

На правах рукописи



Тюшев Игорь Андреевич

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

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Научный руководитель: **Буйносов Александр Петрович**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Семенов Александр Павлович**, доктор технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственный центр промышленных технологий» (ООО «НПЦ Промтех»), генеральный директор
Федотов Михаил Владимирович, кандидат технических наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), заведующий лабораторией диагностики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО СамГУПС)

Защита состоится 20 декабря 2023 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета 44.2.008.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66, ауд. Б2-15 (зал диссертационных советов).

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

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по почте в адрес диссертационного совета 44.2.008.01.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент


К.М. Колясов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В нормативных документах ОАО «РЖД» – Стратегии цифровой трансформации ОАО «РЖД» до 2025 года, Стратегии развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года, Стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года – указан вектор развития бортовой диагностики оборудования современных электровозов.

Под проектом «Умный локомотив» понимается оборудование современного локомотива измерительными датчиками с возможностью регистрации, хранения, передачи диагностической информации и проведения самодиагностики. Диагностическая информация от бортовой диагностики оборудования современных электровозов передается в Центры мониторинга локомотивов, где специалисты проводят ее предварительную обработку. Но анализ работы оборудования, полученный в ходе расшифровки, зачастую получают после фактического определения неисправности оборудования в эксплуатации. Сохраняется тенденция развития неисправностей оборудования при эксплуатации, увеличиваются отказы технических средств как следствие рост unplanned ремонтов.

Из-за большого объема получаемой диагностической информации очень мала возможность ее детальной расшифровки, поэтому ремонтный персонал не может получить необходимую информацию полностью. Неоперативное принятие решений по дальнейшей работе оборудования также усугубляет сложившуюся ситуацию. Автоматизация процессов оценки технического состояния оборудования, с помощью которой из всего объема выделяется достоверная диагностическая информация, позволит решить эту проблему. Исследования, направленные на совершенствование методов оценки технического состояния оборудования современных электровозов, являются актуальной задачей.

Степень разработанности. Значительный вклад в развитие бортовых средств диагностики оборудования и использование 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. Феоктистов, 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, 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 современного 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 полз токоприемника по данным их геометрических замеров.

Методология и методы исследования. При разработке темы диссертации использовались теория регрессионного анализа и теория вероятности. Оценка достоверности каждого диагностического сообщения проведена в среде Microsoft Excel. Моделирование процесса прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений и процесса определения технического состояния тяговых электродвигателей проведено с использованием платформы интеллектуального анализа Kpime. Определение остаточного ресурса лимитирующих компонентов электровоза реализовано 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, а именно, оставшегося пробега до замены лимитирующих компонентов электровоза (электрографитовые щетки тяговых электродвигателей, колесные пары, полз 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 определить 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, колесных пар, полза 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 расценивать ситуацию развития 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 теоретических методов и специализированных программных пакетов, подтверждается сопоставлением результатов, полученных компьютерным моделированием, с данными практической достоверности диагностических сообщений. Объем обработанной статистической информации составляет 3,5 млн диагностических сообщений, 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 получено 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 120 страниц, четыре таблицы, 40 рисунков, пять приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены актуальность темы исследования, степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, объект и предмет исследования; указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, выносимые на защиту положения, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе проведен анализ существующей системы мониторинга технического состояния локомотивов, методов оценки технического состояния оборудования по данным диагностической информации, а также использование ее в системе технического обслуживания и ремонта.

Приведены результаты анализа ситуации проводимых неплановых ремонтов по оборудованию электровозов 2ЭС6 за 2020–2021 гг. Отмечены уязвимые узлы: тяговые электродвигатели и электрооборудование силовых и вспомогательных цепей, по которым проведено 52 % неплановых ремонтов от общего количества за рассматриваемый период. По тяговым электродвигателям определены 93 возможные причины неисправностей, из которых 75 % связаны с электрическими повреждениями (прогары, обрывы, короткие замыкания обмоток тяговых электродвигателей, низкое сопротивление изоляции). Возникающие электрические повреждения по тяговым электродвигателям напрямую определяют значения регистрируемых аналоговых диагностических сигналов. Отклонения в диагностических сигналах определяют работу оборудования в потенциальной зоне развития неисправности.

