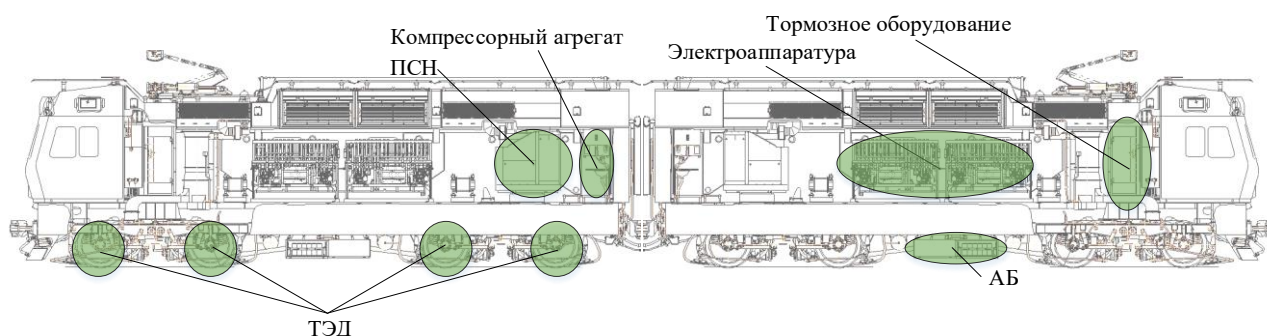


Рисунок 1.9 – Принципиальная схема размещения контролируемого оборудования электровоза 2ЭС6

ПСН – преобразователь собственных нужд; ТЭД – тяговый электрический двигатель; АБ – аккумуляторная батарея

Регистрируемые сигналы с оборудования (рисунок 1.9) фиксируются в файлах регистратора параметров МПСУиД (РПМ) [132]. Диагностические сообщения по оборудованию формируются на программном уровне посредством заложенных алгоритмов. Возможность МПСУиД электровозов 2ЭС6 позволяет регистрировать низкую, среднюю и высокую степени критичности диагностических сообщений. Обеспечивается выдача голосовых сообщений локомо-

тивной бригаде по работе оборудования о превышении предельно допустимых значений и по выявленным ситуациям [134, 135].

Специалисты Центров мониторинга в реальном времени ведут непрерывный контроль поступления диагностических сообщений по каждому локомотиву; только ежедневно обрабатываются около 4000 ед. Каждое диагностическое сообщение содержит порядковый номер, условное содержание и степень критичности. С помощью специализированного программного обеспечения «Табло коллективного пользования» ведется ежедневный мониторинг электровозов 2ЭС6 на всей сети ОАО «РЖД» (рисунок 1.10) [136].

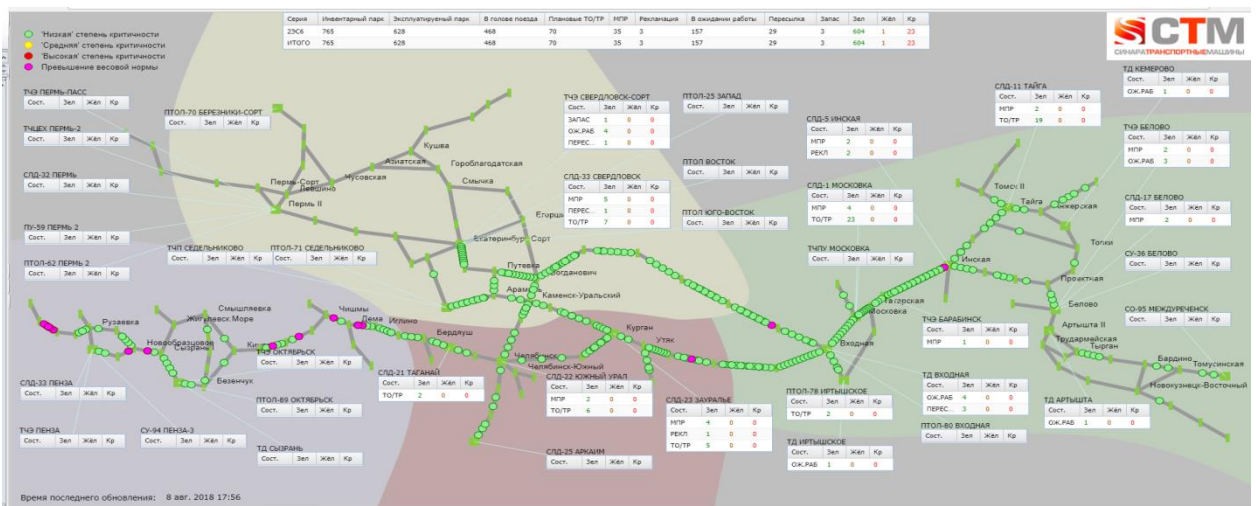


Рисунок 1.10 – Табло коллективного пользования

Программное обеспечение (рисунок 1.10) позволяет просматривать текущие показатели работоспособности (вес, дислокацию, последние виды и плановые пробеги от технического обслуживания и текущего ремонта, состояние критичности поступающих диагностических сообщений). На основе полученных диагностических сообщений специалисты Центров мониторинга анализируют техническое состояние оборудования электровоза, опираясь на перечень ОТС и неплановых ремонтов по электровозу. Схема получения диагностических сообщений в Центрах мониторинга и передачи оперативной информации представлена на рисунке 1.11.

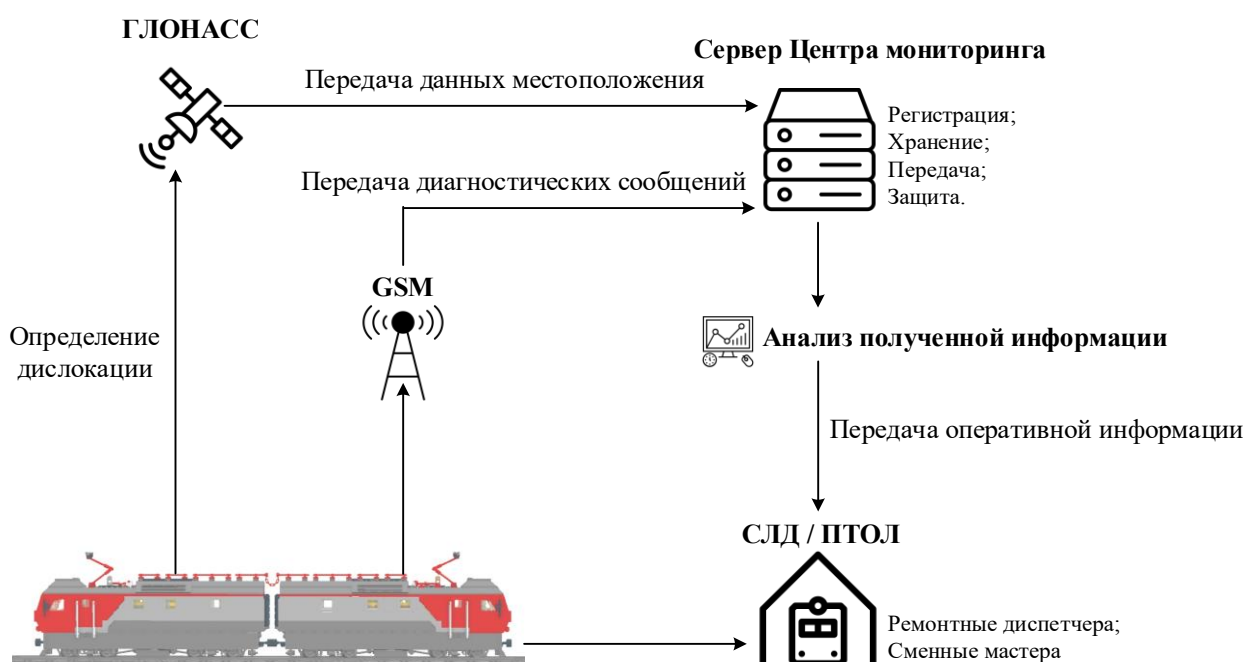


Рисунок 1.11 – Схема получения диагностических сообщений и передачи оперативной информации

ГЛОНАСС – глобальная навигационная спутниковая система; GSM – глобальный стандарт цифровой мобильной сотовой связи; СЛД – сервисное локомотивное депо; ПТОЛ – пункт технического обслуживания локомотивов

По факту захода электровоза в СЛД или на ПТОЛ на основе полученной оперативной информации проверяется работоспособное состояние оборудования и выявляются предполагаемые неисправности. Параллельно специалисты сервисной компании скачивают файлы РПМ с электровоза и передают их в Центр мониторинга. Файлы РПМ – это последовательно зарегистрированный перечень аналоговых и дискретных сигналов, которые анализируются специалистами с помощью РП МПСУиД [132, 135].

Анализ файлов регистратора параметров и диагностических сообщений трудоемок. Ручная обработка, сопоставление информации, проверка достоверности диагностической информации – все это обуславливает колоссальные временные затраты, не исключает влияния человеческого фактора (неисправность электровоза может быть ошибочной) [137, 138]. Достоверность получаемой оперативной информации от специалистов

Центров мониторинга оценивается только при проверке электровоза на ремонтной позиции СЛД или ПТОЛ. Отсутствие автоматизации обработки диагностических данных по электровозу влияет на оперативность передачи информации [139, 140].

Работа Центров мониторинга подтверждает свою эффективность (рисунок 1.12).

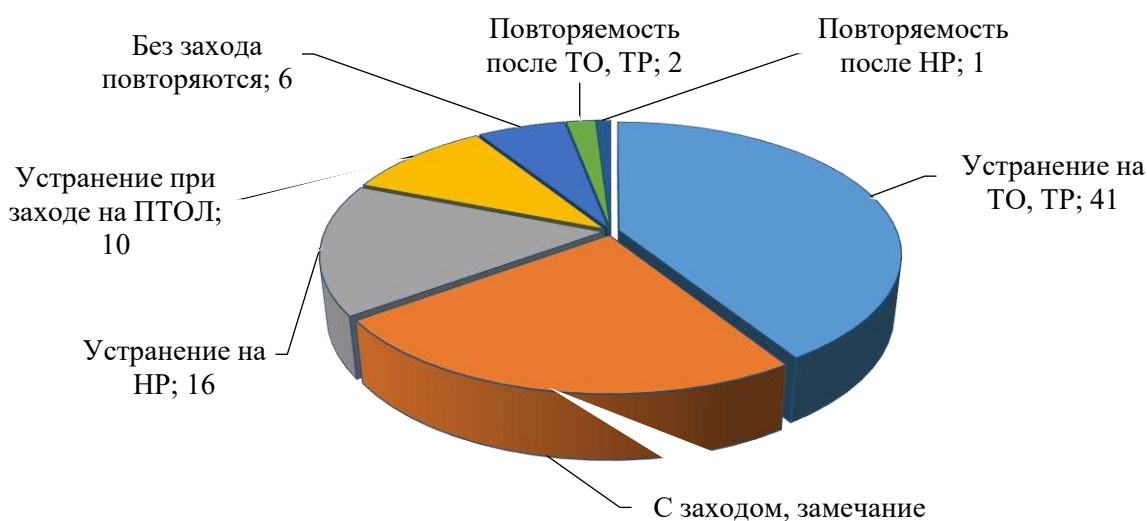


Рисунок 1.12 – Эффективность работы Центров мониторинга, %

По оперативной информации по локомотиву в СЛД или на ПТОЛ, только 38 % локомотивов остаются на неплановом ремонте. При заходе электровоза в СЛД или на ПТОЛ 16 % замечаний не подтверждается, 16 % устраняется при техническом обслуживании и ремонте и 1 % – при заходе на экипировку (см. рисунок 1.12). Другими словами, неточности регистрации диагностических сообщений составляют 16 %, а оптимизация ТОиР после открытия Центров мониторинга увеличилась на 52 %. Однако без захода электровоза в 6 % случаях диагностические сообщения повторяются, а в 25 % нет.

Таким образом, роль Центров мониторинга технического состояния локомотивов новых серий в системе ТОиР электровозов 2ЭС6 занимает одну из приоритетных позиций, так как:

- вся анализируемая диагностическая информация позволяет повысить качество проводимых технического обслуживания и текущего ремонта;
- в реальном времени производится предиктивная оценка технического состояния оборудования;
- минимизация случаев ОТС позволяет снизить количество задержек поездов в эксплуатации по всем видам движения;
- повышение КТГ грузового локомотивного парка позволяет достигать установленных компанией ОАО «РЖД» показателей.

1.5 Выводы по главе 1

1 Существующие системы мониторинга технического состояния оборудования локомотивов имеют схожую структуру, но отличаются функционалом измерительных датчиков, способностью программного обеспечения обрабатывать получаемую информацию, типом контролируемого оборудования и локомотивов. Инструменты предиктивной аналитики схожи, набор анализируемых параметров отличается в зависимости от технических решений, реализованных на электровозах.

2 Роль сервисных компаний в системе ТОиР локомотивного комплекса ОАО «РЖД» направлена на повышение надежности локомотивов, обеспечение бесперебойности и безопасности движения, снижение экономических издержек на техническое обслуживание и ремонт. Определенные векторы развития направлены на расширение возможностей мониторинга технического состояния локомотивов в эксплуатации.

3 Ситуация unplanned ремонтов по электровозам 2ЭС6 не улучшается. Отмечается рост возникновения неисправностей по ТЭД, электрооборудованию силовых и вспомогательных цепей. Отмечены их основные причины, на которые следует обратить повышенное внимание и для для решения которых необходима выработка организационных и технических решений по минимизации. Влияние внешних факторов также усугубляет обстановку unplanned ремонтов (качество проводимых технического обслуживания и текущего ремонта, режим эксплуатации).

4 Эффективность работы Центров мониторинга занимает одну из приоритетных ролей в системе ТОиР. За счет передаваемой оперативной информации по состоянию оборудования в эксплуатации ремонтные группы обеспечивают проверку оборудования на наличие предполагаемых неисправностей, а в случаях обнаружения – их устранение.

2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕГИСТРАЦИИ ДОСТОВЕРНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СООБЩЕНИЙ ПО ОБОРУДОВАНИЮ ЭЛЕКТРОВОЗА 2ЭС6

2.1 Анализ ситуации регистрации диагностических сообщений

Расширенный анализ информации по регистрации диагностических сообщений проведен в 2018–2019 гг.; исследование охватывало все времена года. Объем данных для изучения – 3,5 млн диагностических сообщений по электровозам (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Статистика зарегистрированных диагностических сообщений по оборудованию по степени критичности

В рассматриваемом периоде преобладает регистрация диагностических сообщений с низким уровнем критичности: 66,5 % от общего количества зарегистрированных, что характеризует нормальную работу оборудования. Со средней степенью критичности зафиксировано 29,5 % сообщений, с высокой – 3,9 %. По таким типам сообщений есть набор рекомендаций по проверке исправности включения некоторых элементов силовых и вспомогательных

цепей, переключения тумблеров управления, перезагрузки некоторых отдельных систем.

Регистрация диагностических сообщений с низким уровнем критичности по режимам и алгоритмам эксплуатации составляет 36,7 % от общего количества. Такие сообщения информируют локомотивную бригаду о необходимости соблюдения режимов эксплуатации и алгоритмов управления. В свою очередь, специалисты Центров мониторинга оценивают правильность и корректность управления со стороны локомотивных бригад по такому типу сообщений.

Регистрация диагностических сообщений с высоким уровнем критичности по ТЭД наблюдается чаще всего: 3,2 % от общего количества (80,5 % от всех сообщений с высоким уровнем критичности). Такие диагностические сообщения характеризуются как предотказные; но есть случаи регистрации диагностических сообщений, не имеющих фактического подтверждения. При этом ситуация неплановых ремонтов и регистрация диагностических сообщений по ТЭД коррелируют; лидирует статистика с отрицательной тенденцией. Не всегда диагностические сообщения со средней и высокой степенью критичности подтверждаются по оборудованию, что затрудняет определение начала работы оборудования, отличной от нормальной.

Статистика регистрации диагностических сообщений по временам года представлена на рисунке 2.2.

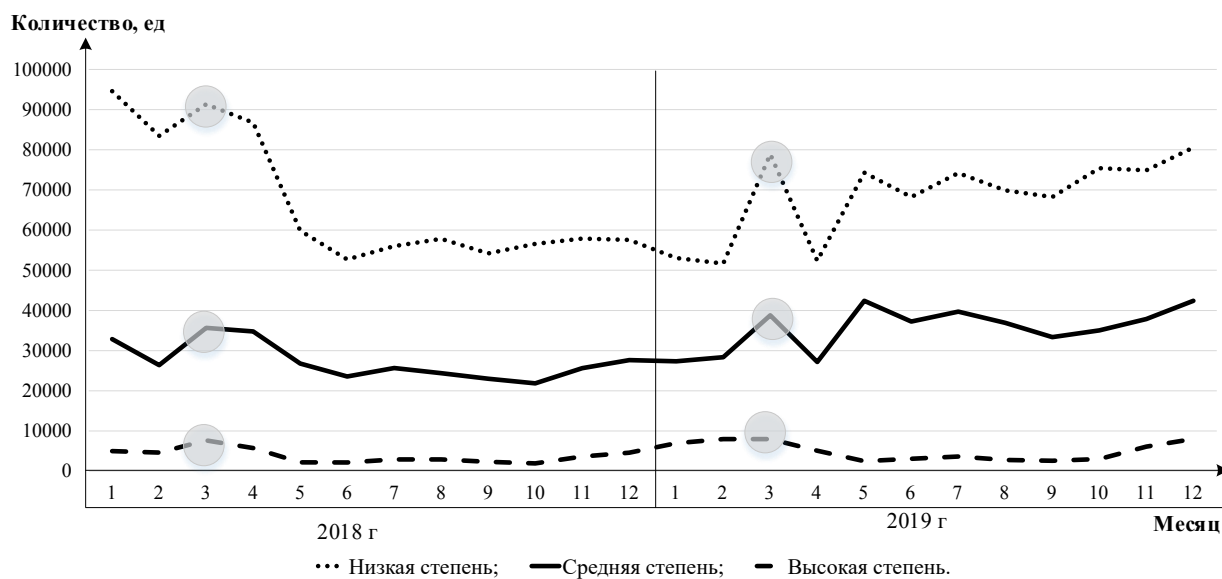


Рисунок 2.2 – Статистика регистрации диагностических сообщений по степеням критичности

На весну приходится 28 % зарегистрированных диагностических сообщений, на зиму – 26 %, лето – 25 %, осень – 21 %. Определены периоды года, когда зафиксированы максимальные показатели по каждому типу сообщения. В целом разница между временами года незначительная, но объяснить ее между весной и зимой можно повышением влажности воздуха, хаотичным изменением температуры воздуха и ее перепадами, что сильно влияет на состояние нижнего строения пути. Взаимосвязь состояния нижнего строения пути и оборудования электровоза описывается оценкой его уровня допустимой вибрации: чем выше этот уровень, тем больше усиливается вероятность нарушения контактных соединений и сопряжений [141]. Весной отмечаются высокие показатели регистрации диагностических сообщений с низкой степенью критичности – 29,9 %, со средней – 26,8 %. Зимой регистрация с высокой степенью критичности достигает 36,3 %.

Диагностические сообщения по месту эксплуатации электровоза в момент их регистрации не анализировались, так как влияние пробега электровоза, веса грузового состава, профессионализма и навыков локомотивной бригады – это трудно отслеживаемые признаки, учет которых применим только для выборки нескольких локомотивов; метеорологические характеристики

(давление и влажность воздуха, наличие осадков, температура окружающего воздуха, скорость и направление ветра) тоже не учитывались.

На рисунке 2.3 представлен пример почасовой регистрации диагностических сообщений.

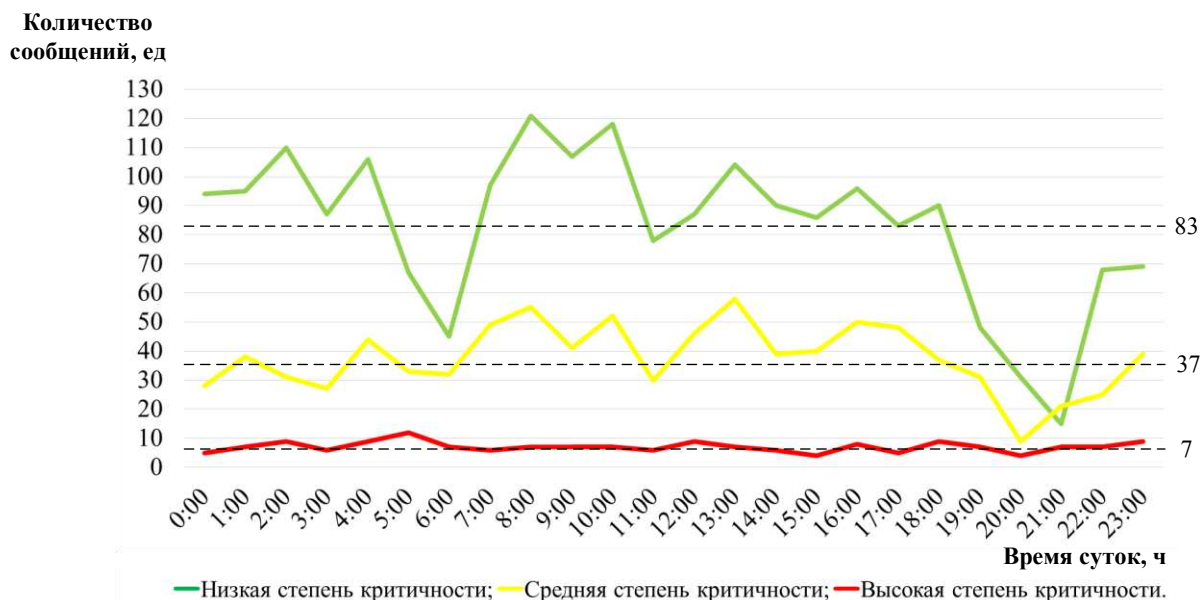


Рисунок 2.3 – Почасовая регистрация диагностических сообщений

Пример регистрации диагностических сообщений (ежечасно в сутки, 1.01.2018): среднее количество регистрируемых диагностических сообщений в час – 127. В целом за сутки зарегистрировано 1992 диагностических сообщения с низкой степенью критичностью, 903 – со средней, 170 – с высокой. Общий объем в сутки – 3065. Анализ, верификация, мониторинг, передача информации диспетчерскому персоналу – на все этапы затрачивается время, что влияет на принятие оперативных решений.