По результатам анализа сформулированы направления дальнейшего совершенствования, заключающиеся в определении отклонений в диагностических сигналах, использование которых в качестве эталонных позволит оценивать работу оборудования в зоне развития потенциальных неисправностей. Определены предъявляемые к ним требования для их применения на железнодорожном транспорте.

Мониторинг технического состояния электровозов 2ЭС6 ведут Центры мониторинга технического состояния локомотивов новых серий ООО «СТМ-Сервис». На неплановом ремонте после предварительной проверки оборудования остается 16 % электровозов, а техническое обслуживание и ремонт оптимизированы на 52 %. Специалисты проводят расшифровку диагностической информации и передают оперативную информацию по работе оборудо-

вания ремонтным группам для последующей проверки оборудования на ремонтных позициях. Колоссальный объем регистрируемой информации затрудняет ее детальное изучение и выделение достоверных фактов по работе оборудования. Основная работа по расшифровке направлена на выявление фактических причин, а не на предупреждение предотказного состояния в режиме реального времени. Цели и задачи исследования представлены на рисунке 1.

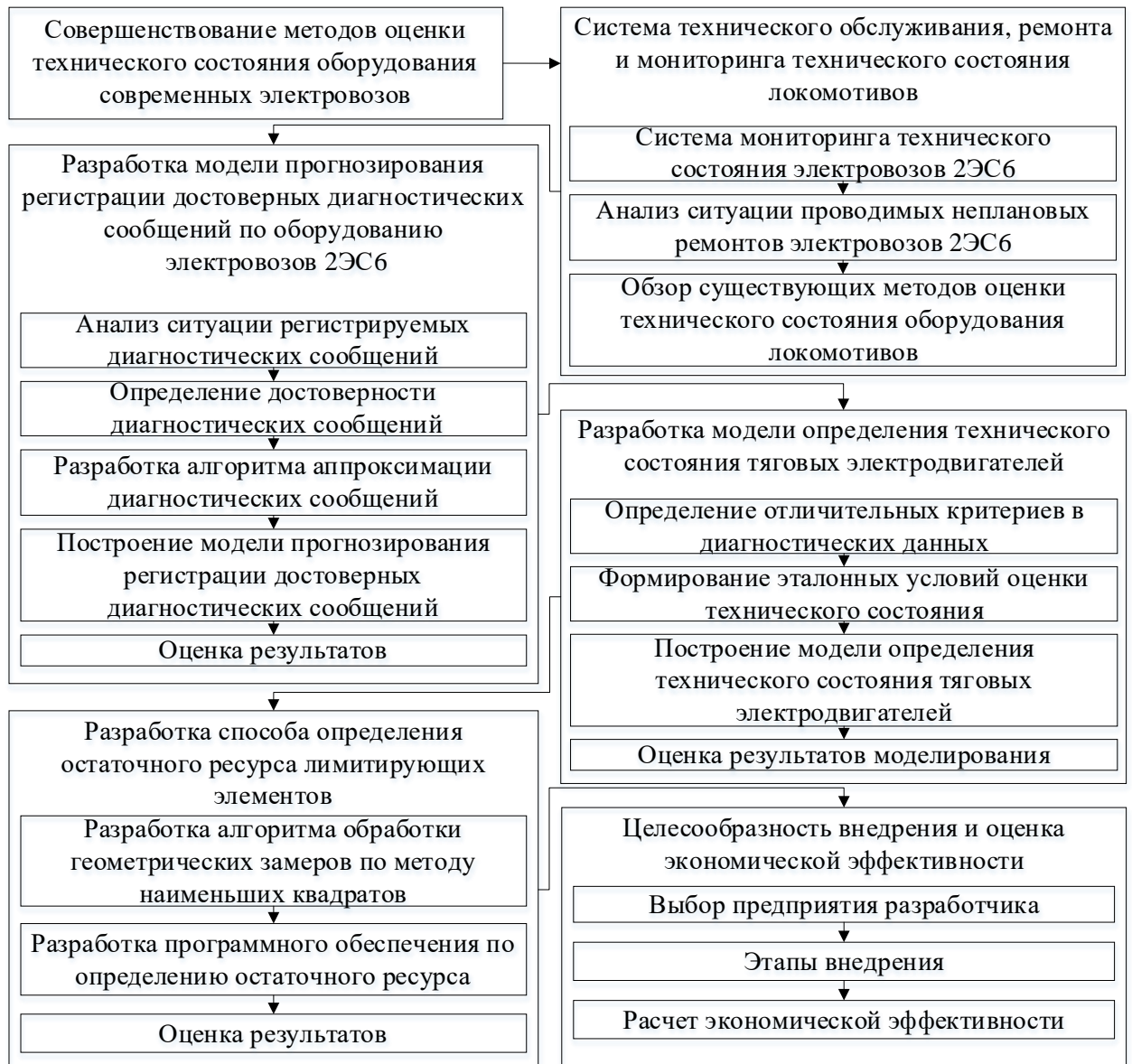


Рисунок 1 – Структурная схема исследования

Вторая глава посвящена разработке модели прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений по оборудованию электровоза. Диагностическое сообщение – это совокупность некоторых отклонений по работе оборудования отличающихся от нормальных, направленное

на информирование локомотивных бригад и специалистов Центров мониторинга. Диагностические сообщения характеризуются низкой, средней, высокой степенью критичности. Высокая степень критичности характеризует предотказное состояние оборудования. Но часто регистрируются диагностические сообщения, не определяющие такое состояние. Поэтому передача не соответствующей действительности информации по работе оборудования увеличивает риски развития неисправности, которые, в свою очередь, определяют нахождение локомотивов на неплановом ремонте.

Анализируемое количество диагностических сообщений с января 2018-го по декабрь 2019-го гг. – 3,5 млн. В это время преобладает регистрация диагностических сообщений с низким уровнем критичности (66,5 %); регистрация таких сообщений характеризует штатную работу оборудования со средней степенью (29,5 %), с высокой (3,9 %), из которых только по тяговым электродвигателям зафиксировано 3,2 % от общего объема (рисунок 2).