Соискателем в 2020 г. сформулирована гипотеза: последовательная совокупность зарегистрированных диагностических сообщений по одному электровозу может определять работу оборудования, отличную от нормальной и наоборот. Так как диагностические сообщения регистрируются последовательно, то рассматривались совокупности таких сообщений, как комбинации, зарегистрированные во временном промежутке друг за другом. Толь-

ко при исследовании диагностических сообщений по ТЭД выявлено 10 тыс. неоднократно повторяющихся комбинаций [142].

Методика формирования основана на том, что зарегистрированные диагностические сообщения друг за другом определялись как комбинации под соответствующими номерами (рисунок 2.4).

<i>Гипотеза 1</i>	
<i>Дата, время</i>	<i>Диагностика</i>
<i>10.05.2020 19:24:34</i>	<i>Разбор схемы</i>
<i>10.05.2020 19:24:35</i>	<i>Срабатывание защиты</i>

<i>Гипотеза 44</i>	
<i>Дата, время</i>	<i>Диагностика</i>
<i>09.05.2020 07:45:09</i>	<i>Невозможно уменьшить силу тяги секции</i>
<i>10.05.2020 19:24:34</i>	<i>Разбор схемы</i>
<i>10.05.2020 19:24:35</i>	<i>Срабатывание защиты</i>

Рисунок 2.4 – Пример регистрации комбинаций диагностических сообщений

Силами специалистов Центра мониторинга создан модуль по регистрации таких комбинаций с трехсуточным интервалом, фиксируемых по каждой отдельной секции (рисунок 2.4).

При мониторинге регистрации таких комбинаций сделан вывод: взаимосвязи групп диагностических сообщений с возникающими неисправностями нет. Изучались комбинации из диагностических сообщений, определяющие нормальную работу оборудования.

Зафиксирована регистрация диагностических сообщений «Разбор схемы», «Срабатывание защиты» (отражает нормальную работу аппаратов защиты высоковольтных цепей электровоза).

Таким образом,

- диагностические сообщения с низким уровнем критичности характеризуют нормальную работу оборудования, средний и высокий уровень критичности обнаруживает потенциальное возникновение неисправности;
- среди большого объема диагностических сообщений наблюдается сложность выделения значимых, обуславливающих работу оборудования, отличную от нормальной;
- требуется индивидуальный анализ диагностических сообщений со средним и высоким уровнем критичности с предметной проверкой их достоверности;
- отмечается сезонность (зимой и весной) повышения регистрации диагностических сообщений со средним и высоким уровнем критичности;
- на комплексный анализ диагностических сообщений затрачивается время, влияющее на принятие оперативных решений по дальнейшей эксплуатации.

2.2 Определение достоверности диагностических сообщений

Под достоверностью технического диагностирования понимается степень объективного соответствия результатов диагностирования действительному техническому состоянию объекта [118, 143]. В настоящем исследовании мы понимаем достоверность диагностического сообщения как его подтверждение на определённом уровне значимости.

Из теории вероятности известно, что вероятность P события A – это отношение числа m событий, благоприятствующих событию A к числу всех возможных событий n . В диссертации вероятность P определена по формуле (2.1) [144–146]:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i}, \quad (2.1)$$

где n – количество регистраций;

y_i – количество точно подтвердившихся сообщений;

x_i – количество всех зарегистрированных диагностических сообщений.

Все регистрируемые диагностические сообщения хранятся на сервере Центра мониторинга. Количество точно подтвердившихся диагностических сообщений по каждому электровозу, находящемуся на неплановом виде ремонта, после факта обнаружения определено по алгоритму, представленному на рисунке 2.5.

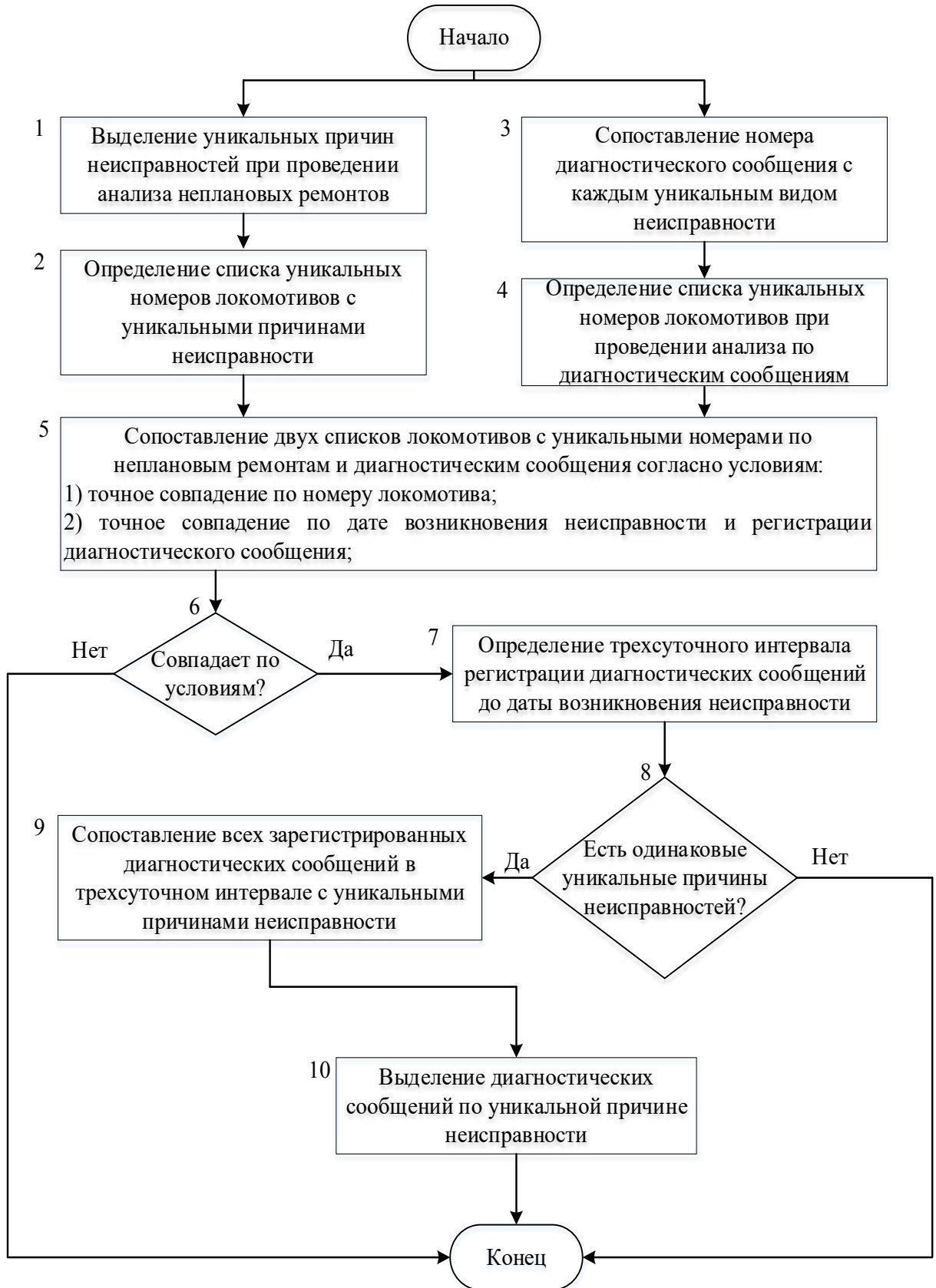


Рисунок 2.5 – Алгоритм определения точно подтвердившихся диагностических сообщений

Точно подтвердившиеся диагностические сообщения определялись отдельно по каждому электровозу с использованием внутреннего языка программирования VBA в среде Microsoft Excel. Первый, второй, третий и четвертый этапы выполняются параллельно – предварительная обработка статистических данных. Под уникальной причиной неисправности понимается возникшая неисправность оборудования, по которой диагностическое сообщение содержит информацию о техническом состоянии. На пятом этапе проверяются оба условия. В случае несовпадения одного условия на шестом этапе процессы прерываются, производится переход к следующему локомотиву. На седьмом определяется трехсуточный интервал, так как практика показала, что временные интервалы до трех суток недостаточны для анализа; если временной интервал более трех суток, то появляется большое количество ложных диагностических сообщений. На восьмом этапе диагностические сообщения сопоставляются исходя из привязки к оборудованию с уникальной причиной неисправности. На девятом и десятом этапах определяются именно те диагностические сообщения, которые по своему содержанию совпадают с характером неисправности, попавшей именно в трехсуточный интервал. Такие диагностические сообщения считаются подтвержденными.

По формуле (2.1) произведены расчеты для каждого диагностического сообщения и определена их достоверность (приложение А, таблица А.1)

По таблице А.1 определены значение достоверности каждого диагностического сообщения, интервалы достоверности и количество диагностических сообщений, попавших в них [147] (рисунок 2.6).

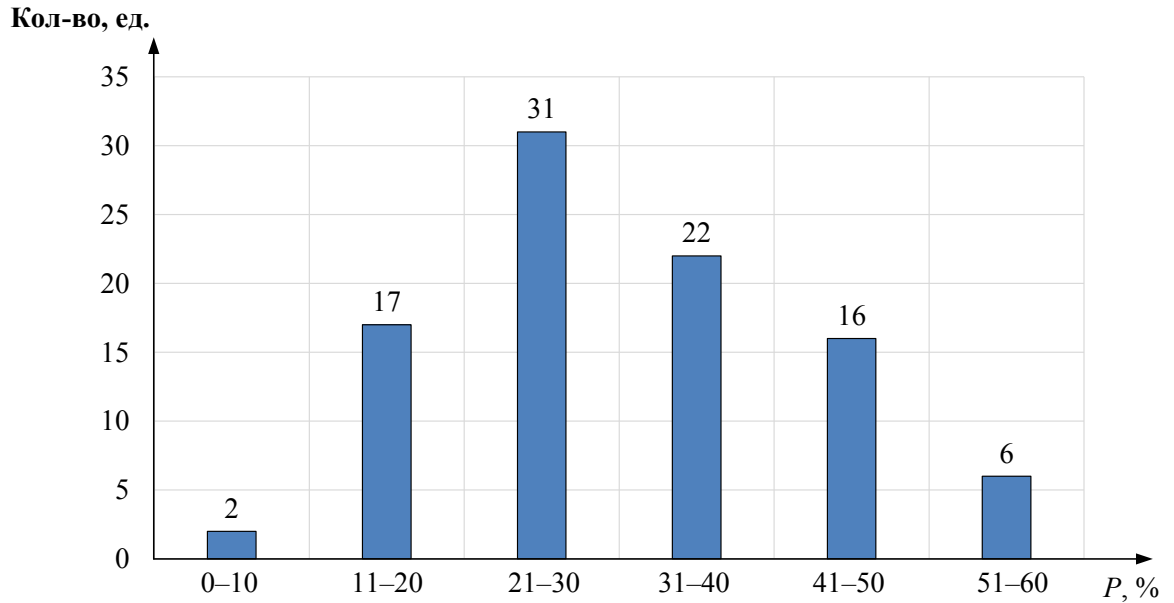


Рисунок 2.6 – Статистика рассчитанной достоверности

Основной группой является достоверность на уровне 21–30 % (31 случай попаданий в интервал 21–30 %). Можно сделать аналогичный вывод по остальным рассмотренным интервалам достоверности, но в целом на интервал достоверности 31–60 % приходится 46 % всех зарегистрированных диагностических сообщений, или 44 ед.

Так как рассмотренный период охватывает все времена года по два раза, то с учетом сезонности регистрации рассчитанная достоверность позволяет оценить достоверность всех диагностических сообщений по следующему признаку: если определен уровень достоверности, то можно прогнозировать регистрацию диагностических сообщений, опираясь на ранее полученные результаты.

2.3 Статистическая обработка диагностических сообщений

Зависимость между зарегистрированными и точно подтвердившимися диагностическими сообщениями может быть представлена через некоторую функцию. В диссертации рассматриваются переменные x_i – количество всех зарегистрированных диагностических сообщений, y_i – количество точно подтвердившихся сообщений, индекс i определяет рассматриваемый месяц.

Существует зависимость, обусловленная наличием и силой взаимосвязи между сообщениями, которая может быть представлена как линейной, так и нелинейной функцией. Для решения задачи использована теория регрессионного анализа. Аппроксимация практических значений по каждому диагностическому сообщению проведена с использованием метода наименьших квадратов [148].

В расчеты введена переменная y_i^* , которая характеризует прогнозное значение при заданной величине x_i . В расчетах применены эмпирические уравнения рассматриваемых видов регрессионных функций, учитывающих проведенную линеаризацию [149]. Если функция $f(x_i)$ линейная, то эмпирическое уравнение представлено в виде

$$y_i^* = a + bx_i, \quad (2.2)$$

где a и b – некоторые коэффициенты.

Коэффициенты a и b :

$$b = r_{xy} \frac{S_y}{S_x} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \bar{y}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2}, \quad (2.3)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}. \quad (2.4)$$

После нахождения некоторых коэффициентов a и b проверяется значимость уравнения регрессии с помощью F -критерия Фишера. Суть данного критерия заключается в оценке коэффициента детерминации R^2 по шкале от 0 до 1:

$$R^2 = \frac{\sum (y_i^* - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} = \frac{\sum_{\text{рег}}}{\sum_{\text{общ}}}. \quad (2.5)$$

После нахождения коэффициентов детерминации проверялась их значимость путем подтверждения или опровержения выдвинутой нулевой гипотезы H_0 о том, что модель незначима или значима при альтернативной гипотезе H_1 . Вследствие чего определяется наблюдаемый F -критерий Фишера:

$$F_{\text{набл}} = \frac{\sum_{\text{рег}} (n-2)}{\sum_{\text{ост}}} = \frac{R^2 (n-2)}{1-R^2}. \quad (2.6)$$

Чем ближе значение R^2 к единице, тем приближеннее качество аппроксимирующей функции. Наблюдаемый F -критерий Фишера сравнивается с критической точкой $F_{\text{кр}}$ со степенями свободы 1 и $(n-2)$ и уровнем значимости $\alpha = 0,05$ по таблице распределения Фишера. Если справедливо неравенство $F_{\text{набл}} > F_{\text{кр}}$, то нулевая гипотеза H_0 отвергается, и модель признается значимой. В противном случае нулевая гипотеза H_0 принимается, и уравнение регрессии считается незначимым.

Определенные прогнозные значения y_i^* обуславливают ошибку аппроксимации, которая может быть абсолютной и относительной. Чем меньше ошибка аппроксимации, тем ближе определенные прогнозные значения y_i^* к эмпирическим. Поэтому для оценки качества модели рассчитывается средняя ошибка аппроксимации:

$$A = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - y_i^*}{y_i} \right| \cdot 100\%. \quad (2.7)$$

Если средняя ошибка аппроксимации A не превышает 10 %, то точность модели высокая, если находится в пределах от 10 до 20 % – средняя, от 20 до 50 % – низкая [149].

По этому расчету также можно определить коэффициенты a и b для логарифмической, гиперболической функций (рисунок 2.7), для степенной и экспоненциальной (рисунок 2.8) [149].

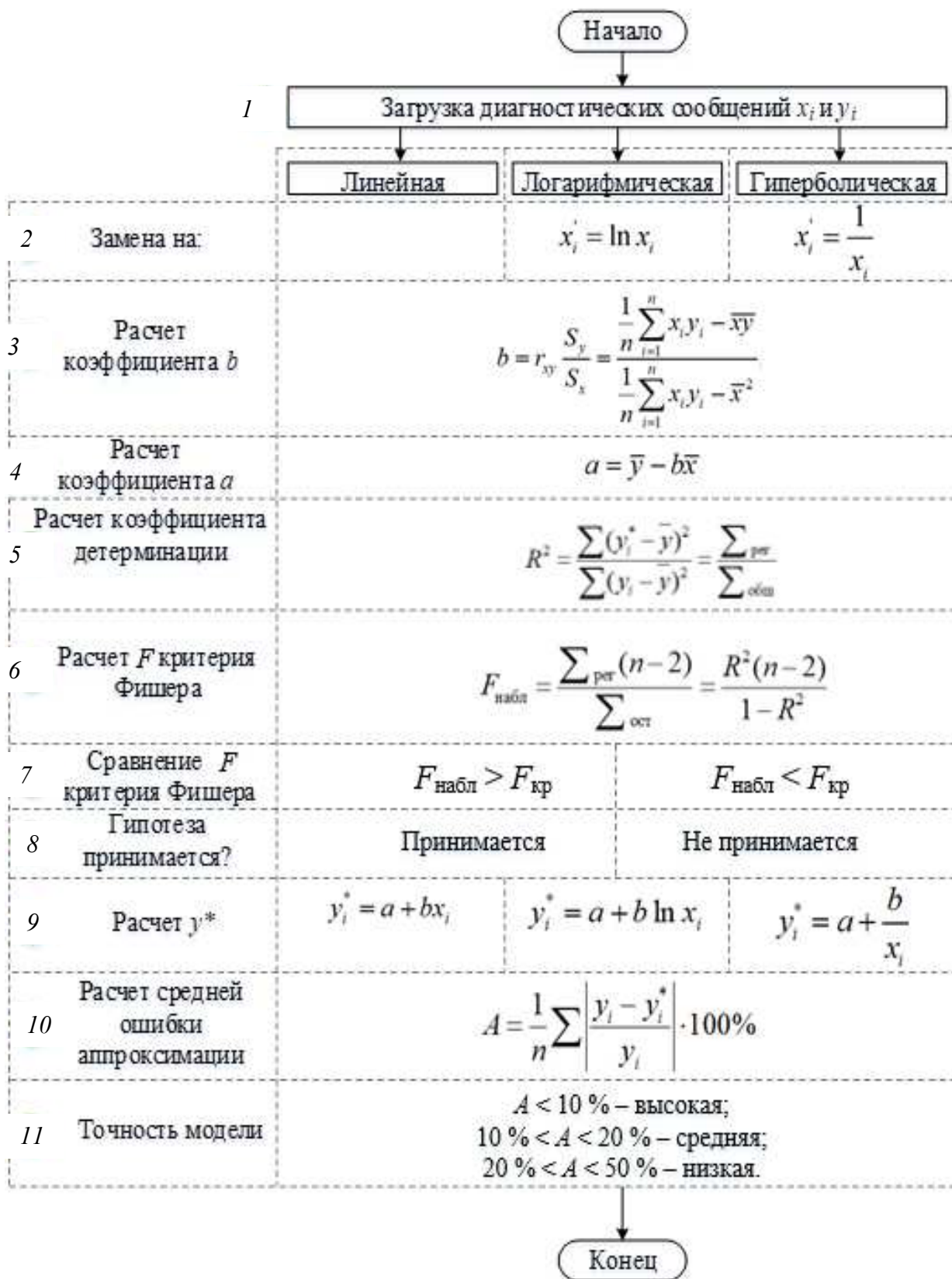


Рисунок 2.7 – Алгоритм определения коэффициентов аппроксимации линейной, логарифмической, гиперболической функций

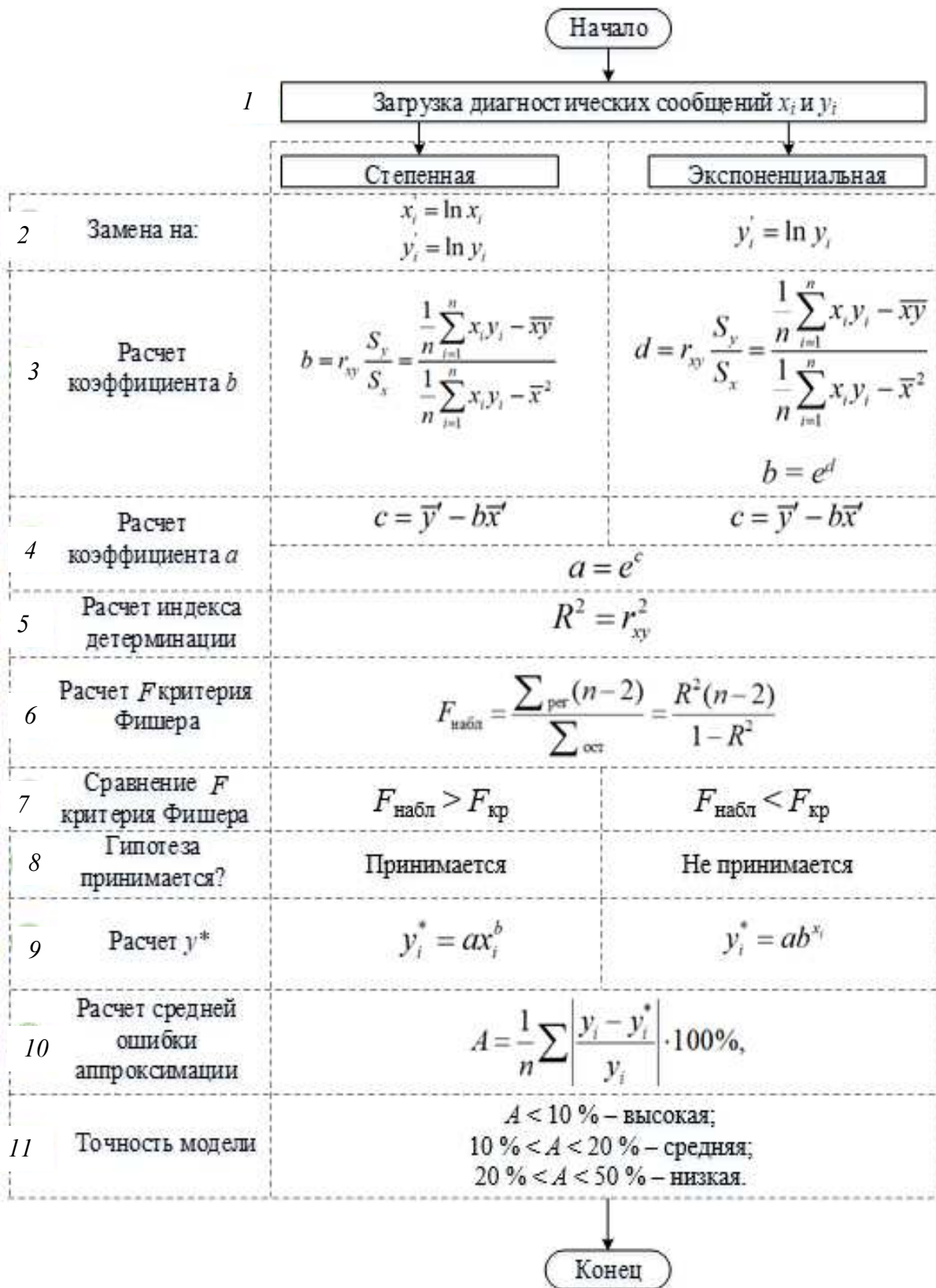


Рисунок 2.8 – Алгоритм определения коэффициентов аппроксимации степенной и экспоненциальных функций

Так, на этапе *1* загружаются все полученные и точно подтвердившиеся диагностические сообщения по оборудованию. Этапы *2–10* – это последовательный математический расчет. На этапе *11* определяется точность по каждой функции. При этом расчеты по пяти видам функций выполняются параллельно для определения той функции, у которой средняя ошибка аппроксимации наименьшая. Соответственно, по наименьшей средней ошибке аппроксимации определяется функция с наиболее приближенной аппроксимацией. Для определения коэффициентов *a* и *b* на этапах *3* и *4* требуется отдельный расчет, так как коэффициенты для каждого диагностического сообщения по каждой из пяти видов функции отличны друг от друга [148].