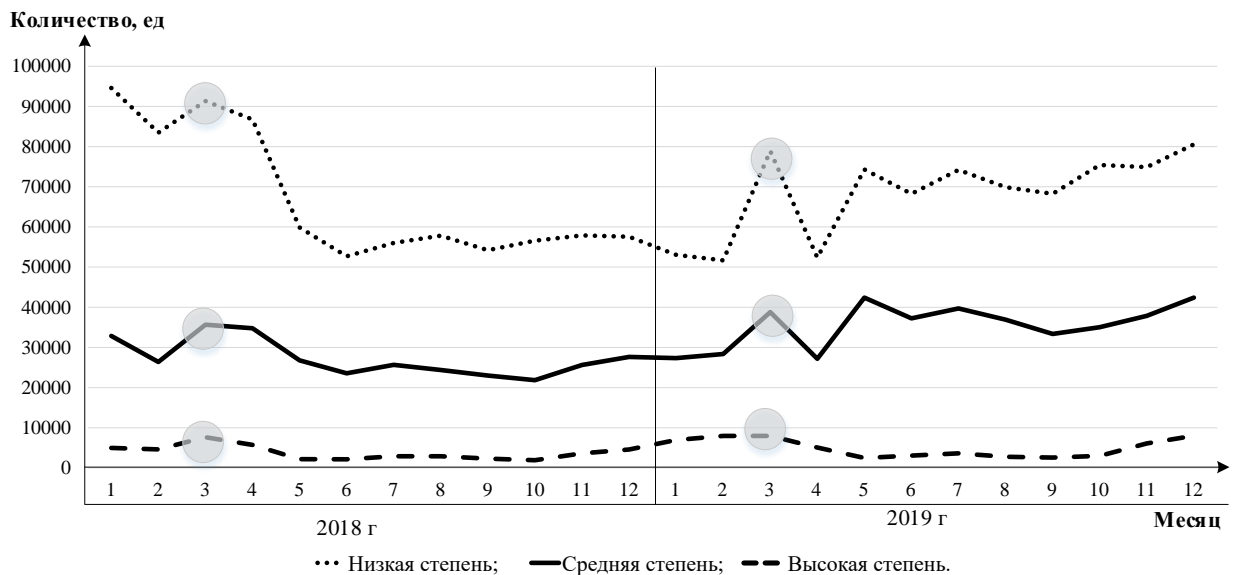


Рисунок 2 – Статистика регистрации диагностических сообщений по степени критичности

Отмечается сезонность регистрации диагностических сообщений при изменении времени года (с зимы на весну), когда происходит некоторый рост с последующей минимизацией регистрации. Отличия объясняются изменением погодных условий, влияющих на нижнее строение пути, в связи с чем усиливается вероятность нарушения контактных соединений и сопряжений в оборудовании.

Уровень достоверности диагностического сообщения определяет, какое именно регистрируемое диагностическое сообщение точно обусловит работу оборудования. Но само прогнозирование достоверных диагностических сообщений может быть напрямую связано с эталонными значениями достовер-

ности, найденными практическим путем. Поэтому для каждого такого сообщения определен уровень его достоверности с помощью адаптированной формулы (1) теории вероятности:

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

где n – количество наблюдений;

y_i – количество точно подтвердившихся сообщений;

x_i – количество всех зарегистрированных диагностических сообщений.

Определено, что все диагностические сообщения по оборудованию электровоза 2ЭС6 обладают заданным уровнем достоверности, которые следует признать эталонными. Так, шесть диагностических сообщений обладают уровнем достоверности от 51 до 60 %, 16 – от 41 до 50 %, 22 от 31 до 40 %, 31 – от 21 до 30 %, 17 – от 11 до 20 %, два – от нуля до десяти процентов.

С помощью теории регрессионного анализа сформулирован алгоритм аппроксимации диагностических сообщений на уровне прогноза именно достоверных сообщений с использованием линейной, логарифмической, гиперболической, степенной, экспоненциальной функций. Логическая последовательность формируется из 11 этапов. На первом этапе загружаются диагностические сообщения, где x_i – количество всех зарегистрированных сообщений. На втором для логарифмической, гиперболической, степенной и экспоненциальных функций производится линеаризация. На третьем и четвертом этапах по формулам (2) и (3) определяются коэффициенты a и b :

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

$$a = \bar{y} - b\bar{x}. \quad (3)$$

На пятом этапе проверяется значимость уравнения регрессии с помощью F -критерия Фишера путем оценки коэффициента детерминации R^2 по шкале от 0 до 1 по формуле (4)

$$R^2 = \frac{\sum (y_i^* - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} = \frac{\sum_{\text{рег}}}{\sum_{\text{общ}}}. \quad (4)$$

На шестом этапе по формуле (5) определяется F -критерий Фишера, а на седьмом рассчитанный критерий сравнивается с критической точкой $F_{кр}$:

$$F_{набл} = \frac{\sum_{рег} (n-2)}{\sum_{ост}} = \frac{R^2(n-2)}{1-R^2}. \quad (5)$$

На восьмом этапе выдвинутая нулевая гипотеза H_0 сравнивается с альтернативной H_1 для подтверждения значимости. На девятом рассчитываются значения y_i^* , которые характеризуют прогнозное значение при заданной величине x_i . На десятом по формуле (6) рассчитывается средняя ошибка аппроксимации:

$$A = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - y_i^*}{y_i} \right| \cdot 100\%. \quad (6)$$

На одиннадцатом этапе определяется точность: если A меньше 10 % – точность высокая, от 10 до 20 % – средняя, от 20 до 50 % – низкая.