2.4 Модель прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений по оборудованию

Модель определения коэффициентов a и b на примере линейной функции представлена на рисунке 2.9; для каждой функции процесс определения идентичен и зависит только от заложенных в узлы математических функций, которые построены на платформе интеллектуального анализа KNIME Analytics Platform [150, 151].

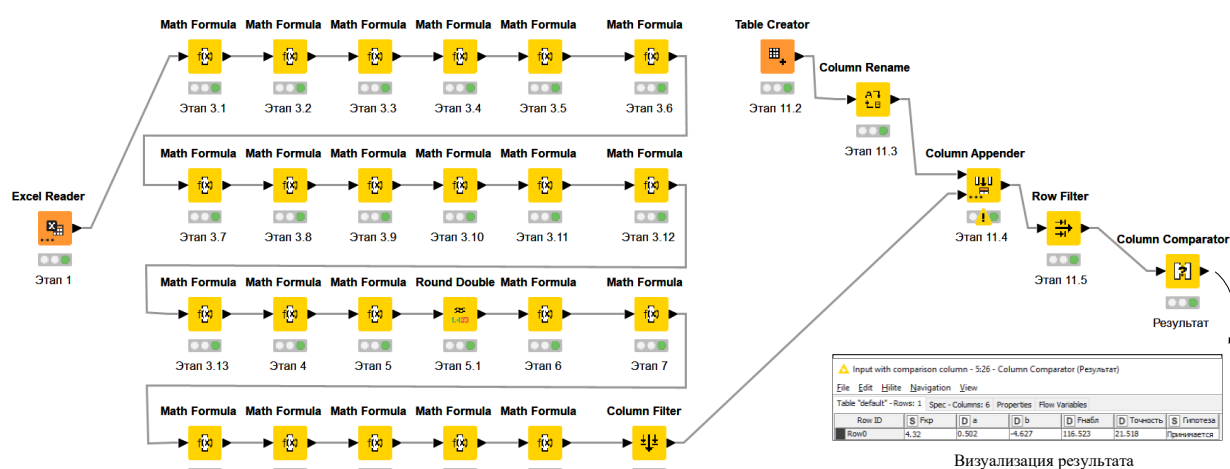


Рисунок 2.9 – Модель определения коэффициентов a и b

Расшифровка модели определения коэффициентов аппроксимирующей функции (рисунок 2.9) следующая: на первом этапе загружаются полученные диагностические сообщения и точно подтвердившиеся по одному типу. На этапах 3.1–11.1 производятся математические последовательные расчеты согласно теории регрессионного анализа по определению коэффициентов a и b , а также преобразования числовых значений в табличный вид для минимизации объема расчета. На этапах 11.2–11.5 добавляются эталонные значения таблицы А.1. На этапе «Результат» обобщаются и визуализируются полученные значения коэффициентов a и b .

Повторение такого цикла для каждого диагностического сообщения, а их всего 94, позволило определить коэффициенты для дальнейшего расчета и

использования их в модели прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений (приложение Б, рисунок Б.1).

В модель прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений по оборудованию заложены пять видов функций по алгоритмам рисунков 2.7 и 2.8. На этапе 1 загружаются полученные диагностические сообщения. Этапы 2–7 обеспечивают предварительный перевод статистических данных в табличный вид (для упрощения и облегчения расчета). На этапах 8.1–10.1 выполняется аппроксимация линейной функцией, 8.2–10.2 – логарифмической, 8.3–10.3 – степенной, 8.4–10.4 – экспоненциальной, 8.5–10.5 – гиперболической. Этапы 10.5–11 обеспечивают дополнительное преобразование таблицы для последующего обобщения результатов на этапе 12. Этап 13 визуализирует результаты аппроксимации по всем пяти функциям (рисунок 2.10).



Рисунок 2.10 – Графики аппроксимации диагностического сообщения

На рисунке 2.10 представлен график по пяти аппроксимирующим функциям, оптимальный выделен красным цветом. Его расположение относительно практических данных приближеннее, вследствие чего величины на этой кривой обозначают прогнозные значения по отношению к практическим данным.

2.5 Эффективность и результаты процесса прогнозирования

Для каждого диагностического сообщения определена функция аппроксимации, которая приближенно отражает достоверный результат. Для каждой функции аппроксимации рассчитаны коэффициенты a и b , которые следует корректировать один раз в год, учитывая эксплуатационный износ оборудования. На старом оборудовании количество диагностических сообщений может увеличиваться, а при замене оборудования на новое – уменьшаться. На примере результата моделирования экспоненциальной функцией диагностического сообщения «БВ не включен. Не замкнуто ДР ТЭД» (расшифровка: быстродействующий выключатель не включен. Не замкнуто дифференциальное реле тяговых электродвигателей) представлен график аппроксимации (рисунок 2.11).

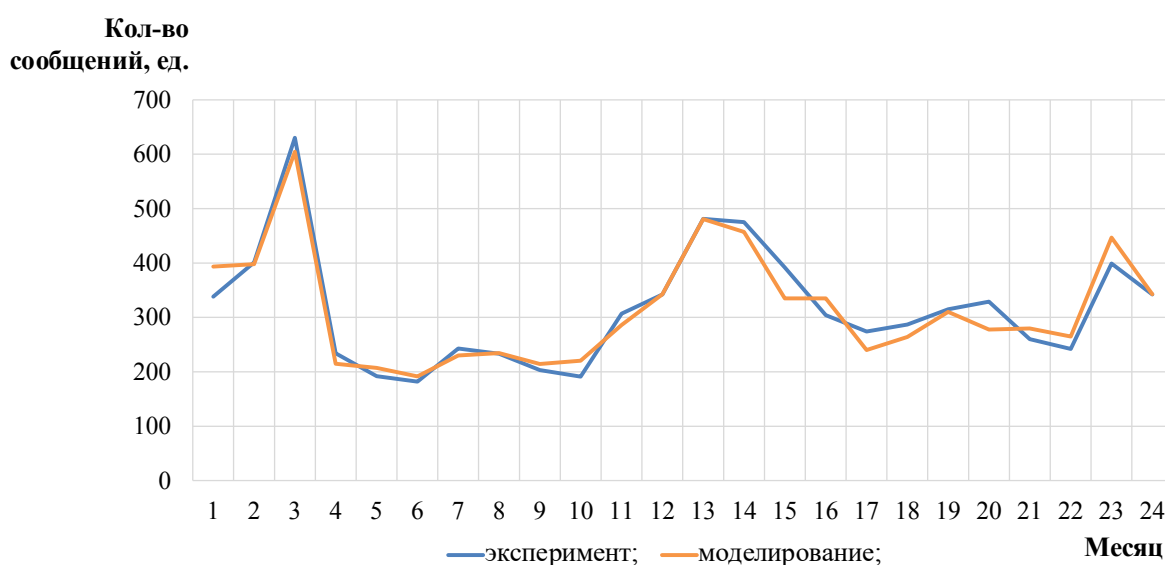


Рисунок 2.11 – Результат моделирования диагностического сообщения

Кривая моделирования регистрации достоверного значения диагностического сообщения в большей степени повторяет изгиб кривой экспериментальных значений (действительно полученных) за 24 месяца. Расхождение результата моделирования от эксперимента находится на уровне 7,46 %, что

удовлетворяет высокой точности модели. Но не все диагностические сообщения имеют высокий уровень точности. С высоким уровнем точности (менее 10 %) аппроксимируется 10 диагностических сообщений, со средним (10–20 %) – 37 ед., с низким (20–50 %) – 29 ед. и с точностью более 50 % – 18 диагностических сообщений [152].

Таким образом, абсолютно достоверными следует считать диагностические сообщения, которые попадают в интервал точности от 0 до 20 % – 47 диагностических сообщений, и менее достоверными, которые следует перепроверять специалисту Центра мониторинга, – от 20 % и выше – 47 диагностических сообщений.

2.6 Выводы по главе 2

1 Регистрации диагностических сообщений характерна сезонность. Отмечаются точки перегиба в регистрации диагностических сообщений при изменении времени года с зимы на весну. Анализ регистрации диагностических сообщений по временам годам позволяет оценить характер работы оборудования при изменении климатических условий. Отмечается концентрация накопления критических диагностических сообщений по ТЭД.

2 Классическая теория вероятности позволила определить возможность прогнозирования диагностических сообщений; уровень каждого диагностического сообщения показал, что прогнозирование регистрации таких сообщений возможно.

3 Применение теории регрессионного анализа при аппроксимации действительных значений количества диагностических сообщений пятью функциями позволяет выявить тенденции отклонения при построении кривой. Это дает возможность оценить характер расположения следующих значений относительно действительно зарегистрированных.

4 Модель прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщения построена с использованием современного инструмента интеллектуального анализа, что дает возможность реализации сложных логических преобразований.

5 Эффективность модели высокая; с учетом кластеризации диагностических сообщений по интервалам точности появляется возможность половину от всех диагностических сообщений анализировать только при уже возникшей неисправности и опираться на такие сообщения при их регистрации как на достоверные, в результате оперативность в принятии решений увеличивается в два раза.

3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

3.1 Определение критериев в диагностических данных тяговых электродвигателей

Для поиска критериев в диагностических данных файлов РПМ, по которым стоит задача мониторинга технического состояния ТЭД, анализировались две группы локомотивов [153, 154]. В первую отобраны локомотивы с такими электрическими повреждениями ТЭД, как прогар и обрыв обмоток возбуждения, компенсационных обмоток и обмоток дополнительных полюсов, низкое сопротивление изоляции обмоток якоря и обмоток возбуждения. Вторая группа – локомотивы с исправными ТЭД.

При оценке изменения значений токов якорей и токов возбуждения определена их некоторая зависимость в виде разницы значений между смежными тележками по электровозам с неисправностью ТЭД (рисунки 3.1, 3.2) [154–158].

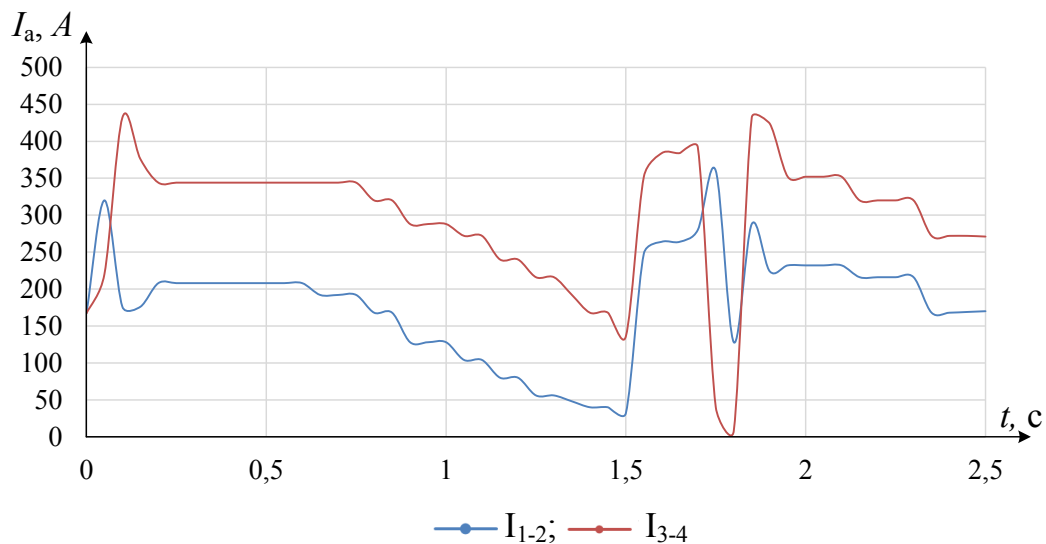


Рисунок 3.1 – Разница значений тока якоря между смежными тележками с неисправным тяговым электродвигателем (фрагмент)

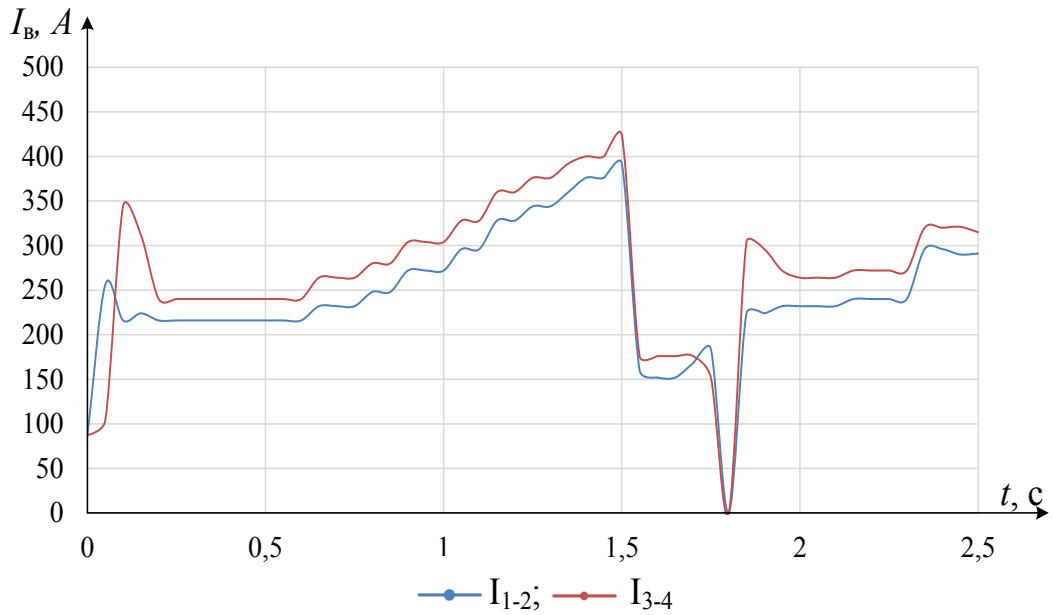


Рисунок 3.2 – Разница значений тока возбуждения между смежными тележками с неисправным тяговым электродвигателем (фрагмент)

На рисунках 3.1 и 3.2 отмечена средняя разница тока якоря между смежными тележками ТЭД в 162 А по току возбуждения в 34 А. В интервале 1,75–1,85 с произведен переход с 44-й позиции на 45-ю. При этом в следующий момент регистрации сигналов зафиксировано срабатывание аппаратов защиты [155]. Положение графика по току якоря 1-го и 2-го ТЭД должно повторять контур графика 3-го и 4-го ТЭД; здесь наблюдается работа ТЭД 1 и 2 в зоне развития потенциальной неисправности.

В анализируемой первой группе локомотивов до момента отключения ТЭД локомотивной бригадой именно такие случаи приняты как начало возникновения неисправности; отмечена разница токов якорей $\Delta I_a = \pm 150$ А и более. Данное значение получено по формуле (3.1) [156]

$$\Delta I_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |I_{a_{i,1,2}} - I_{a_{i,3,4}}|, \quad (3.1)$$

где $I_{a_{i,1,2}}$ – ток якоря пары ТЭД 1 и 2 в момент i ;

$I_{a_{i,3,4}}$ – ток якоря пары ТЭД 3 и 4 в момент i ;

n – количество значений, зарегистрированных в рассматриваемом интервале времени.

Аналогично формуле (3.1) рассчитана разница токов возбуждения:

$$\Delta I_{\text{в}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |I_{\text{в},1,2} - I_{\text{в},3,4}|, \quad (3.2)$$

где полученное значение разницы по току возбуждения определено на уровне $\Delta I_{\text{в}} = \pm 70$ А. Основная доля разницы токов якорей и возбуждения отмечена на 45-й позиции параллельного соединения и 65-й ходовой позиции. Также разница по току якоря между смежными тележками наблюдается на каждой позиции трех соединений ТЭД, то есть имеются одиночные изменения, не характеризующие аномальную работу.

При анализе второй группы локомотивов по исправным ТЭД также отмечена разница по току якоря между смежными тележками, которая не превышала $\Delta I_{\text{а}} = \pm 150$ А, а по току возбуждения $\Delta I_{\text{в}} = \pm 70$ А.

Статистика выявленной разницы токов якоря между смежными тележками ТЭД в одной секции по позициям соединений представлена в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Статистика разницы тока якоря между смежными тележками

Соединение	Последовательно-параллельное	Параллельное		Последовательное, последовательно-параллельное, параллельное
		45	65	
Позиция	44	45	65	остальные позиции
Неисправные тяговые электродвигатели				
Средний процент, где отмечена разница по току якоря, %	8	49	26	17
Среднее значение разницы по току якоря, А	259	181	149	160
Исправные тяговые электродвигатели				
Средний процент, где отмечена разница по току якоря, %	11	42	29	18
Среднее значение разницы по току якоря, А	140	146 А	119 А	160

По данным таблицы 3.1 можно сделать следующее заключение: основная доля разницы по току якоря в среднем составляет 181 А по неисправным

ТЭД на 45-й позиции параллельного соединения в 49 % случаях. По ТЭД без замечаний есть разница токов якоря со средним значением в 146 А между смежными тележками на 45-й позиции в 42 % случаях. Таким образом, в создании модели будут использованы параметры по разнице токов якоря и возбуждения между смежными тележками [157, 158].

На втором этапе анализа определены значительные расхождения в коэффициентах корреляции между параметрами I_a и $R_{\text{изол}}$, I_b и $R_{\text{изол}}$, I_a и I_b [160]. При нормальной работе ТЭД значения сопротивления изоляции постоянны и фиксируются на отметке в 29,92 МОм, так как диапазон измерения мегомметром МГМ-1 АВМЮ.411611.001 находится в пределах 0–30 МОм, либо при возникновении отклонений значения сопротивления изоляции начинают изменяться (рисунок 3.3) [159, 160].

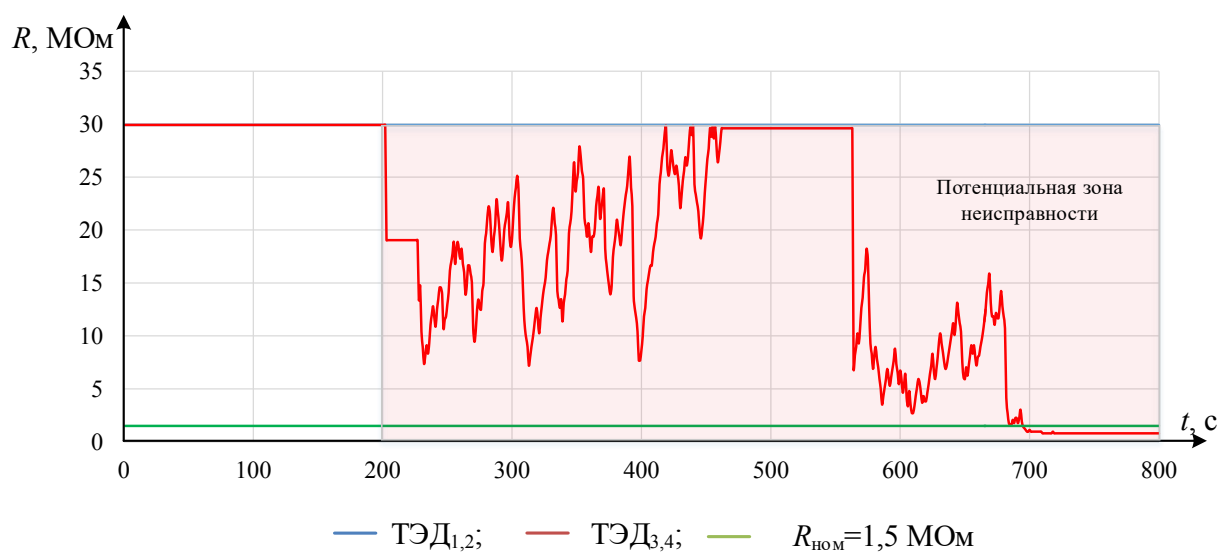


Рисунок 3.3 – Регистрация значений сопротивления изоляции

ТЭД_{1,2} – тяговые электродвигатели первой тележки; ТЭД_{3,4} – тяговые электродвигатели второй тележки

Так, определена потенциальная зона возникновения неисправности, в которой существенно изменяются значения сопротивления изоляции ТЭД (рисунок 3.3). Определить тренд направленности нельзя, так как значения изменяются хаотично, при этом данную зону стоит использовать при уста-

новлении корреляционной связи между параметрами, в которой можно определить начало предотказной работы ТЭД [161].

С помощью анализа корреляционной связи между параметрами определены границы значений нормальной работы и зоны предотказного состояния ТЭД обеих рассматриваемых групп локомотивов (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Границы корреляционной связи между диагностическими сигналами

Состояние тягового электродвигателя	Корреляционная связь		
	между I_a и $R_{\text{изол}}$	между I_b и $R_{\text{изол}}$	между I_a и I_b
Исправный	1 – не определяется; 2 – определяется в границах $[0;0,01]$	1 – не определяется; 2 – определяется в границах $[-0,2;0,2]$	
Прогар компенсационных обмоток и обмоток дополнительных полюсов	Определяется в границах $[0; -0,2]$	Определяется в границах $[-0,2;0,2]$	Определяется в границах $[0,4;0,7]$
Прогар обмоток возбуждения	1 – не определяется; 2 – стремится к ± 1	Стремится к ± 1	1 – определяется в границах $[0,7;1]$; 2 – разница между коэффициентами корреляции более 20 %
Низкое сопротивление изоляции	Определяется в границах $[-0,3;0,3]$		Определяется в границах $[0,4;0,7]$

Результаты исследования (таблица 3.2) при моделировании процесса предиктивной диагностики служат базовыми условиями для оценки технического состояния ТЭД [162–164].

3.2 Построение модели определения технического состояния тяговых электродвигателей

В расширенной модели определения технического состояния ТЭД (приложение В, рисунок В.1) использованы 162 логически связанных узла. Для визуализации группы узлов объединены в 11 Meta Nodes (рисунок 3.4).

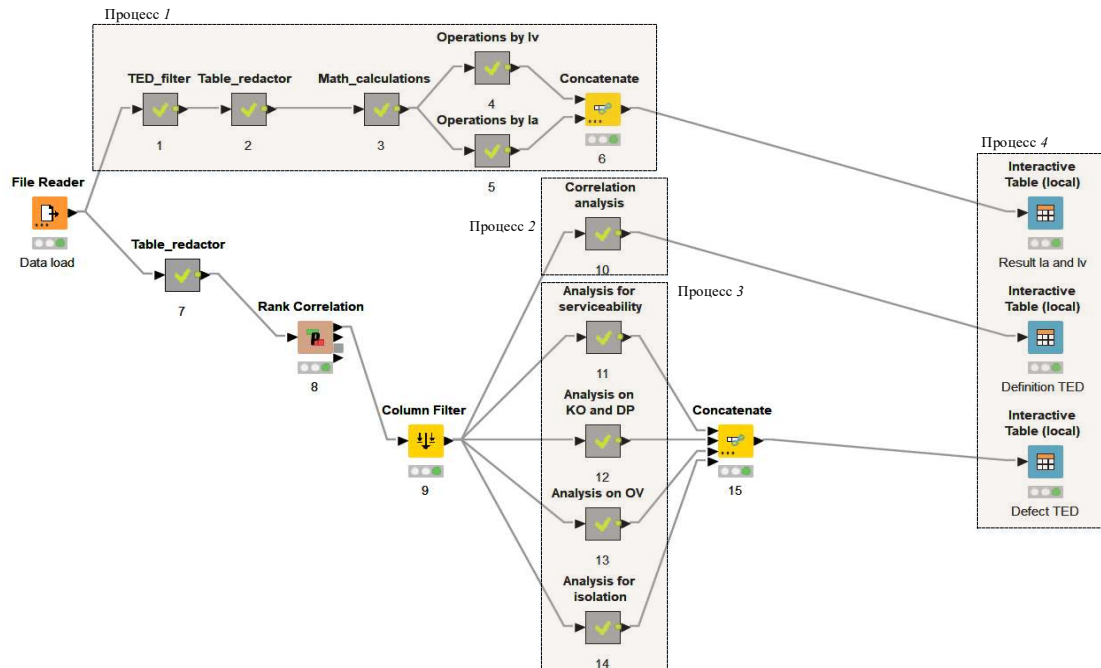
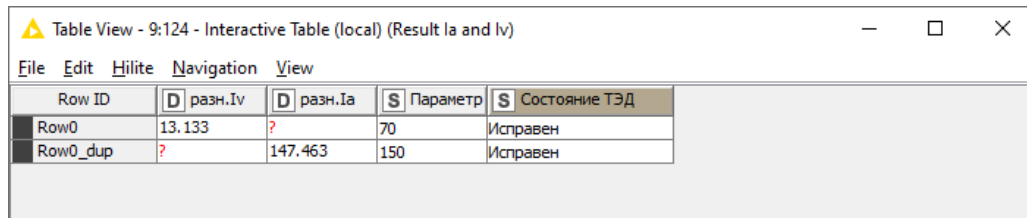


Рисунок 3.4 – Модель определения технического состояния тяговых электродвигателей

Удобство объединения групп узлов в Meta Nodes позволяет ее визуализировать в упрощенном виде (рисунок 3.4). Узел File Reader «data load» загружает данные, преобразует их в вид по указанным пользователем условиям. Meta Node 1 «TED_filter» обеспечивает фильтр по каждому ТЭД, т.е. выбирает только те ТЭД, которые включены в схему соединения. Meta Node 2 «Table_redactor» выполняет промежуточные операции с входной таблицей. Meta Node 3 «Math_calculations» выполняет математические операции по формулам (3.1) и (3.2). Meta Node 4 «Operations by Iv» выполняет промежуточные операции по фильтрации требуемых значений, добавляет условие в 70 А по току возбуждения, обеспечивает сравнение полученного значения разницы по току

возбуждения между смежными тележками с условием. Meta Node 5 «Operations by Ia» выполняет аналогичные операции (как в Meta Node 4 «Operations by Iv») только по значениям тока якоря. Узел Concatenate 6 обеспечивает консолидацию полученных результатов. Узел Interactive table (local) «Result Ia and Iv» визуализирует результаты процесса расчета разницы по току якоря и возбуждения между смежными тележками (рисунок 3.5) [156].

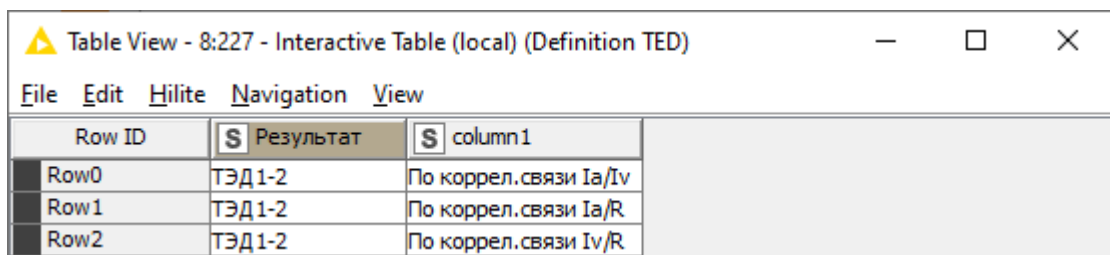


Row ID	D разн.Iv	D разн.Ia	S Параметр	S Состояние ТЭД
Row0	13.133	?	70	Исправен
Row0_dup	?	147.463	150	Исправен

Рисунок 3.5 – Результаты вычисления разницы по току якоря и возбуждения между смежными тележками тяговых электродвигателей

Итак, по току возбуждения определена разница между смежными тележками – 13,133 А, по току якоря – 147,463 А, в итоге модель признает, что состояние ТЭД по обоим условиям исправное.

Meta Node 7 «Table_redactor» выполняет подготовку входной таблицы к следующему этапу. Узел 8 «Rank Correlation» обеспечивает расчет ранговой корреляции. Узел 9 «Column filter» выбирает только нужные пары по установленным параметрам таблицы 3.2. Meta Node 10 «Correlation analysis» анализирует разницу между рассчитанными коэффициентами корреляции, определяет на выходе предполагаемую неисправную пару ТЭД. Узел Interactive table (local) «Definition TED» визуализирует результаты (рисунок 3.6).



Row ID	S Результат	S column1
Row0	ТЭД1-2	По коррел.связи Ia/Iv
Row1	ТЭД1-2	По коррел.связи Ia/R
Row2	ТЭД1-2	По коррел.связи Iv/R

Рисунок 3.6 – Результаты по визуализации потенциально неисправной пары тяговых электродвигателей

По трем парам параметров определяется потенциально неисправная пара ТЭД (рисунок 3.6).

Meta Node 11 «Analysis for serviceability» обеспечивает проверку тяговых электродвигателей на исправное состояние. Meta Node 12 «Analysis on KO and PD» обеспечивает проверку ТЭД по поиску неисправности по прогару, обрыву компенсационной обмотки и обмотки дополнительного полюса. Meta Node 13 «Analysis on OV» – по поиску неисправности по прогару, обрыву обмотки возбуждения. Meta Node 14 «Analysis for isolation» – по причине низкого сопротивления изоляции. Узел Concatenate 15 собирает результаты расчетов по выполненным операциям с Meta Node 11 по 14. Узел Interactive table (local) «Defect TED» визуализирует предполагаемые неисправности по тяговым электродвигателям (рисунок 3.7).

Ro...	D Результат...	S column1
1	0.667	Вероятность исправности
1...	0.667	Вероятность прогара (обрыва) КО и ДП
1...	1	Вероятность прогара (обрыва) ОВ
1...	1	Вероятность низкого сопротивления изоляции

Рисунок 3.7 – Результаты по визуализации предполагаемой неисправности тяговых электродвигателей

Определение вероятности предполагаемой неисправности оценивается от 0 до 1; к сведению принимаются те неисправности, где вероятность равна 1 (рисунок 3.7).

Таким образом, модель определения технического состояния ТЭД обеспечивает вывод результатов по условию определения разницы токов якоря и возбуждения между смежными тележками, вывод результата потенциально неисправной пары и предполагаемой неисправности с вероятностью ее возникновения.

3.3 Результаты моделирования процесса определения технического состояния тяговых электродвигателей

Верификация модели проведена на контрольной группе локомотивов с уже подтвержденной причиной неисправности ТЭД; файлы РПМ были загружены в модель определения технического состояния ТЭД (рисунки 3.8–3.11).

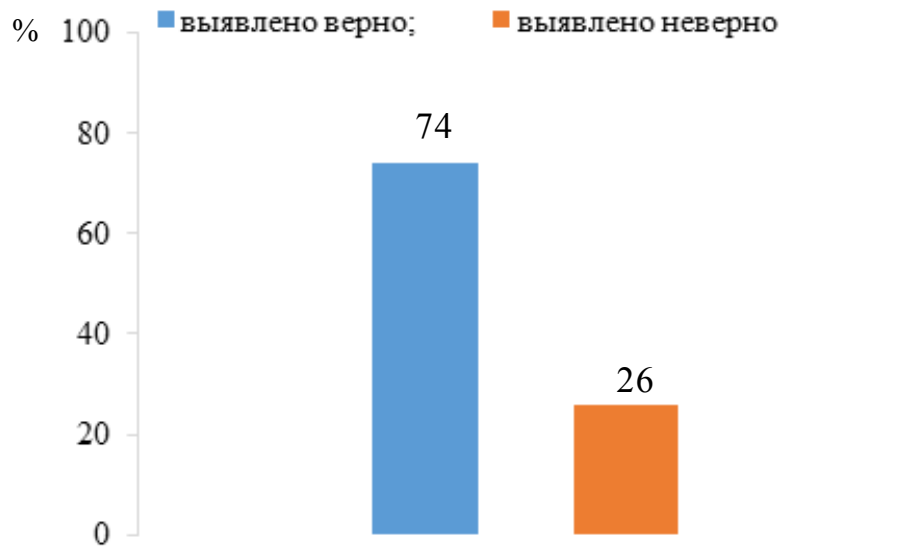


Рисунок 3.8 – Результаты оценки технического состояния тягового электродвигателя по разнице тока якоря между смежными группами, %

Техническое состояние ТЭД по разнице тока якоря между смежными тележками определено верно в 74 % случаев. Высокий результат позволяет классифицировать состояние как исправное и неисправное. Разница по току возбуждения является косвенным фактором, по которому окончательная оценка не выносилась.

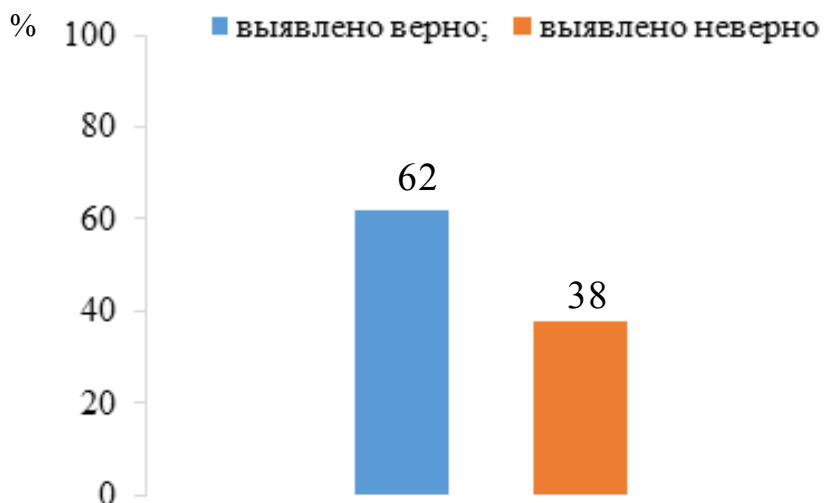


Рисунок 3.9 – Результаты моделирования при определении потенциально неисправной пары тяговых электродвигателей, %

Потенциально неисправная пара ТЭД определена верно в 62 % случаев, при этом верно определенная пара позволит своевременно отключить ТЭД во время эксплуатации и избежать развития неисправного состояния.

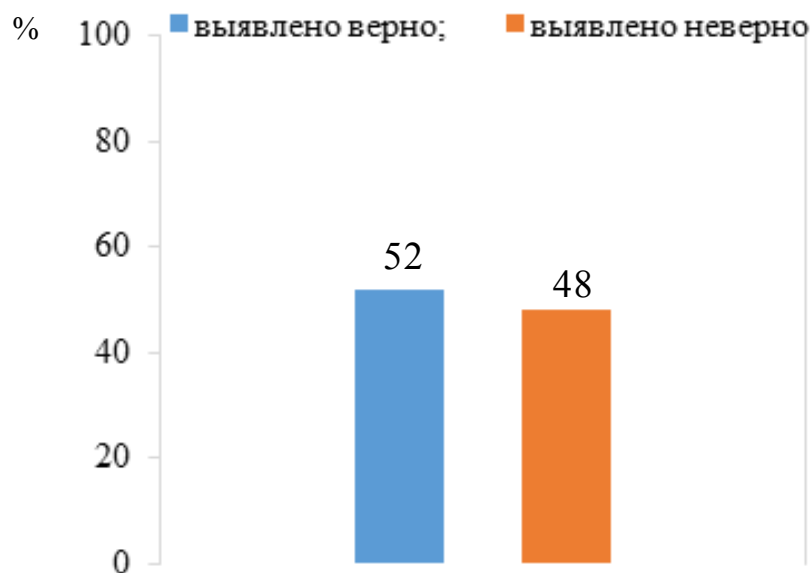


Рисунок 3.10 – Результаты моделирования при определении потенциальной неисправности тягового электродвигателя, %

Верно определена неисправность ТЭД в 52 % случаев. Предиктивное определение вида неисправности позволит своевременно организовать тех-

нические мероприятия по устранению неисправности по факту захода электровоза на ПТТОЛ или СЛД.

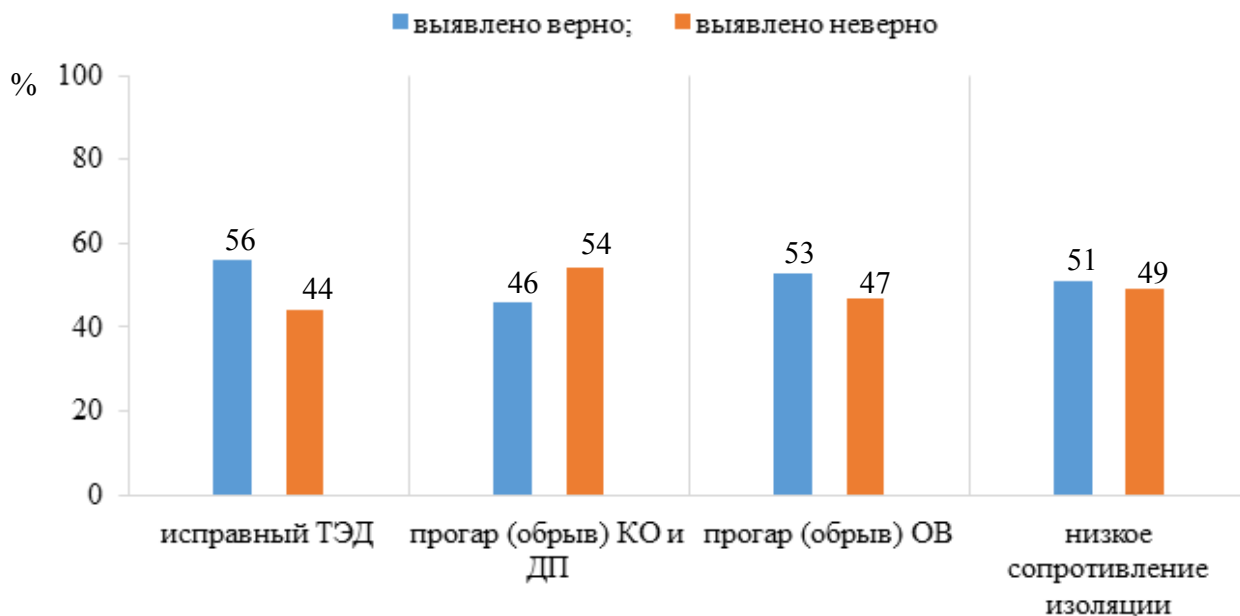


Рисунок 3.11 – Результаты моделирования при определении причины неисправности/исправности тягового электродвигателя %
ТЭД – тяговый электродвигатель; КО – компенсационная обмотка; ДП – дополнительный полюс; ОВ – обмотка возбуждения

Так, по результатам моделирования отмечены пограничные значения, то есть по трем причинам неисправности тяговых электродвигателей результаты находятся на уровне достоверности 46–53 %. Исправное состояние в 56 % случаев определено верно. Повысить результаты достоверности можно изменив и расширить условия по корреляционной связи.

3.4 Выводы по главе 3

1 Критерии в диагностических данных по ТЭД в виде разницы токов якорей и возбуждений являются базовыми входными параметрами в модели определения технического состояния ТЭД. Вторые важные параметры – значения корреляционной связи между группами диагностических сигналов. При условии дискретности регистрации диагностических сигналов в 0,05 с повышается точность моделирования и определение начала работы ТЭД в зоне развития потенциальной неисправности. Значения токов возбуждения применимы только при работе электровоза на серийно-параллельном и параллельном соединении и возникновении неисправности на этих соединениях.

2 Модель определения технического состояния состоит из четырех крупных процессов. Первый – это процесс расчета разницы по току якоря между смежными тележками ТЭД. Второй – это расчет по корреляционной связи между парами диагностических сигналов. Третий – это процесс определения конкретной неисправности или исправного состояния с выдачей значения вероятности возникновения неисправности. Четвертый – это общая консолидация и визуализация результатов моделирования.

3 Результат оценки технического состояния ТЭД находится на высоком уровне (74 %). Повысить это значение можно при нахождении дополнительных критериев и внесении их в модель. Перспектива повышения результатов моделирования по определению конкретной причины неисправности высокая, достижима при обработке дополнительных причин и сужении интервалов по корреляционной связи между группами диагностических сигналов.

4 СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЛИМИТИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОВОЗА ПО ДАННЫМ ИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

4.1 Предпосылки к разработке способа и написанию программного обеспечения

При эксплуатации лимитирующих компонентов электровоза (электрографитовые щетки ТЭД, полз токоприемника) параметры колесных пар электровоза ограничены предельными геометрическими размерами по своему механическому износу. Их техническое состояние определяется визуально при постановке электровоза на ПТОЛ или СЛД. Проводятся замеры и визуальная оценка состояния оборудования и принимается решение по выдаче в эксплуатацию или проведении замены [165–167]. Профессиональный подход ремонтного персонала приводит к замене таких элементов (при их предельном износе). Не всегда человек принимает верное решение, что может повлечь за собой последовательность возникновения неисправности оборудования в эксплуатации [167].

Для минимизации влияния человеческого фактора на возникновение неисправностей оборудования предлагается способ определения остаточного ресурса лимитирующих компонентов электровоза с помощью разработанного соискателем программного обеспечения АСР ОР [168].

Программа написана на языке программирования Python. Интерфейс программы при ее запуске предлагает пользователю ввести номер секции электровоза, текущий пробег электровоза в тыс. км, дату проведения замеров для конкретного элемента электровоза (рисунок 4.1) [168–170].

Расчет остаточного ресурса

Введите номер секции

322A

Введите пробег в тыс.км:

650000

Дата проведения замеров

30.05.2019

Подтвердить данные Изменить данные

Колесная пара 1

Колесная пара 2

Колесная пара 3

Колесная пара 4

Щетки двигателя и токоприемник

Выход

Рисунок 4.1 – Диалоговое окно программы при ее запуске

Далее вводятся необходимые параметры (рисунки 4.2, 4.3). Для колесной пары – значения толщины и крутизны гребня, толщины бандажа, для электрографитовых щеток ТЭД – минимальная высота щетки для одного ТЭД, так как в коллекторном двигателе установлено восемь щеток [171] (вводится минимальное значение). Для полоза токоприемника вводится его толщина относительно места установки на контактную поверхность токоприемника.