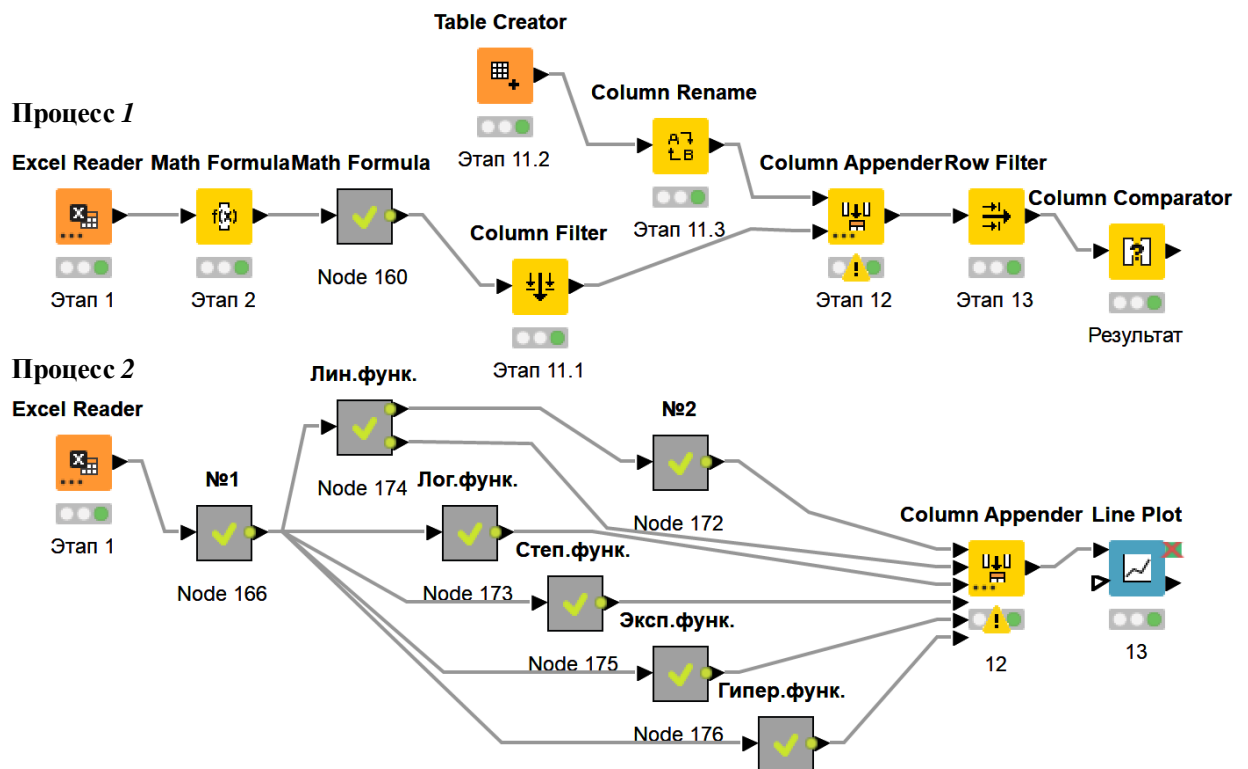


Рисунок 3 – Модель прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений

Модель прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений: процесс 1 (рисунок 3) содержит 13 этапов вычисления, результатом которого является определение коэффициентов аппроксимирующих функций. Процесс 2 (рисунок 3) содержит пять параллельных процессов по аппроксимации регистрируемых диагностических сообщений. Для упрощения отображения группы из логических операций объединены в метаноду. Метанода 1 (Node 166) (рисунок 3) содержит в себе шесть логических узлов для подготовки данных. В каждый логический узел (Math formula) заложены формулы (2)–(6). Результаты моделирования визуализирует логический узел Line Plot в виде графического отображения кривой. Значения, располагающиеся на такой кривой, принимаются как прогнозные в зависимости от фактически регистрируемого количества. Расхождение результатов смоделированных кривых и экспериментальных расчетов находится в пределах 10 %, что указывает на высокую точность модели. Динамичность и неоднотипность модели определяется изменением коэффициентов a и b применительно к каждому электровозу с учетом его истории возникших неисправностей и проводимых неплановых ремонтов.