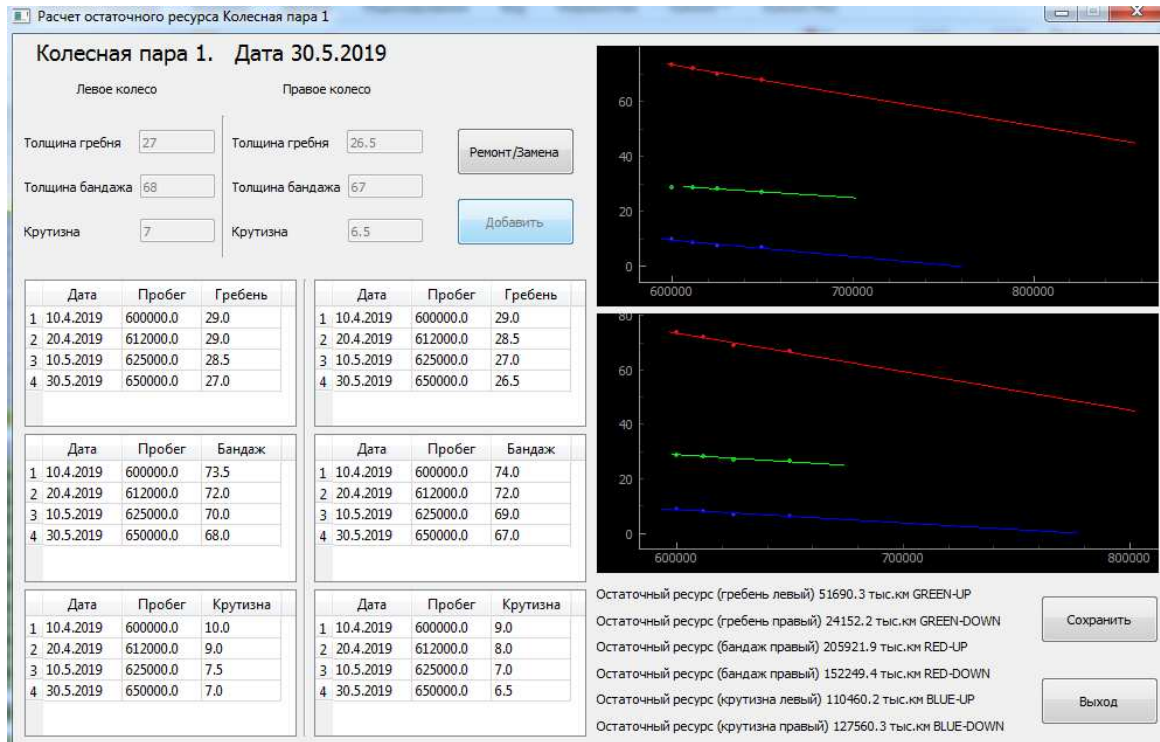


Рисунок 4.2 – Диалоговое окно ввода значений для параметров колесной пары

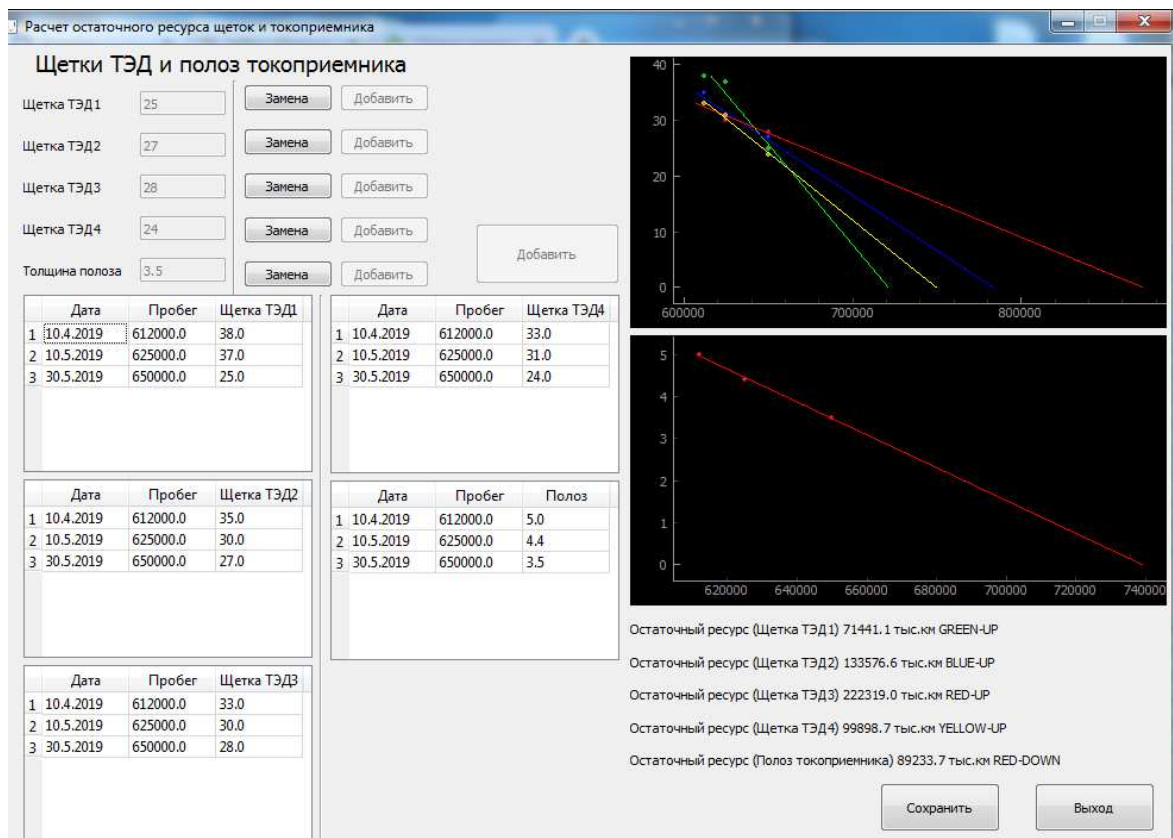


Рисунок 4.3 – Диалоговое окно ввода значений для электрографитовых щеток и полза токоприемника

В левой части диалоговых окон (рисунки 4.2, 4.3) отображается история ввода значений для конкретной секции электровоза с учетом пробега на дату замера. В правой представлены построенные прямые. В нижней части программы отображается результат – остаточный ресурс, выражающийся в оставшемся пробеге. Имеется функция сохранения результатов [172].

Ввод значений для секций электровоза не ограничен. Окно индикации значений позволяет просматривать предыдущую информацию. Результаты расчета сохраняются, при последующем вводе значений для секции электровоза результат расчета обновляется. Есть возможность просмотра результатов расчета без намеренного ввода значений.

4.2 Математическая основа программного обеспечения и возможности ее развития

В основе расчета в программном обеспечении по определению остаточного ресурса лимитирующих элементов заложен метод наименьших квадратов [147, 148]. Преимущество его применения заключается в линейной аппроксимации вводимых значений до точки предельного параметра для конкретного элемента. Для лимитирующих элементов определены предельные значения по износу для каждого параметра (таблица 4.1) [173, 174].

Таблица 4.1 – Предельные значения износа лимитирующих элементов для каждого параметра

Лимитирующий элемент	Параметр	Предельное значение, мм
Колесная пара	Толщина гребня	Не менее 25
	Крутизна гребня	Не менее 6
	Толщина бандажа	Не менее 45
Электрографитовая щетка	Высота щетки	28
Полоз токоприемника	Толщина полоза	Летнее время – 2,5
		Зимнее время – 3,5

Предельные значения (таблица 4.1) заложены в основу расчета программного обеспечения. Для толщины полоза токоприемника есть два предельных значения. В программу заложено летнее (с 1 апреля по 1 октября) и зимнее время (со 2 октября по 31 марта). Функция сохранения истории вводимых результатов позволяет на основе этих данных спрогнозировать положение аппроксимирующей прямой относительно вводимых геометрических замеров. Аппроксимирующая прямая при пересечении с прямой относительно предельного значения образует точку пересечения прямых, перпендикуляр точки пересечения которой по оси абсцисс означает оставшийся пробег в тыс. км (рисунок 4.4) [172].

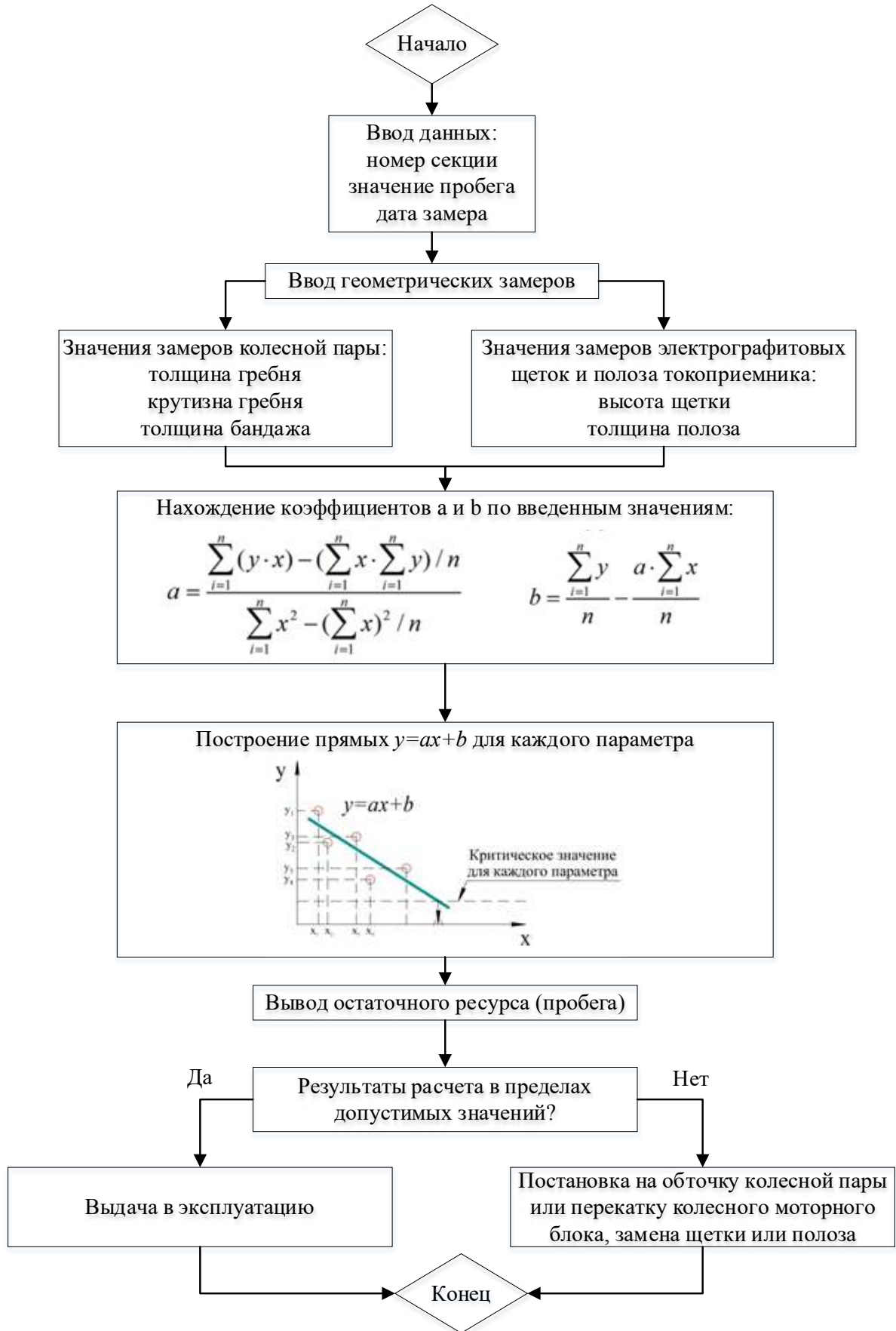


Рисунок 4.4 – Блок-схема расчета

Логика программы по расчету заканчивается на выводе результата. При отрицательном результате принимается решение на обточку колесной пары или перекатку колесно-моторного блока, замену электрографитовой щетки или полоза токоприемника. В данном случае минимизируются риски возникновения ошибок по возможной эксплуатации, снижается влияние человеческого фактора на правильность принимаемых решений [175, 176].

Программное обеспечение АСР ОР может быть интегрировано с модулем АРМ «Техник по замерам», системой АСУТ-Т и с АС «Электронный паспорт локомотива» в Центрах мониторинга [177]. Результаты расчетов и статистика износа и замены позволят формировать:

- план обточек колесных пар и перекаток колесно-моторных блоков;
- программу ремонта по замене электрографитовых щеток ТЭД и полозов токоприемника;
- потребность в приобретении электрографитовых щеток и изготовлении полозов.

Также можно применять АСР ОР в определении остаточного ресурса по колесным парам при интеграции с АСОК-Л. Это позволит расширить возможности бортовой диагностики современных локомотивов применительно к предиктивной диагностике механической части [178, 179].

4.3 Выводы по главе 4

1 Решение по постановке электровоза на обточку колесных пар, на замену электрографитовых щеток ТЭД, полоза токоприемника принимает ремонтный персонал. Для минимизации ошибок, вызываемых человеческим фактором, разработано программное обеспечение, позволяющее определить остаточный пробег.

2 Выбор метода наименьших квадратов при проведении расчетов обусловлен характеристикой линейной зависимости по износу лимитирующих элементов. Преимущества метода в том, что появляется возможность прогнозировать критический параметр на конкретную дату пробега при наличии базы геометрических замеров.

3 Интерфейс программного обеспечения легок и понятен пользователю. Возможность интегрирования в среду АСУЖТ ОАО «РЖД» прослеживается для уровня пользования в СЛД или на ПТОЛ. Комплексный подход обеспечивает цифровизацию производственных процессов.

5 ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

5.1 Выбор предприятия-разработчика

Реализация модели определения технического состояния ТЭД возможна при доработке существующего программного обеспечения состава МПСУиД электровозов 2ЭС6* (рисунок 5.1).

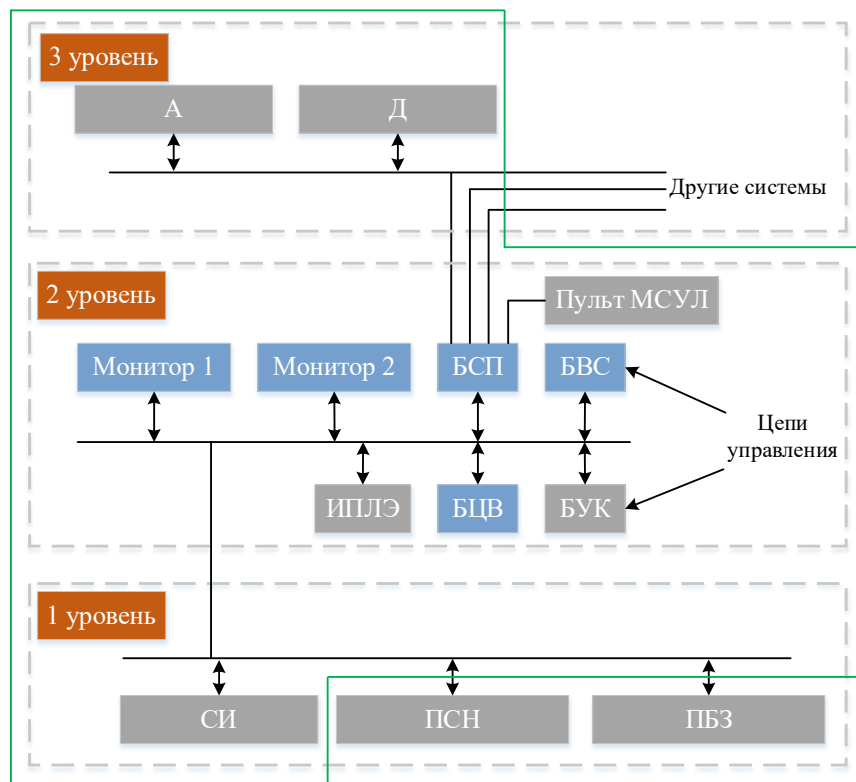


Рисунок 5.1 – Организация обмена информацией

подсистема А – подсистема автоведения; подсистема Д – подсистема диагностики; МСУЛ – пульт управления; BSP – блок связи с пультом управления электровозом; BVS – блок входных сигналов; ИПЛЭ – источник питания; БЦВ – блок центрального вычислителя; БУК – блок управления контакторами; пСИ – подсистема аналоговых измерений; ПСН – авторегулирование; ПБЗ – выявление боксования и юза

* Патентообладателем МПСУиД является ООО «Центр инновационного развития СТМ», работы по созданию системы проводили ООО «НПО САУТ» в содружестве с ОАО «ВНИИЖТ» [4, 180]. Эти компании могут реализовать разработанные модели в составе электровоза 2ЭС6 и серверном оборудовании Центров мониторинга. ООО «Научно-исследовательский центр СТМ», ООО «НПО САУТ» обладают производственными мощностями, квалифицированными программистами-конструкторами и расположены неподалеку от полигона обращения локомотивов 2ЭС6 [181, 182].

На рисунке 5.1 зеленой линией выделен состав МПСУиД. Доработка программного обеспечения требуется на втором уровне системы МСУЛ-А в составе блоков входных сигналов, связи с пультом, центрального вычислителя и мониторов [133, 134, 183]. Все последовательные математические операции рисунка 3.5 следует перенести в дополнительный модуль исходных файлов программирования [184]. Входными данными для модели служат аналоговые сигналы: значения токов якорей, токов возбуждения и сопротивления изоляции обмоток ТЭД, которые хранятся в энергонезависимой памяти блока центрального вычислителя. Модель принимает на входе эти значения и обрабатывает их в реальном времени. При наступлении одного из этапов (см. рисунки 2.7, 2.8) МПСУиД информирует локомотивную бригаду посредством индикации на мониторе. По соответствующим сообщениям локомотивная бригада принимает решение по отключению ТЭД и продолжению движения, не нарушая требований безопасности движения и правил эксплуатации электровоза.

Также модель следует встроить в серверное оборудование Центров мониторинга. Это позволит специалистам анализировать файлы РПМ, уже полученные с локомотивов, тем самым выявляя предостказ. Модель может быть выполнена как в составе программы Knime с самостоятельной загрузкой файлов, с соблюдений информационной безопасности по отслеживанию исходящего трафика, так и в составе программных продуктов ООО «СТМ-Сервис».

Модель прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений по оборудованию электровоза 2ЭС6 следует также установить отдельным модулем в серверном оборудовании Центров мониторинга. Такое решение сократит операции по взаимодействию нескольких программных продуктов. Последовательные операции (см. рисунки 2.7, 2.8) следует внедрить в рабочий код серверного оборудования. Задача данной модели – оперативно проанализировать поступающие в Центр мониторинга диагностиче-

ские сообщения. Специалист на основе полученных результатов примет решение и передаст соответствующую информацию ремонтным диспетчерам.

Внедрение программного обеспечения АСР ОР на рабочие места ПТОЛ или в СЛД подразумевает установку уже существующей программы и привязку программы АСУТ-Т к модулю АРМ «Техник по замерам»* [184]. Это возможно только после согласования с ОАО «РЖД».

* Установка обеих моделей программы АСР ОР может быть выполнена специалистами ООО «Научно-исследовательский центр СТМ» и ООО «СТМ-Сервис» [185].

5.2 Технологический эффект и этапы внедрения

Технологический эффект по разработанным моделям заключается в своевременном предотвращении предотказного состояния оборудования – определение его работы в потенциальной зоне возникновения неисправности [186]. Логическая последовательность просматривается в снижении возникающих неисправностей в эксплуатации (снижение ОТС, поездо-часов задержек от ОТС, снижение неплановых ремонтов). Применение моделей в эксплуатации не допустит возникновения ошибочных результатов и, как следствие, преждевременных отцепок локомотивов от составов, значит, и уменьшит непроизводительный простой локомотивов [187].

Применение модели прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений в Центре мониторинга позволяет повысить достоверность анализируемой диагностической информации на основе выделения ключевых моментов по работе оборудования, снижения трудозатрат на расширенный анализ поступающих диагностических сообщений (высвобождаемое время позволяет человеку повысить точность и масштабность анализируемых данных).

Применение модели определения технического состояния тяговых электродвигателей как на электровозе, так и в Центре мониторинга позволяет выявить их работу в потенциальной зоне возникновения неисправности, за счет чего оперативно принимается решение по эксплуатации ТЭД (отключение из схемы электровоза, запрос вспомогательного электровоза), предотвращается развитие неисправности в ТЭД, которое может привести к высокому ущербу [188].

За 2019–2020 гг. на восемь неплановых ремонтов приходится один ОТС различных категорий. Ущерб по поездо-часам задержек поездов всех категорий (грузовые, пассажирские, пригородные) выставляется сервисным компаниям. При применении модели определения технического ТЭД результат в снижении отказов технических средств по ним с электрическими по-

вреждениями достигнет уровня не менее 7 %, в снижении поездо-часов потерь от ОТС – не менее 5 %. Комплексный подход позволит снизить unplanned repairs по ТЭД на 3 % (минимизация развития высокого ущерба при оперативном прекращении его эксплуатации).

По программе АСР ОР технологический эффект прослеживается в оперативности принятия решений ремонтным персоналом, снижении ошибок человеческого фактора, где unplanned repairs по ТЭД и токоприемникам можно снизить на 2 %. Также технологический эффект от получаемой информации по остаточному ресурсу в пробеге колесных пар отмечается в своевременной постановке локомотивов на обточку колесных пар, снижении времени на их передислокацию в место обточки.

На рисунке 5.2 представлена концепция этапов внедрения разработанных моделей и способа.

Этап	Срок
1 Обоснование внедрения, планирование бюджета	12 мес.
2 Подготовка технических заданий	
3 Подготовка организационно-распорядительных документов	
4 Разработка экспериментальных дополнений, программы испытаний	6 мес.
5 Предварительная установка, промежуточные испытания	3 мес.
6 Рассмотрение промежуточных результатов, устранение несоответствий	2 мес.
7 Подконтрольная эксплуатация, согласование окончательных результатов	6 мес.
8 Подготовка нормативно-технической документации, дополнений	3 мес.
9 Тиражирование на локомотивный парк, серверное оборудование	12 мес.
Итого	44 мес.