Третья глава посвящена разработке модели определения технического состояния оборудования с использованием отличительных критериев в диагностических данных. При ручном анализе файлов с диагностическими сигналами (файлы РПМ – регистратор параметров микропроцессорной системы управления и диагностики) выявлены значительные отклонения в регистрации сигналов. Определено, что по тяговым электродвигателям с подтвержденными электрическими повреждениями (прогарами, обрывами, коротким замыканием обмоток, низким сопротивлением изоляции) наблюдается разница по току якоря между смежными группами от ± 150 А и выше при начале их работы в потенциальной зоне развития неисправностей. Для нахождения такой разницы применена формула (7):

$$\Delta I_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |I_{a_i,1,2} - I_{a_i,3,4}|, \quad (7)$$

где $I_{a_i,1,2}$ – ток якоря тяговых электродвигателей 1 и 2 в момент i ;

$I_{a_i,3,4}$ – ток якоря тяговых электродвигателей 3 и 4 в момент i ;

n – количество значений, зарегистрированных в рассматриваемом интервале времени.

Дополнительно определено, что корреляционная связь между диагностическими сигналами тока якоря и сопротивлением изоляции, током якоря и

током возбуждения, током возбуждения и сопротивлением изоляции при работе тяговых электродвигателей в потенциальной зоне развития неисправности существенно изменяется. Зависимость наблюдается за счет изменения сопротивления изоляции (таблица).

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]

Также особенности в регистрации диагностических сигналов наблюдаются в моменты перехода с 44-й на 45-ю позицию параллельного соединения. Так, на 45-й позиции параллельного соединения по неисправным тяговым электродвигателям определены такие отличия в 49 % случаев, на 44 ходовой позиции – в 8 %, на 65 позиции – в 26 %, на остальных позициях – в 17 %.

Модель определения технического состояния оборудования разработана на примере работы тяговых электродвигателей. Входными данными для модели являются файлы РПМ, в которых регистрируются все аналоговые и дискретные сигналы, фиксируемые измерительными датчиками на электровозе. Анализ выявленных критериев в диагностических данных проведен по группам электровозов с фактическими подтвержденными неисправностями по тяговым электродвигателям. Результат моделирования направлен на предупреждение и выявление такого рода неисправностей в режиме онлайн. Результат оперативного информирования локомотивных бригад – невозможность продолжения работы тяговых электродвигателей с начинающейся неисправностью. Отличительные признаки являются эталонными условиями для модели определения технического состояния оборудования (рисунок 4); могут быть адаптированы под любой тип локомотива с возможностью регистрации аналоговых и дискретных сигналов по работе оборудования.