Рисунок 5.2 – Этапы внедрения

Срок внедрения разработанных решений – 44 мес. Долговременные периоды (по 12 мес. для первых этапов) по обоснованию и планированию бюджета обеспечивают 25 % всего срока по организации внедрения моделей.

Значимый, девятый, этап со сроком 12 мес. обусловлен межремонтным пробегом локомотивов серии 2ЭС6 в 30 тыс. км со средним интервалом проведения текущего ремонта в объеме ТР-1 от 1,5 до 2 мес., тем самым за 12 мес. будет обеспечена 100%-ная установка программного обеспечения на весь локомотивный парк 2ЭС6.

5.3 Оценка экономической эффективности

Единовременные капитальные затраты K складываются из затрат на разработку и установку программного обеспечения модели определения технического состояния ТЭД для электровоза, затрат на разработку и установку программного обеспечения модели прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений в Центры мониторинга, доработку и установку программы АСР ОР на рабочие места ПТОЛ или СЛД (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Затраты на разработку и установку моделей и способа

Параметр	На разработку, руб.	На установку, руб.
Модель определения технического состояния тяговых электродвигателей	40 000 000	7 700 000
Модель прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений	6 000 000	1 000 000
Способ определения остаточного ресурса лимитирующих элементов (программа АСР ОР)	3 000 000	40 000

В расчете экономической эффективности применены рекомендации [189, 190]. Затраты на установку программного обеспечения модели определения технического состояния ТЭД, руб.:

$$K_{\text{уст.ТЭД}} = K_{\text{уст1.ТЭД}} \cdot N_{\text{сек.2ЭС6}}, \quad (5.1)$$

где $K_{\text{уст1.ТЭД}}$ – затраты на установку программного обеспечения модели определения технического состояния ТЭД на одну секцию;

$N_{\text{сек.2ЭС6}}$ – количество секций электровозов 2ЭС6.

По формуле (5.1) получаем:

$$K_{\text{уст.ТЭД}} = 3500 \cdot 2200 = 7700000 \text{ руб.}$$

Единовременные капитальные затраты, руб.:

$$K = K_{\text{раз.ТЭД}} + K_{\text{уст.ТЭД}} + K_{\text{раз.сообщ}} + K_{\text{уст.сообщ}} + K_{\text{дор.АСР}} + K_{\text{уст.АСР}}, \quad (5.2)$$

где $K_{\text{раз.ТЭД}}$ – затраты на разработку программного обеспечения (дополнения для электровоза) модели определения технического состояния ТЭД;

$K_{\text{уст.ТЭД}}$ – затраты на установку программного обеспечения модели определения технического состояния ТЭД на локомотивный парк 2ЭСб;

$K_{\text{раз.сообщ}}$ – затраты на разработку программного обеспечения (отдельного модуля серверного оборудования Центров мониторинга) модели прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений;

$K_{\text{уст.сообщ}}$ – затраты на установку программного обеспечения модели прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений в Центры мониторинга;

$K_{\text{дор.АСР}}$ – затраты на доработку программного обеспечения АСР ОР;

$K_{\text{уст.АСР}}$ – затраты на установку программного обеспечения АСР ОР на рабочие места пунктов технического обслуживания локомотивов и сервисных локомотивных депо одного полигона обращения локомотивов 2ЭСб;

По формуле (5.2) получаем:

$$K = 40000000 + 7700000 + 6000000 + 1000000 + 3000000 + 40000 = 57740000.$$

Чистая прибыль $\Pi_{\text{ч}}$ в результате внедрения программного обеспечения модели прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений, модели определения технического состояния ТЭД, способа определения остаточного ресурса лимитирующих элементов, руб.:

$$\Pi_{\text{ч}} = \Delta \mathcal{E}_{\Gamma} - \text{Н}_{\text{ПР}}, \quad (5.3)$$

где $\Delta \mathcal{E}_{\Gamma}$ – экономия годовых эксплуатационных расходов при внедрении;

$\text{Н}_{\text{ПР}}$ – налог на прибыль, формирующуюся в результате экономии эксплуатационных расходов.

Экономия годовых эксплуатационных расходов $\Delta \mathcal{E}_Г$, руб.:

$$\Delta \mathcal{E}_Г = \Delta \mathcal{E}_{\text{ОТС}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{НР}}, \quad (5.4)$$

где $\Delta \mathcal{E}_{\text{ОТС}}$ – экономия от снижения ОТС, в том числе экономия от поездочасов потерь от них;

$\Delta \mathcal{E}_{\text{НР}}$ – экономия от снижения количества неплановых ремонтов, а именно, снижение ущерба при развитии неисправности.

По формуле (5.4) получаем:

$$\Delta \mathcal{E}_Г = 6000000 + 4200000 = 10200000 \text{ руб.}$$

Налог на прибыль, формирующийся в результате экономии эксплуатационных расходов, руб.:

$$Н_{\text{пр}} = 0,2 \cdot \Delta \mathcal{E}_Г, \quad (5.5)$$

где 0,2 – ставка налога на прибыль (20 %).

По формуле (5.5) получаем:

$$Н_{\text{пр}} = 0,2 \cdot 10200000 = 2040000 \text{ руб.}$$

По формуле (5.3) получаем:

$$П_{\text{ч}} = 10200000 - 2040000 = 8160000 \text{ руб.}$$

Чистый доход, руб.:

$$\text{ЧД} = \sum_{t=0}^T (П_{\text{ч}} - \mathcal{Z}_t), \quad (5.6)$$

где T – горизонт расчета, принят равным 10 годам;

\mathcal{Z}_t – суммарные затраты, равны капитальным затратам K .

По формуле (5.6) получаем:

$$\text{ЧД} = (8160000 - 57740000) + 8160000 \cdot 9 = 23860000 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости – это период, начиная с которого первоначальные вложения и другие затраты покрываются суммарными результатами. Срок окупаемости без учета стоимости капитала:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{\Delta \mathcal{E}_{\Gamma}}. \quad (5.7)$$

По формуле (5.7) получаем:

$$T_{\text{ок}} = \frac{57740000}{10200000} = 68 \text{ мес.}$$

Применение модели определения технического состояния ТЭД, модели прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений, способа определения остаточного ресурса лимитирующих компонентов целесообразно, так как чистый доход за горизонт расчета 10 лет составил 23860000 руб., срок окупаемости – 68 мес.

5.4 Выводы по главе 5

1 Технологический эффект от внедрения заключается в снижении количества проводимых неплановых ремонтов по оборудованию за счет своевременного определения их работы в зоне потенциальной неисправности, что минимизирует ущерб. Период внедрения в 44 месяца обосновывается тем, что, учитывая локомотивный парк 2ЭС6 в 2200 секций, перепрограммирование отдельных модулей МПСУиД будет выполняться при проведении текущего ремонта ТР-1 с межремонтным периодом в 30000 км.

2 Экономическое обоснование определило, что срок окупаемости составляет 68 месяцев, а чистый доход с горизонтом расчета в 10 лет – 23860000 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены новые научно обоснованные технические решения и модели, направленные на расширение методов оценки технического состояния оборудования современных электровозов. Их применение позволит минимизировать возникновение ОТС и unplanned ремонтов по ТЭД и электрооборудованию. Расширение возможностей предиктивной диагностики обуславливает достижение целей в развитии цифровых технологий при обслуживании современных электровозов.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем.

1 Текущая ситуация развития unplanned ремонтов по ТЭД и электрооборудования электровозов 2ЭС6 находится в зоне повышенного внимания. Критическая ситуация напрямую сказывается на производительности грузового локомотивного парка 2ЭС6. Определение конкретных причин неисправностей, связанных с электрическими повреждениями в ТЭД, позволило установить, с помощью каких диагностических параметров существует возможность их контроля и заблаговременного нахождения. Основными параметрами для этого служат значения токов якорей и возбуждения, сопротивление изоляции обмоток. Существующие возможности бортовой диагностики электровозов 2ЭС6 обеспечивают расширенную регистрацию данных, объем такой диагностической информации колоссален, поэтому необходим автоматизированный подход определения ключевой информации.

2 Регистрация диагностических сообщений позволяет оценивать техническое состояние оборудования электровоза. Анализ накопленной информации позволил определить зависимости в их поступлении. Определены сезонность регистрации диагностических сообщений и уровень достоверности каждого. По уровню достоверности достигнуты результаты в прогнозировании регистрации именно достоверных диагностических сообщений. Разработанная модель прогнозирования регистрации достоверных диагностических

сообщений по электровозу, оборудованному МПСУиД, с использованием аппроксимирующих функций теории регрессионного анализа позволяет минимизировать время на проверку получаемой информации, повысить качество и ценность оперативных данных по техническому состоянию оборудования. Минимизируются риски влияния человеческого фактора на расшифровку и сопоставление диагностической информации при уточнении технического состояния.

3 В диагностическом объеме информации по ТЭД определены отличительные критерии в виде разницы тока якоря со значением ± 150 А между группами ТЭД, разницы корреляционной связи между некоторыми диагностическими параметрами при переходе работы в потенциальную зону возникновения неисправности. Такие критерии заложены в модель определения технического состояния ТЭД, которая позволяет уточнять исправное или неисправное состояние ТЭД, уточнять тип электрического повреждения, пару ТЭД с потенциальной неисправностью. Модель построена на современной платформе интеллектуального анализа, которая позволила применить всевозможные решения при построении логической структуры.

4 Обоснован способ определения остаточного ресурса (оставшийся пробег до замены, таких лимитирующих компонентов электровоза, как параметры колесных пар, электрографитовые щетки ТЭД, полоз токоприемника). Способ реализован в виде программного обеспечения АСР ОР, написанного на языке программирования Python. Использован метод наименьших квадратов. Входные значения для работы программы: геометрические замеры крутизны, толщины гребня, толщины бандажа, высота электрографитовой щетки и полоза токоприемника. Сравнение идет с минимальными геометрическими значениями для каждого из параметров. Программа позволяет определять остаточный пробег по факту имеющихся значений; своевременное планирование ремонтных работ – обточка колесных пар, перекатка колесно-моторных блоков, замена элементов – минимизирует случаи наступления предотказных состояний в эксплуатации.

5 Технологический эффект от внедрения разработанных моделей прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений, определения технического состояния ТЭД, способа определения остаточного ресурса лимитирующих компонентов электровоза просматривается в снижении количества проводимых неплановых ремонтов по оборудованию за счет своевременного определения их работы в зоне потенциальной неисправности, что сводит ущерб оборудования к минимуму. Экономический эффект просматривается в горизонте срока окупаемости в 68 мес. и чистого дохода на уровне 23 860 000 руб.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегия цифровой трансформации ОАО «РЖД» до 2025 года. Утверждена решением совета директоров ОАО «РЖД» от 25 октября 2019 г. (протокол № 5). М. : ОАО «РЖД», 2019. – 68 с.
2. Уральские локомотивы. URL: <https://ulkm.ru/kompaniya/> (дата обращения 08.09.2022).
3. Доманов, К.И. Эффективность эксплуатации электровозов 2ЭС6 на Урало-Сибирском регионе / К.И. Доманов, К.В. Богунов // Инновационные транспортные системы и технологии. – Омск. – 2023. – №1. – Т. 9. – С. 64–82.
4. Брексон, В.В. Электровоз 2ЭС6 «Синара» / В.В. Брексон / Верхняя Пышма : ООО «Уральские локомотивы», 2015. – 328 с.
5. Шантаренко, С.Г. Анализ причин отказов тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 / А.А. Бакланов, С.В. Малимон, В.В. Харламов, С.Г. Шантаренко // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : М-лы VI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. – Омск. – 2021. – С. 118–130.
6. Панов, К.В. Анализ неисправностей тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 / К.В. Панов / Транспорт-2015 : Труды Международн. науч.-практ. конф. – Ростов-на-Дону : РГУПС. – Т. 2. – С. 237–239.
7. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года. Утверждена советом директоров ОАО «РЖД» от 23 декабря 2013 г. № 19. – М. : ОАО «РЖД», 2013. – 40 с.
8. Стратегия обеспечения гарантированной безопасности и надежности перевозочного процесса в холдинге «РЖД». Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 8.12. 2015 № 2855р. – М. : ОАО «РЖД», 2015. – 47 с.
9. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга). Утвер-

ждена распоряжением ОАО «РЖД» от 17.04.2018 г. № 769/р. – М. : ОАО «РЖД», 2018. – 115 с.

10. Электровоз ВЛ80Р. Руководство по эксплуатации / под ред. Б.А. Тушканова. – М. : Транспорт, 1985. – 541 с.

11. Семченко, В.В. Опыт внедрения системы мониторинга технического состояния и режимов работы электровозов / В.В. Семченко, А.А. Мальцев, А.В. Раздобаров // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава : Труды Всеросс. науч.-практ. конф. с международ. участ. / под ред. И.К. Лакина. – Красноярск, 2020. С. 327–332.

12. Чмилев, И.Е. Микропроцессорная система управления и диагностирования электровозов ВЛ80Р МСУЭ / И.Е. Чмилев / Красноярск : Изд-во Дорожного центра внедрения Красноярской железной дороги. – 2011. – 64 с.

13. Семенов, А.П. Цифровое депо – технологическая основа цифровой трансформации локомотивного комплекса / О.С. Валинский, А.М. Лубягов, А.Н. Маврин, А.П. Семенов // Железнодорожный транспорт. – 2020. №3. – С. 26–32.

14. Юренко, К.И. «Умный локомотив» как элемент интегрированной системы «Цифровая железная дорога» / К.И. Юренко, П.А. Харченко, И.К. Юренко // Вестник молодежной науки России. – 2019. №1. – С. 3.

15. Коваленко, М.О. Умный локомотив / М.О. Коваленко, М.Е. Федосеев, Б.А. Либерман // Инженерия в строительстве и транспорте. Актуальные исследования в современной науке : М-лы научн.-практ. конф. студ. и аспирантов Липецкого гос. универ. – Липецк. – 2020. С. 190–192.

16. ЦНТИБ – филиал ОАО «РЖД». Пилотный проект «Цифровое депо» в Вихоревке // Локомотив. – 2020. №2(758). – С. 2.

17. Семенов, А.П. Реализация проекта «Цифровое депо» и «Универсальная ремонтная позиция» / А.П. Семенов // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного со-

став : Труды Всеросс. научн.-практ. конф. с междунаро­д. участ. / под ред И.К. Лакина. – Красноярск, 2020. С. 71–81.

18. Семенов, А.П. Цифровизация ремонтного производства тягового подвижного состава / А.П. Семенов, Д.В. Казарин // Вестник УрГУПС. – 2020. №1(45). – С. 93–103.

19. Серяков, К.О. Анализ показателей эксплуатации и отказов механического оборудования электровозов серии 2ЭС6 / К.О. Серяков, В.А. Николаев // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : м-лы VI Всеросс. научн.-техн. конф. с междуна­родн. участием. – Омск, 2021. С. 61–67.

20. Буйносов, А.П. Техническая диагностика электроподвижного со­става / А.П. Буйносов, К.А. Стаценко. – Екатеринбург : УрГУПС, 2008. – 110 с.

21. Буйносов, А.П. Структурная классификация средств диагностики тягового подвижного состава / А.П. Буйносов, В.С. Наговицын // Научно-технический вестник Поволжья. –2012. №6. С. 326–329.

22. Буйносов, А.П. Разработка диагностического комплекса при тех­ническом обслуживании электровоза на ПТОЛ / А.П. Буйносов, Д.С. Денисов // Научно-технический вестник Поволжья. –2015. №2. С. 79–81.

23. Гапанович, В.А. Некоторые вопросы управления ресурсами и рисками на железнодорожном транспорте на основе состояния эксплуати­руемой надежности и безопасности объектов и процессов / В.А. Гапанович, А.М. Замышляев, И.Б. Шубинский // Надежность. – 2011. – № 1(36). – С. 2–8.

24. Гапанович, В.А. Построение системы ситуационного управления чрезвычайными ситуациями в ОАО «РЖД» / В.А. Гапанович, И.Н. Розенберг, А.М. Замышляев // Надежность. – 2010. – № 4(35). – С. 2–11.

25. Головаш, А.Н. Вероятностная модель оценки результатов диа­гностирования / А.Н. Головаш, В.Г. Шахов // Омский научный вестник. – 2008 – № 2. С. 11–14.

26. Головаш, А.Н. На основе средств технического диагностирования и информационных технологий / А.Н. Головаш, А.С. Вайсбурд, А.П. Семенов, М.В. Лифанов // Железнодорожный транспорт. – 2012. №7. С. 58–61.
27. Головатый, А.Т. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов за рубежом / А.Т. Головатый, А.Ю. Лебедев. – М. : Транспорт, 1977. – 159 с.
28. Головатый, А.Т. Электроподвижной состав. Эксплуатация, надежность и ремонт / А.Т. Головатый, И.П. Исаев, П.И. Борцов. – М. : Транспорт, 1983. – 350 с.
29. Грачев, В.В. Оценка технического состояния тепловозного дизеля по данным бортовой микропроцессорной системы управления / В.В. Грачев, М.Ш. Валиев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – №1. – С. 22–32.
30. Грачёв, В.В. Научные основы применения методов интеллектуального анализа данных для контроля технического состояния локомотивов / В.В. Грачев / Дисс. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / СПб : ПГУПС. – 2020. – 434 с.
31. Давыдов, Ю.А. Моделирование и анализ информационных потоков при автоматизированном управлении технологическими процессами в локомотивном депо / Ю.А. Давыдов / Дисс. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / М. : МИИТ, 2001. – 482 с.
32. Давыдов, Ю.А. Интерактивная система диагностирования объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта / Ю.А. Давыдов, А.К. Пляскин, М.Ю. Кейно // Труды Первой Международн. научн.-практ. конф. «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов». – М. : ООО «ТМХ-Сервис», 2014. – С. 237–241.
33. Киселёв, В.И. Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава / В.И. Киселев, В.А. Гапанович, И.К. Лакин [и др.] ; под общ. ред. В.А. Гапановича. – М. : ИРИС Групп, 2012. – 576 с.
34. Космодамианский, А.С. Автоматические системы управления локомотивов / Н.М. Луков, А.С. Космодамианский. – М. : ГОУ «Учебно-

методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 429 с.

35. Космодамианский, А.С. Автоматические системы регулирования. – М. : РГОТУПС, 2004. – 40 с.

36. Космодамианский, А.С. Автоматическое регулирование температуры обмоток тяговых электрических машин локомотивов : Монография. – М. : Маршрут, 2005. – 256 с.

37. Лакин, И.К. Как предупредить заход локомотива на непланный ремонт / И.К. Лакин, А.А. Аболмасов, И.Ю. Хромов // Локомотив. – 2019. – № 3. – С. 4–5.

38. Лакин, И.К. Направления повышения эффективности локомотивов / И.К. Лакин, А.П. Семенов, И.Ю. Хромов // Мир транспорта. – 2019. – № 6. – С. 90–105.

39. Лакин, И.К. Роль цифровых двойников в управлении сервисным обслуживанием локомотивов / И.К. Лакин, А.П. Семенов, И.Ю. Хромов // Локомотив. – 2019. – № 6. – С. 41–42.

40. Лакин, И.К. Автоматизированная система управления локомотивным хозяйством. АСУТ / И.К. Лакин, Ю.В. Смирнов, А.Ю. Тимченко. – М. : ОЦВ, 2002. – 516 с.

41. Лакин, И.К. Разработка теории и программно-технических средств комплексной автоматизированной справочно-информационной и управляющей системы локомотивного депо / И.К. Лакин / Дисс. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / М. : МИИТ, 1997. – 377 с.

42. Осяев, А.Т. Вопросы совершенствования системы ремонта электроподвижного состава при применении средств и методов технического диагностирования / под ред. А.Т. Осяева. – М. : Транспорт, 1991. – 117 с.

43. Осяев, А.Т. Концепция управления жизненным циклом изделий железнодорожного транспорта ОАО «РЖД» / А.Т. Осяев, А.Б. Подшивалов, А.Ю. Тимченко. – М. : ВНИИЖТ, 2006. – 100 с.

44. Осяев, А.Т. Техническая диагностика подвижного состава / А.Т. Осяев, М.В. Лисицкий, С.И. Баташов, Р.А. Романов. – М., 2019. – 238 с.
45. Плакс, А.В. Дефектоскопия механической части электрического подвижного состава / А.В. Плакс, А.П. Зеленченко. – СПб, 1998. – 23 с.
46. Плакс, А.В. Повышение безопасности микропроцессорной системы управления аппаратами электроподвижного состава / А.В. Плакс, А.Я. Якушев, Е.В. Опарина // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. №4(45). С. 85–92.
47. Рауба, А.А. Повышение качества ремонта и обслуживания подвижного состава / А.А. Рауба, В.С. Смольянинов, С.Г. Шантаренко // Железнодорожный транспорт. – 2005. – №S11. С. 12–14.
48. Семенов, А.П. На основе средств технического диагностирования и информационных технологий / А.П. Семенов, А.С. Вайсбурд, А.Н. Головаш // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 7. – С. 58–61.
49. Семенов, А.П. Комплексные решения автоматизации технологических процессов диагностирования и ремонта подвижного состава / А.П. Семенов, С.В. Елисеев // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты : М-лы X Международн. научн.-практ. конф. – СПб, 2015. – С. 65–68.
50. Семенов, А.П. Обеспечение эксплуатационной надежности поездов метрополитена на основе системы сбора, обработки и анализа диагностической информации / А.П. Семенов // Вестник Ю.-УрГУ. Сер. : Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2014. № 2 (2014). – С. 98–104.
51. Семенов, А.П. Модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования / А.П. Семенов / Дисс. ... д-ра техн. наук: 05.22.07. – М. : РУТ, 2021. – 379 с.
52. Семченко, В.В. Эксплуатация и техническое обслуживание электронных систем управления электровозов переменного тока / В.В. Семченко, И.К. Лакин, И.Е. Чмилев. – Красноярск : Изд-во Дорожного центра внедрения Красноярской железной дороги, 2010. – 72 с.

53. Семченко, В.В. Микропроцессорная система управления и диагностики электровозов ВЛ80р. МСУЭ / И.Е. Чмилев, О.А.Терегулов, А.В. Раздобаров, В.В. Семченко, [и др.] // Красноярск : Изд-во Дорожного центра внедрения Красноярской железной дороги, 2011. – 64 с.
54. Феоктистов, В.П. Автоматизированная система управления локомотивным хозяйством (АСУТ) / А.Ю. Тимченко, И.К. Лакин, А.А. Воробьев, А.В. Горский, [и др.]. – М. : МИИТ, 2001. – 42 с.
55. Феоктистов, В.П. Задачи повышения безопасности в системе технической эксплуатации подвижного состава / В.П. Феоктистов, В.И. Киселёв // Труды VI научн.-практ. конф. «Безопасность движения поездов». – М. : МИИТ, 2005. – С. VI–12–13.
56. Четвергов, В.А. Надёжность локомотивов / В.А. Четвергов, А.Д. Пузанок. – М. : Маршрут, 2003. – 415 с.
57. Шабалин, Н.Г. Организация эксплуатации и технического обслуживания тягового подвижного состава с использованием современных информационных технологий / Н.Г. Шабалин / Дисс. ... канд. техн. наук : 05.22.07. – М. : МИИТ. – 1999. – 171 с.
58. Шабалин, Н.Г. Автоматизированная система управления качеством технологических процессов на железнодорожном транспорте (АСУ КТП) / Н.Г. Шабалин. – М. : ООО «Железнодорожные технологии», 2004. – 348 с.
59. Шантаренко, С.Г. Инженерные методы анализа и обеспечения эксплуатационной надёжности колёсно-моторных блоков локомотивов новых серий / С.Г. Шантаренко / М-лы Всеросс. научн.-техн. конф. с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава». – Омск : ОмГУПС. – 2011. – С. 72–79.
60. Шантаренко, С.Г. Совершенствование технологической готовности технического обслуживания и ремонта тягового подвижного состава / С.Г. Шантаренко / Дисс. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / Омск : ОмГУПС, 2006.

– 419 с.

61. Шантаренко, С. Г. Качество ремонта и энергоэффективность электровозов / С.Г. Шантаренко, М.Ф. Капустьян, О. П. Супчинский // Вестник РГУПС. 2015. № 1 (57). С. 46–53.

62. Hedlund, E. Apparatus and Method for Performance and Fault Analysis. Патент США WO 01/31450 / E. Hedlund, N. Roddy, D. Gibson, R. Bliley // General Electric Company, 2001. – 58 с.

63. Womak, J.P. The machine that changed the world. The story of lean production. – New York, NY / J.P. Womak, D.T. Jones, D. Roos // Harper Perennial. Ed., – 1991. – 323 p.

64. Аболмасов, А.А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания / А.А. Аболмасов / Дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / М. : МИИТ. – 2017. – 180 с.

65. Лакин, И.И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов / И.И. Лакин / Дисс. канд. техн. наук : 05.22.07 / М. : МИИТ. – 2016. – 195 с.

66. Мельников, В.А. Совершенствование методов диагностирования тепловозов 2ТЭ116У с применением данных бортовых систем управления / В.А. Мельников / Дисс. канд. техн. наук: 2.9.3 / М. : РУТ. – 2022. – 210 с.

67. Пустовой, И.В. Разработка информационно-динамической модели управления сервисным техническим обслуживанием и ремонтов локомотивов / И.В. Пустовой / Дисс. канд. техн. наук: 05.02.22. – Омск : ОмГУПС, 2018. – 181 с.

68. Федотов, М.В. Предиктивная диагностика оборудования тепловоза на основе интеллектуального анализа данных / М.В. Федотов / Дисс. канд. техн. наук: 05.22.07 / СПб : ПГУПС. – 2021. – 205 с.

69. Федотов, М.В. Предиктивная система технического диагностирования локомотивов с использованием интеллектуального анализа данных / М.В. Федотов, В.В. Грачев // Транспорт РФ. – 2020. – №6(91). – С. 28–34.

70. Федотов, М.В. Применение нейросетевых моделей для диагно-

стирования оборудования современных локомотивов / М.В. Федотов, В.В. Грачев, С.И. Ким // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2018. – №3(43). – С. 22–31.

71. Хромов, И.Ю. Анализ влияния режимов эксплуатации на техническое состояние локомотивов / И.Ю. Хромов / Дисс. канд. техн. наук: 05.22.07 / М. : РУТ (МИИТ). – 2021. – 187 с.

72. Шестаков, И.В. Совершенствование технологии диагностирования изоляции тяговых электродвигателей подвижного состава / И.В. Шестаков // Дисс. канд. техн. наук: 05.22.07 / Омск : ОмГУПС. – 2017. – 141 с.

73. Семенов, А.П. Система мониторинга локомотивного парка в компании General Electric Transportation / А.П. Семенов, И.К. Лакин // Локомотив. – 2021. – №7(775). – С. 35–37.

74. Транспортное машиностроение. URL: <https://www.ge.com/news/> (дата обращения: 13.06.2021).

75. Центр железнодорожного обслуживания Мюнхен-Аллах, Германия. URL: <https://www.mobility.siemens.com/> (дата обращения: 20.06.2021).

76. Электропоезда ICE-T и ICE-3 железных дорог Германии. URL: <https://www.1520mm.ru/superTrain/ice-t.phtml> (дата обращения: 12.07.2021).

77. Колчин, И. Система железнодорожной автоматизации SIBAS PN / И. Колчин // СТА. – 2015. – №2. С. 80–84.

78. Шульга, Р.Н. Стандарт PROFINET для железнодорожного транспорта / Р.Н. Шульга // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2022. – №12. – С. 54–62.

79. Матюшин, Л.Н. Современные проблемы структурной реформы на железнодорожном транспорте / Л.Н. Матюшин, Н.И. Камшилин // Актуализация транспортной стратегии России как необходимое условие обеспечения экономического прорыва и национальной безопасности страны на этапах геополитического противостояния. – М., 2023. – С. 446–460.

80. Зябиров, Х.Ш. Современные технологии управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте : монография / Х.Ш. Зяби-

ров, И.Н. Шапкин. – М. : ООО «Изд-во «Финансы и статистика», 2021. С. 480.

81. Кольшев, А.С. Тяжеловесное движение: экономическая оценка тягового бизнес-ресурса : монография. Екатеринбург, 2020. 134 с.

82. ОАО «РЖД». URL: <https://www.rzd.ru> (дата обращения: 15.03.2020).

83. Сысоева, Е.А. Железнодорожная реформа: предварительные итоги / Е.А. Сысоева // Локомотив. – 2008. – № 7. С. 5–6.

84. Воронина, Р.М. Этапы развития железнодорожного транспорта в России / Р. М. Воронина // Студент: наука, профессия, жизнь : М-лы IX Всеросс. студ. научн. конф. с международн. участием. – В 4 ч. –Т. 2. – Омск, 2022. С. 96–100.

85. Валинский, О.С. Локомотивная тяга: настоящее и задачи на будущее / О.С. Валинский // Локомотив. – 2017. – № 12(732). – С. 2–6.

86. ГОСТ Р 56046-2014. Показатели использования локомотивов. Термины и определения. М., 2014. – 36 с.

87. Воротилкин, А.В. Локомотивный комплекс и перспективы его развития / А.В. Воротилкин // Локомотив. – 2011. – №1. – С. 2–5.

88. Воротилкин, А.В. Преобразования локомотивного комплекса фундамент успешного развития / А.В. Воротилкин // Локомотив. – 2015. – № 2. – С. 2–3.

89. Головаш, А.Н. Проблемы и решения сервисного обслуживания локомотивов / А.Н. Головаш // Труды первой Международн. научн.-практ. конф. «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов». – М. : ООО «ТМХ-Сервис», 2014. – С. 141–143.

90. Киселёв, В.И. Опыт сервисного обслуживания локомотивов / В.И. Киселёв, И.И. Лакин // Железнодорожный транспорт. – 2014. № 4. С. 64–67.

91. Договоры ОАО «РЖД» с СТМ-Сервис (№ 284) и ТМХ-Сервис (№ 285) от 30.04.2014 на сервисное обслуживание локомотивов. – М. : ОАО «РЖД», 2014.

92. Наумов, Д.В. Проблемы управления надежностью и эффективностью сервисного обслуживания локомотивов / Д.В. Наумов // Наука, образование, транспорт: актуальные вопросы, приоритеты, векторы взаимодействия : М-лы Международ. науч.-метод. конф., посв. 65-летию Оренбургского института путей сообщения – филиала СамГУПС. – Оренбург, 2022. С. 70–73.

93. Богинский, С.А. Полное сервисное обслуживание локомотивов собственности ОАО «РЖД» / С.А. Богинский // Локомотив. 2020. №8(764). С. 2–4.

94. Давыдов, Ю.А. О проблемах обслуживания тягового подвижного состава в сервисных депо / Ю.А. Давыдов, А.К. Пляскин, Р.И. Маршалко // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2019. №2(19). С. 6–10.

95. Пустовой, И.В. Новые методы оценки эффективности сервисного технического обслуживания и ремонта локомотивов / И.В. Пустовой // Локомотив. – 2018. №8(740). С. 6–7.

96. Лакин, И.К. Эффективность сервисного обслуживания локомотивов / И.К. Лакин, И.В. Пустовой // Вестник Института проблем естественных монополий: техника железных дорог. – 2017. №2(38). С. 34–44.

97. Доманов, К.И. Проблемы сервисного обслуживания электровозов серии 2ЭС6 и мероприятия направленные на повышение технологии их ремонта / К.И. Доманов // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : М-лы IV Всерос. научн.-практ. конф. с международ. уч. – Омск : ОмГУПС. – 2017. С. 97–103.

98. Ламкин, А.Г. Начинается сервисное обслуживание локомотивов / А.Г. Ламкин // Локомотив. – 2013. – №10(682). – С. 4–6.

99. Пустовой, В.Н. История становления предиктивного ремонта в АО «Трансмашхолдинг» / В.Н. Пустовой, И.И. Лакин // Локомотив. – 2021. – №10(778). – С. 12–13.

100. Горский, А.В. Стратегия интеллектуального ремонта локомотивов / А.В. Горский, А.А. Воробьёв, А.В. Скребков // Локомотив. – 2012. – №7. – С. 56–59.

101. Богинский, С.А. Технология сервисного обслуживания и анализ результатов эксплуатации электронного оборудования электровозов переменного тока на железных дорогах Восточного полигона / С.А. Богинский, В.В. Семченко, Н.Г. Шабалин // Вестник НИИЖТ. – 2019. – № 78(3). – С. 169–176.

102. Липа, К.В. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / К.В. Липа, А.А. Белинский, В.Н. Пустовой, С.Л. Лянгасов, [и др.]. – М. : ООО «Локомотивные технологии», 2015. – 212 с.

103. Стрельников, В.Т. Комплексное управление качеством технического обслуживания и ремонта электровозов / В.Т. Стрельников, И.П. Исаев. – М. : Транспорт, 1980. – 207 с.

104. Житенёв, Ю.А. Интеллектуальные системы на службе транспорта / Ю.А. Житнёв // Локомотив. – 2010. – №7. – С. 6–10.

105. Лакин, И.И. Планово-предупредительный вид ремонта тягового подвижного состава с учётом его технического состояния / И.И. Лакин / М-лы Второй всеросс. научн.-техн. конф. с международ. участ. «Эксплуатационная надёжность подвижного состава». – Омск : ОмГУПС. 2013. – С. 23–27.

106. Лакин, И.К. Автоматизированная система управления эксплуатационным жизненным циклом локомотивов / И.К. Лакин, И.В. Пустовой, А.А. Аболмасов // Труды НПК «Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава». – Красноярск : ДЦВ Красноярской железной дороги, 2020. – С. 223–246.

107. Лакин, И.К. Технология «Индустрия 4.0» в сервисных локомотивных депо группы компаний «Локотех» / И.К. Лакин, Ю.С. Дегтярев, В.Н. Пустовой // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : М-лы IV Всерос. науч.-практ. конф. с международ. уч. – Омск : ОмГУПС. – 2017. С. 74–78.

108. Лакин, И.К. Использование технологии «цифровой двойник» при управлении ремонтами локомотивов / И.К. Лакин, А.П. Семенов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. №3(63). С. 89–98.

109. Селезнев, И.Л. Знакомьтесь: ТЭМ5Х – концепт нового гибридного локомотива / И.Л. Селезнев, А.В. Шафрыгин, А.Е. Чекмарев, В.А. Хохряков // Локомотив. – 2019. – №12(756). – С. 30–32.

110. Тимофеев, С.А. АСУ «Сетевой график» – основа качественного ремонта локомотивов / С.А. Тимофеев, Д.В. Галкин // Локомотив. – 2017. – №3(723). – С. 13–14.

111. Корнейчук, И.Л. Информационное обеспечение внешнего диагностического оборудования при реализации проекта «умный локомотив» / И.Л. Корнейчук // Транспорт Евразии XXI века: современные цифровые технологии на рынке транспортных и логистических услуг : М-лы XI Международн. научн.-практ. конф. – Алматы. – 2018. С. 342–346.

112. Тюшев, И.А. Развитие систем бортовой диагностики локомотивов / Д.Л. Худояров, И.А. Тюшев // Инновационный транспорт. – 2018. №4(30). С. 43–48.

113. Худорожко, М.В. Бортовая система диагностирования электровоза 2ЭС6 / М.В. Худорожко, М.С. Хазов // Локомотив. – 2011. – №11(659). – С. 29.

114. Прибылов, С.М. Система СВЛ ТР и ее применение / С.М. Прибылов, А.Ю. Семенов // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава : Труды Всерос. науч.-практ. конф. с международ. участ. / под ред. И.К. Лакина. – Красноярск, 2020. С. 276–281.

115. Зыкин, А.В. СТМ-Сервис: современные технологии сервисного обслуживания / А.В. Зыкин, И.В. Богачёва // Локомотив. – 2022. – №8(788). – С. 5–6.
116. Распоряжение ОАО «РЖД» от 30.12.2016 N 2796р «О системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО «РЖД». – М. : ОАО «РЖД». – 2016. – 22 с.
117. Горский, А.В. Оптимизация системы ремонта локомотивов / А.В. Горский, А.А. Воробьев. – М. : Транспорт, 1994, 209 с.
118. ГОСТ Р 52122-2003. Техническая диагностика. Локомотивы магистральные. Встроенные системы диагностирования. Общие требования. – М., 2003, 46 с.
119. Карибский, В.В. Основы технической диагностики / В.В. Карибский, П.П. Пархоменко, Е.С. Согомонян, В.Ф. Халчев. – М. : Энергия, 1976. – 464 с.
120. Лакин, И.И. Анализ эффективности сервисной формы технического обслуживания и ремонта локомотивов / И.И. Лакин, В.В. Семченко, А.В. Раздобаров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. №4(76). С. 46–56.
121. Иньков, Ю.М. Эксплуатация и ремонт электроподвижного состава магистральных железных дорог / Ю.М. Иньков, В.П. Феоктистов, Н.Г. Шабалин ; под ред. Ю.М. Инькова. – М. : Изд-во МЭИ, 2011. – 384 с.
122. Горский, А.В. Оптимизация сроков ремонта на основе интенсивности отказов / А.В. Горский, В.А. Козырев, А.В. Скребков // Мир транспорта. – 2015.– № 5. – С. 16–18.
123. Яковлев, К.Н. Анализ случаев неплановых видов ремонта электровозам серии 2ЭС6 в Свердловской дирекции тяги // Синтез науки и образования как механизм перехода к постиндустриальному обществу : сб. статей Международн. научн.-практ. конф. – Уфа, 2021. С. 50–55.
124. Юрасов, О.Д. Анализ неплановых ремонтов электрических машин электровозов серии 2ЭС6 в сервисном локомотивном депо Московка /

О.Д. Юрасов // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности. М-лы Второй Всерос. науч.-техн. конф. с междуна-родн. участ. – Омск, 2014. – С. 235–242.

125. Дурандин, М.Г. Работа тяговых электрических машин в неустано-вившихся режимах / М.Г. Дурандин. – Екатеринбург : УрГУПС, 2010. – 64 с.

126. Сулейманов, Р.Я. Методы снижения дугообразования на коллек-торе тяговых электродвигателей / Р.Я. Сулейманов, М.Г. Дурандин // Вестник УрГУПС. – 2018. №2(38). С. 35–41.

127. Дурандин, М.Г. Анализ потенциальной устойчивости тяговых электродвигателей грузовых электровозов 2ЭС6 / М.Г. Дурандин, И.Г. Ива-нов // Транспорт Урала. – 2015. №1(44). С. 84–91.

128. Калякулин, А.Н. Повышение надежности модуля пуско-тормозных резисторов / А.Н. Калякулин // Эксплуатационная надежность ло-комотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : М-лы VI Все-рос. науч.-техн. конф. с междунар. участ. – Омск. – 2021. С. 101–108.

129. Андрончев, И.К. Совершенствование трактовки диагностической информации при оценке технического состояния тяговых двигателей элек-троподвижного состава / И.К. Андрончев, И.П. Гордеев, А.С. Тычков, П.В. Шепелин // Вестник транспорта Поволжья. СамГУПС. Самара, 2020. – №3(81). – С. 7–13.

130. Калякулин, А.Н. Диагностирование цепи тяговых электродвига-телей электровозов переменного тока / А.Н. Калякулин, П.В. Шепелин, А.С. Тычков // Локомотивы. Электрический транспорт – XXI век : М-лы VII Меж-дунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург, 2020. – С. 343–348.

131. Центры мониторинга «СТМ-Сервис» внедряют цифровые техно-логии. URL: <https://sinaratm.ru/media/news/monitoring-centers-stm-service-implementing-digital-technology/> (дата обращения: 10.05.2019).

132. Регистратор параметров МСУЛ РПМ. Руководство по эксплуата-ции. 07Б.02.00.00 РЭ2. – Екатеринбург. – 2022. – 129 с.

133. Электровоз 2ЭС6. Руководство по эксплуатации электровоза грузового постоянного тока 2ЭС6 с коллекторным тяговыми электродвигателями. Описание и работы системы управления и измерения. 2ЭС6.00.000.000.РЭ2. – Верхняя Пышма, 2008. – 117 с.

134. Микропроцессорная система управления и диагностики МПСУ-иД : Руководство по эксплуатации. 07Б.02.00.00 РЭ. – Екатеринбург. – 2022. – 47 с.

135. Осинцев, И.А. Микропроцессорная система управления и диагностики электровоза 2ЭС6 «Синара» / И.А. Осинцев // Локомотив. – 2022. – №5(785). – С. 12–16.

136. Шелудяков, А.В. Табло коллективного пользования по мониторингу технического состояния электровозов 2ЭС6 и 2ЭС10 / А.В. Шелудяков, Л.Э. Нигмаджанов, И.В. Елагин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2017616478, 07.06.2017.

137. Лакин, И.И. Мониторинг и диагностирование технического состояния локомотивов / И.И. Лакин, А.А. Аболмасов, В.А. Мельников. – Berlin : LAP Lambert Academic Publishing AG & CO.KG, 2014. – 136 с.

138. Коркина, С.В. Цифровой двойник как одно из ключевых направлений цифровизации железнодорожного транспорта / С.В. Коркина, С.П. Воеводина, И.В. Чепурченко // Приоритетные направления развития науки и технологий : Доклады XXXII Международ. науч.-практ. конф. / под общ. ред. В.М. Панарина. – 2023. С. 198–201.

139. Лакин, И.И. Методология мониторинга технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов / И.И. Лакин // Труды Второй всерос. науч.-техн. конф. с международ. учас. «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов». – Омск : ОмГУПС, 2014. – С. 25–31.

140. Колышев, А.С. Концептуальная модель организации обслуживания и ремонта локомотивов / А.С. Колышев // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2023. – №1. – С. 73–78.

141. Каргапольцев, С.К. Влияние продольной жесткости рельсового пути на динамику тягового привода локомотива / С.К. Каргапольцев, П.В. Новосельцев, Ю.А. Купцов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. №3(55). С. 174–179.

142. Тюшев, И.А. Развитие функциональных возможностей диагностики локомотивов / А.П. Буйносов, Д.Л. Худояров, И.А. Тюшев // Железнодорожный транспорт. – 2021. – №2. – С. 60–63.

143. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов. – 1989. – 12 с.

144. ГОСТ Р 50779.10-2000. Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения – М. : Изд-во стандартов, 2000. – 46 с.

145. Пузанков, А.Д. Статистические методы обработки выборочных данных наблюдений или экспериментов / А.Д. Пузанков. – М. : МИИТ, 2000. – 52 с.

146. Крохалев, В.Я. Статистика / В.Я. Крохалев, С.А. Скопинов, В.А. Телешев ; ФГБОУ ВО УГМУ Минздрава России. – Екатеринбург : Изд-во УГМУ, 2018. – 114 с.

147. Тимофеева, Г.А. Статистический анализ в научных исследованиях: конспект лекций / Г.А. Тимофеева, А.В. Мартыненко. – Екатеринбург : УрГУПС, 2014. – 80 с.

148. Тимофеева, Г.А. Эконометрика / Г.А. Тимофеева, А.В. Мартыненко. – Екатеринбург : УрГУПС, 2016. – 111 с.

149. Тюшев, И.А. Метод определения достоверности регистрируемых диагностических сообщений электровозов 2ЭС6 / А.П. Буйносов, Д.Л. Худояров, И.А. Тюшев // Вестник УрГУПС. – 2022. – №4(56). – С. 68–73.

150. Центр сообщества KNIME. URL: <https://hub.knime.com/> (дата обращения: 18.09.2022).

151. Гурьева, Т.Н. Возможности аналитической платформы Knime / М-лы XIII Международн. научн.-практ. конф. «Государство и бизнес. Со-

временные тенденции и проблемы развития экономики». – Ч. 1. 2021. С. 191–199.