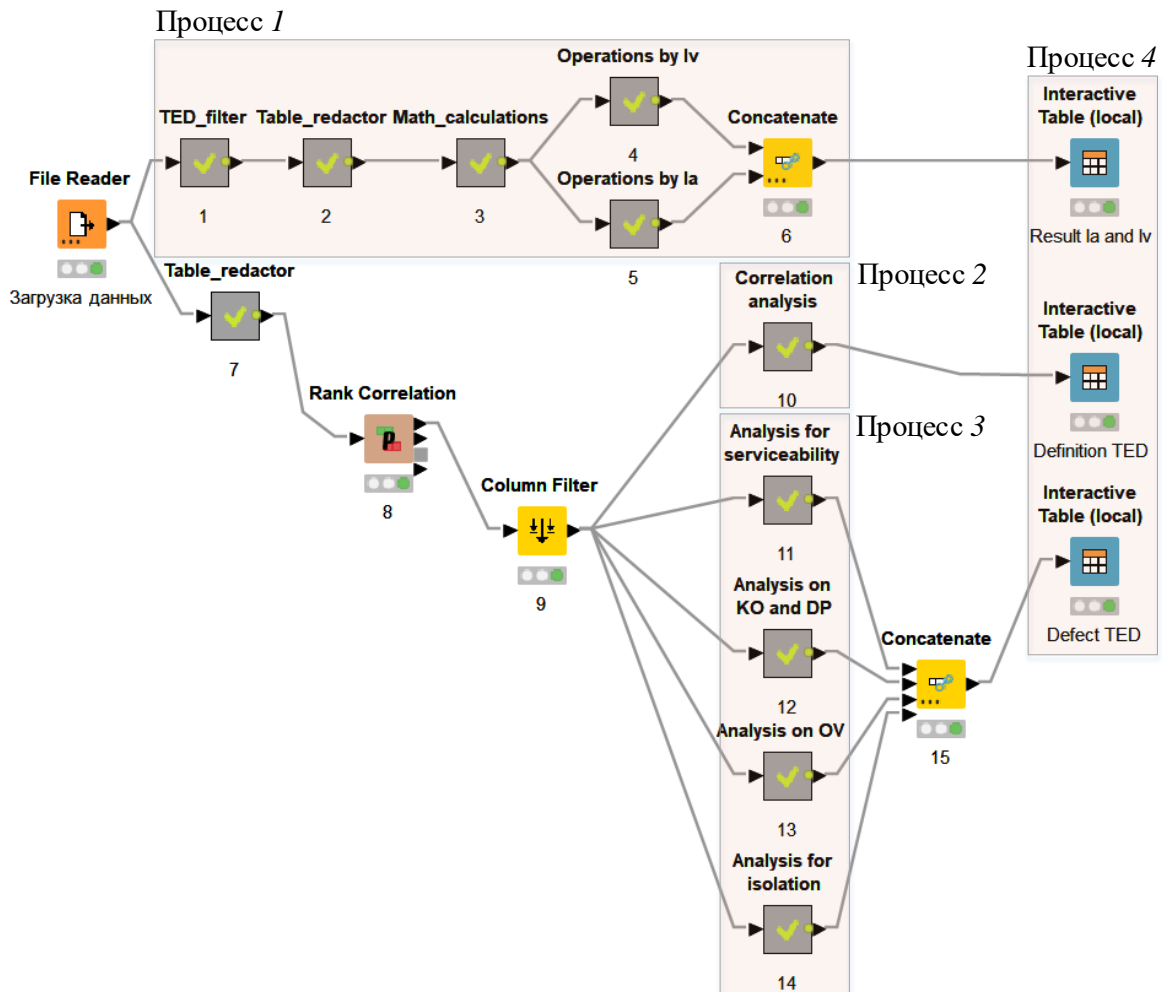


Рисунок 4 – Модель определения технического состояния тяговых электродвигателей

Модель (рисунок 4) состоит из четырех процессов: процесс 1 – расчет разницы тока якоря между смежными группами тяговых электродвигателей, 2 – расчет по корреляционной связи, 3 – определение уточненного технического состояния или типа неисправности, 4 – визуализация результатов моделирования. Процессы 1, 2, 3 определяются как meta nodes (метанода) – комплексная группа из объединенных логических узлов. Объединение производится для упрощения представления. В процессе 4 логические узлы Interactive table (local) отображают следующие результаты: по процессу 1 – текущее состояние «исправен/неисправен», по 2 – пару тяговых электродвигателей с потенциальной неисправностью, по 3 – уточненное исправное состояние или тип неисправности (прогар, обрыв компенсационных обмоток, обмоток дополнительных полюсов, обмоток возбуждения или сопротивления изоляции) в виде вероятности проявления.

При оценке результатов моделирования определено, что в 74 % случаев техническое состояние определяется верно, в 62 % верно определяется пара тяговых электродвигателей с потенциальной неисправностью, в 52 % верно

конкретизируется причина неисправности: по прогарам, обрывам компенсационных обмоток и обмоток дополнительных полюсов – 46%, по прогарам, обрывам обмоток возбуждения – 53 %, по низкому сопротивлению изоляции – 51 %, по исправному состоянию – 56 %.

Четвертая глава посвящена обоснованию способа определения остаточного ресурса лимитирующих компонентов электровоза (электрографитовых щеток тяговых электродвигателей, полоза токоприемника, колесных пар) по данным их геометрических замеров.