152. Буйносов, А.П. Способ оценки достоверности результатов при проведении технической диагностики локомотивов / А.П. Буйносов, С.И. Лаптев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – №1. – С. 43–46.

153. Лакин И.И. Аналитическая оценка автоматизации управления современным электровозом / И.И. Лакин // Известия Транссиба. – 2022. – №3(51). – С. 10–19.

154. Тюшев, И.А. Предиктивная диагностика тяговых электродвигателей локомотивов 2ЭС6 «Синара» / А.П. Буйносов, Д.Л. Худояров, И.А. Тюшев // Наука и образование – транспорту. – 2021. №1. С. 18–20.

155. Тюшев, И.А. Разработка алгоритма диагностики тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 «Синара» / А.П. Буйносов, Д.Л. Худояров, И.А. Тюшев // Транспорт Урала. – 2021. №4(71). С. 74–79.

156. Тюшев, И.А. Критерии определения предотказного состояния тяговых электродвигателей локомотивов 2ЭС6 по данным диагностической информации / А.П. Буйносов, Д.Л. Худояров, И.А. Тюшев // Наука и образование – транспорту. – 2022. №1. С. 18–20.

157. Семенов, А.П. Разработка киберфизической модели системы управления жизненным циклом локомотива / А.П. Семенов, В.В. Семченко, И.К. Лакин // Локомотив. – 2021. – №3(771). – С. 36–39.

158. Тюшев, И.А. Алгоритмизация процесса расшифровки диагностической информации современных локомотивов / А.П. Буйносов, Д.Л. Худояров, И.А. Тюшев / Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – Ростов-на-Дону : РГУПС. – 2020. – №4(53). – С. 9–11.

159. Мельников, В.А. Алгоритмическая защита локомотивов / В.А. Мельников, А.А. Аболмасов, И.И. Лакин // Локомотив. – 2015. – №3. – С. 8–10.

160. АВМЮ.411212.001 ТУ. Измеритель сопротивления изоляции МГМ-1. Технические условия. – Екатеринбург : ООО «Горизонт», 2008. – 3 с.

161. Соловьев, Д.Н. Повышение эксплуатационной надежности элект-

тровозов на основе мониторинга технического состояния и режимов работы оборудования по данным бортовых микропроцессорных систем управления и диагностики / Д.Н. Соловьев, А.А. Лаврухин, Е.С. Ларин // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : М-лы VII Всеросс. науч.-техн. конф. с международ. участ. – Омск : ОмГУПС. – 2022. С. 252–261.

162. Семенов, А.П. «Цифровая» трансформация ремонтного производства локомотивов / А.П. Семенов, Д.В. Казарин, В.А. Смирнов / М-лы первой Международ. науч.-техн. конф. «Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы» (Ташкент, 20-23 апреля 2022 г.). – Ташкент : ТашГУПС, 2022. С. 132–137.

163. Семенов, А.П. Комплексное диагностирование локомотивов / А.П. Семенов // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава : Труды Всерос. науч.-практ. конф. с международ. участ. / под ред. И.К. Лакина. – Красноярск. – 2020. С. 307–309.

164. Тюшев, И.А. Моделирование процесса определения технического состояния тяговых электродвигателей электровозов 2ЭС6 / И.А. Тюшев // Вестник УрГУПС. – 2023. №2(58). С. 135–141.

165. Чертков, И.Е. Влияние наклона кузова электроподвижного состава на смещение полоза токоприемника / И.Е. Чертков, А.В. Тарасенко // Высшая школа. – 2016. Т. 1. – №22. – С. 63–65.

166. Скребков, А.В. Оценка ресурса колесных пар электровозов по информации о замерах контролируемых параметров / А.В. Скребков, Ю.А. Кольцов // Транспорт Урала. – 2019. – №4(63). – С. 49–52.

167. Буйносов, А.П. Бесконтактное измерение бандажей колесных пар железнодорожного подвижного состава / А.П. Буйносов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – №2. – С. 16–18.

168. Тюшев, И.А. Автоматизированная система расчета остаточного ресурса лимитирующих компонентов электровоза (АСР ОР) / И.А. Тюшев,

Д.Л. Худояров, А.Н. Обухов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2019618935, 08.07.2019.

169. Tyushev, I. Organization of repair of locomotives on the data of monitoring their technical condition / I. Tyushev, A. Buynosov, M. Yakimov, S. Sizy // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering. VIII International Scientific Conference Transport of Siberia 918. – 2020.

170. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / Пер. с англ. – М. : Изд. дом «Вильямс». – 2006. – 2-е изд. – 1104 с.

171. Электровоз 2ЭС6. Руководство по эксплуатации электровоза грузового постоянного тока 2ЭС6 с коллекторным тяговыми электродвигателями. Техническое обслуживание и текущий ремонт. 2ЭС6.00.000.000.РЭ8. – Верхняя Пышма, 2008. – 140 с.

172. Тюшев, И.А. Предиктивная оценка состояния колесных пар локомотива в процессе эксплуатации / А.П. Буйносов, Д.Л. Худояров, И.А. Тюшев // Наука и образование – транспорту. – 2020. №1. С. 25–29.

173. Приказ Минтранса России от 23.06.2022 №250 «Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации». URL: <https://rostransnadzor.gov.ru>. (дата обращения 29.09.2022).

174. Терегулов, О.А. Системный подход к организации контроля геометрии локомотивных бандажей / О.А. Терегулов // Локомотив. – 2013. – №12(684). – С. 29.

175. Буйносов, А.П. Измерительная система для контроля параметров бандажей колесных пар локомотивов / А.П. Буйносов, А.М. Кислицын // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 3. – С. 73–78.

176. Буйносов, А.П. Измерительная система для контроля диаметра бандажей колесных пар электровозов на основе разработанного электронного прибора / А.П. Буйносов, А.М. Кислицын // Научное обозрение. – 2012. – № 4. – С. 179–187.

177. Белякова, О.В. Контроль занесения информации в автоматизированную систему «Электронный паспорт локомотива» / О.В. Белякова,

В.С. Маценов, Л.Н. Шаманина, С.А. Ярковская // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2016662775, 22.11.2016. Заявка №2016619940 от 23.09.2016.

178. Буйносов, А.П. Автоматизированный контроль параметров колесных пар тягового подвижного состава / А.П. Буйносов // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 7. – С. 52–53.

179. Буйносов, А.П. Автоматическая система бесконтактного измерения параметров бандажей колесных пар локомотивов / А.П. Буйносов, А.М. Кислицын // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – № 2. – С. 44–48.

180. Федоров, Е.В. Микропроцессорная система управления и диагностики локомотива / Е.В. Федоров // Патент РФ на полезную модель RU 116114 U1, 07.11.2011.

181. История развития. URL: <https://www.saut.ru/about/history/> (дата обращения: 20.05.2022).

182. Научно-исследовательский центр СТМ. URL:<https://sinaratm.ru/about>. (дата обращения: 22.05.2022).

183. Программное обеспечение 2ЭС6, 2ЭС6.С (исполняемые файлы) : Руководство по эксплуатации. 07Б.02.00.00 РЭ4. – Екатеринбург, 2022. – 24 с.

184. Распоряжение от 22.12.2016 № 2631р «Об утверждении инструкции по осмотру, освидетельствованию, ремонту и формированию колесных пар локомотивов и моторвагонного подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм». М : ОАО «РЖД», 2016. – 121 с.

185. Структура дивизиона. URL:<https://www.sinara-group.com/directions/mechanical-engineering/> (дата обращения: 18.08.2022).

186. Семенов, А.П. Организация управления жизненным циклом отечественных локомотивов / А.П. Семенов // Вестник УрГУПС. – 2021. – №1(49). – С. 62–71.

187. Решеткин, А.В. Совершенствование организации ТО и ремонта подвижного состава / А.В. Решеткин // Инновационные идеи молодых исследова-

дователей для агропромышленного комплекса : Сб. м-лов Всеросс. науч.-практ. конф. молодых ученых. – Т. 1. ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ, Пенза, 2023. С. 187–190.

188. Семенов, А.П. Обоснование необходимости систем диагностирования локомотивов / А.П. Семенов, И.К. Лакин // Мир транспорта. – 2020. – №6(91). – С. 136–157.

189. Сирина, Н.Ф. Экономическое обоснование технико-организационных мероприятий в дипломных проектах / Н.Ф. Сирина, Л.В. Пятышина, А.С. Колышев. – Екатеринбург : УрГУПС, 2018. – 135 с.

190. О методических рекомендациях по расчету экономической эффективности новой техники технологии, объектов интеллектуальной собственности и рационализаторских предложений : Распоряжение ОАО «РЖД» от 28.11.2008 № 2538р. М : ОАО «РЖД», 2008. – 127 с.

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ДОСТОВЕРНОСТИ КАЖДОГО
ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СООБЩЕНИЯ**

Таблица А.1 – Результаты расчета достоверности каждого диагностического сообщения

Диагностическое сообщение, №	Достоверность, %	Диагностическое сообщение, №	Достоверность, %
1	53,42	70	24,20
57	51,88	13	24,18
2	50,14	42	24,14
6	46,81	32	24,11
65	45,86	61	24,03
17	45,05	53	23,90
71	44,67	51	23,74
69	43,28	49	23,40
68	42,97	12	23,35
7	42,35	48	23,25
75	41,73	72	22,67
78	41,71	41	22,66
76	41,46	24	22,38
4	41,28	89	21,65
88	41,21	52	21,60
81	41,06	33	21,58
8	40,14	20	21,31
45	37,35	50	20,99
40	36,50	83	20,72
67	36,22	11	20,32
39	35,62	43	20,28
86	35,40	82	19,61
9	35,12	22	19,44
46	34,81	84	18,93
60	34,21	37	18,86
56	34,21	85	18,83
16	33,32	44	18,79
59	32,42	25	18,15
15	31,98	80	17,82
10	31,89	23	17,75
77	31,70	92	17,53
34	30,84	35	17,10
93	30,79	18	16,97
87	29,90	36	16,89
5	29,46	47	16,72
21	29,38	27	16,62
63	29,17	31	16,38
55	29,10	26	16,28
38	27,38	64	16,02
19	26,91	79	15,33
90	26,60	30	14,54
73	26,52	14	14,42
3	26,11	94	11,69

Таблица А.1 (окончание)

54	25,20	58	11,60
74	24,98	28	11,29
91	24,67	29	9,24
62	24,52	66	1,84

**МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕГИСТРАЦИИ ДОСТОВЕРНЫХ
ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СООБЩЕНИЙ**

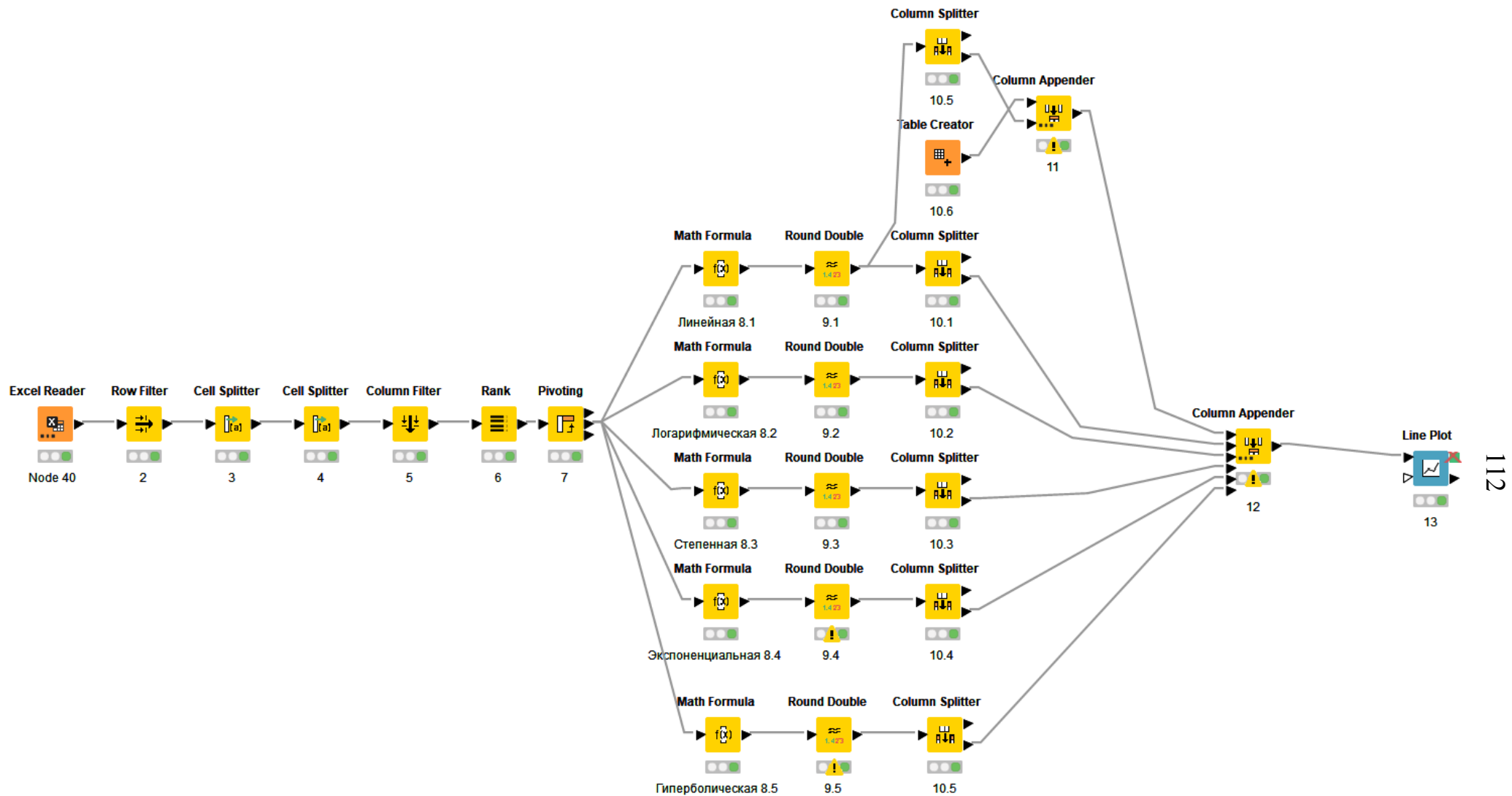


Рисунок Б.1 – Модель прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений

**МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗА**

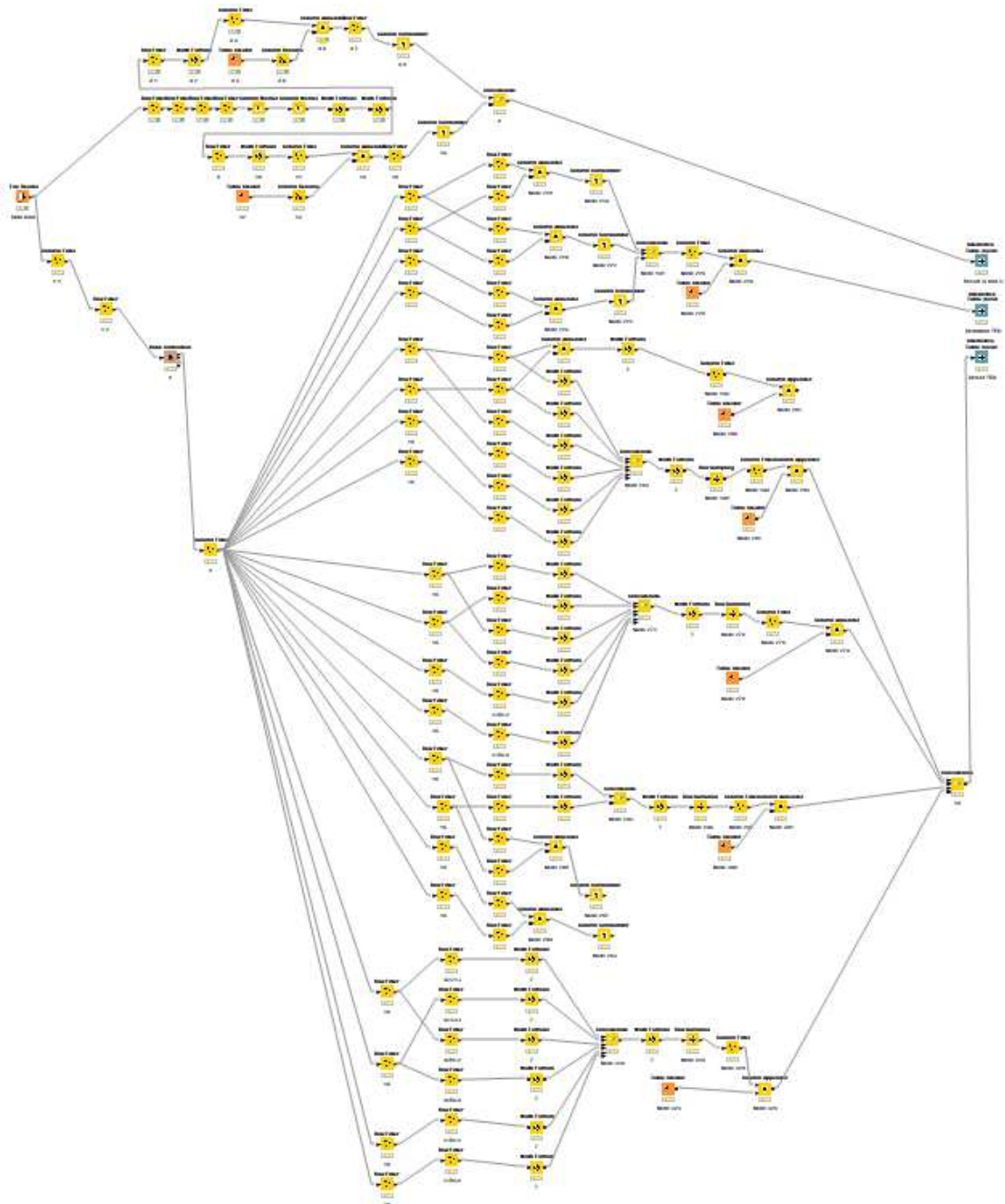


Рисунок В.1 – Модель определения технического состояния оборудования электровоза на примере тяговых электродвигателей

**СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ
ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019618935

**Автоматизированная система расчета остаточного ресурса
лимитирующих компонентов электровоза (АСР ОР)**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Уральский
государственный университет путей сообщения» (RU)**

Авторы: **Тюшев Игорь Андреевич (RU), Обухов Александр
Николаевич (RU), Худояров Дмитрий Леонидович (RU)**

Заявка № 2019617575

Дата поступления 24 июня 2019 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 08 июля 2019 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



**ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный
университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО УрГУПС)
Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург, 620034
Тел./факс: (343)221-24-44
E-mail: rector@usurt.ru

ОКПО 01116035, ОГРН 1026602950065
ИНН/КПП 6659014366/665901001

27.06.2023 № 4835

на № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной
работе УрГУПС

С.В. Бушуев

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационного исследования
Тюшева И.А. в учебном процессе

Выдана Тюшеву Игорю Андреевичу для предоставления в диссертационный совет 44.2.008.01, подтверждающая, что результаты диссертационной работы «Совершенствование методов оценки технического состояния оборудования современных электровозов» используются на кафедре «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения в процессе обучения студентов всех форм обучения по специальности 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог» по дисциплине «Производство и ремонт подвижного состава».

Согласовано:

Заведующий кафедрой
«Электрическая тяга»

Н.О. Фролов



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ДИРЕКЦИЯ ПО РЕМОНТУ
ТЯГОВОГО
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
СВЕРДЛОВСКАЯ ДИРЕКЦИЯ
ПО РЕМОНТУ ТЯГОВОГО
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Гражданская ул., 7, литер Б
г. Екатеринбург, 620107,
Тел.: (343) 380-12-62, факс: (343) 372-61-12,
E-mail: S2-TR_Sekr@svrw.rzd, www.rzd.ru

26.06.2023 г. № БИ

На № _____ от _____

В диссертационный совет
44.2.008.01 на базе ФГБОУ ВО
«Уральский государственный
университет путей сообщения»

Справка

о внедрении результатов диссертационного исследования Тюшева И.А.

Результаты, полученные Тюшевым Игорем Андреевичем при выполнении диссертационного исследования на тему: «Совершенствование методов оценки технического состояния оборудования современных электровозов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» направлены на предупреждение в возникновении отказов технических средств оборудования электровозов, оснащенных микропроцессорной системой управления и диагностики.

Разработанные методы представляют практическую ценность и могут быть использованы при обслуживании современных локомотивных устройств безопасности, с возможностью регистрации диагностической информации. Адаптация разработанных моделей к анализу диагностической информации от устройств безопасности электровоза реализуема к рабочим местам специалистов. Прикладное значение обуславливает повышение производительности грузового локомотивного парка железнодорожной отрасли.

Начальник центра



А.А. Логачёв



В диссертационный совет 44.2.008.01
на базе ФГБОУ ВО «Уральский
государственный университет путей
связи»

Дата 23.05.2025 № 458

на № _____ от _____

О внедрении результатов исследования
диссертационных работ профильных
образовательных учреждений

Технический акт внедрения

Результаты диссертационного исследования Тюшева Игоря Андреевича на тему: «Совершенствование методов оценки технического состояния оборудования современных электровозов» внедрены в производственный процесс Центра мониторинга технического состояния локомотивов новых серий Технической дирекции ООО «СТМ-Сервис» по месту дислокации СЛД Свердловск.

Применение метода определения технического состояния тяговых электродвигателей на основе выявленных критериев, таких как: разница токов якорей между смежными группами тяговых электродвигателей в 150 А, разницы корреляционной связи между набором диагностических параметров позволяют преждевременно определить техническое состояние тяговых электродвигателей и спрогнозировать постановку электровоза на ремонтную позицию.

Результат оценки технического состояния тяговых электродвигателей по разнице тока якоря между смежными тележками составляет 74 %, что позволяет минимизировать ущерб техническому состоянию тяговых электродвигателей.

Главный инженер СЛД Свердловск



А.Е. Петлин