Сохраняется тенденция механического износа лимитирующих компонентов электровоза до плановых замен при техническом обслуживании или ремонте; это происходит вследствие несвоевременной замены, ошибки в определении остаточного ресурса, деградирующей составляющей износа. В оценке их технического состояния и предупреждения выдачи в эксплуатацию с недостаточным ресурсом до следующей плановой замены предлагается применять метод наименьших квадратов с использованием геометрических замеров таких компонентов. Сравнить необходимо с установленными критическими параметрами для каждого компонента (высота электрографитовой щетки и полоза токоприемника, толщина гребня, крутизна гребня и толщина бандажа колесной пары).

Способ реализован в виде программного обеспечения АСР ОР (автоматическая система расчета остаточного ресурса), написанного на языке программирования Python. Входными данными для программного обеспечения являются полученные замеры по лимитирующим компонентам. Выходными данными – графическое представление с выводом остаточного ресурса в виде оставшегося пробега в километрах. Функции программного обеспечения позволяют сохранять вводимые результаты. Эффективность может быть достигнута за счет обязательного ввода геометрических замеров при техническом обслуживании или ремонте при объединении программного обеспечения с внутренней информационной системой железнодорожной отрасли.

Пятая глава посвящена оценке экономической эффективности и описанию этапов внедрения. Разработанные модели прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений и определения технического состояния тяговых электродвигателей используются в производственном процессе Центра мониторинга технического состояния локомотивов новых серий. В настоящее время удастся достичь снижения показателя по отказам технических средств, в том числе поездо-часов потерь от них на 3–5 %. Следствие – минимизация unplanned ремонтов (снижение наводимого ущерба по тяговым электродвигателям, преждевременное выявление пре-

дотказного состояния). Реализация модели определения технического состояния тяговых электродвигателей на электровозе возможна с учетом доработки программного обеспечения микропроцессорной системы управления и диагностики электровозов 2ЭС6. Преимущество – мгновенная обработка поступающих диагностических сигналов и онлайн-информирование локомотивных бригад о техническом состоянии. Ожидаемый технологический эффект в минимизации отказов технических средств, в том числе поездо-часов потерь от них на 15–20%. Достичь такой цели можно комплексным подходом в реализации как в программных продуктах Центра мониторинга, так и в программном обеспечении электровоза.

Срок реализации концепции – 44 месяца (обоснование проектов, планирование бюджета, подготовка технических заданий, подготовка организационно-распорядительных документов и нормативно-технической базы – 12 мес., разработка программных продуктов, программы испытаний – 6 мес., предварительная установка, промежуточные испытания – 3 мес., рассмотрение промежуточных результатов испытаний, устранение выявленных несоответствий – 2 мес., подконтрольная эксплуатация, согласование окончательных организационно-распорядительных документов – 6 мес., подготовка нормативно-технической документации, дополнений – 3 мес., тиражирование на локомотивный парк, серверное оборудование – 12 мес.).

Определены следующие параметры экономического эффекта. Единовременные капитальные затраты K складываются из затрат на разработку и установку программного обеспечения модели определения технического состояния тяговых электродвигателей для электровоза, программного обеспечения модели прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений в Центры мониторинга, доработку и установку программы АСР ОР на рабочие места пунктов технического обслуживания локомотивов и сервисных локомотивных депо которые составляют 57 740 000 руб.

Чистый доход определен по формуле (8)

$$\text{ЧД} = \sum_{t=0}^T (\Pi_{\text{ч}} - Z_t), \quad (8)$$

где T – горизонт расчета, принят равным 10 лет;

Z_t – суммарные затраты, равны капитальным затратам K .

Чистый доход определен на уровне 23 860 000 руб.

Срок окупаемости – это период, начиная с которого первоначальные вложения и другие затраты покрываются суммарными результатами. Срок окупаемости без учета стоимости капитала определен на уровне 68 мес. (5,66 лет).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате исследования обработки диагностических сообщений по оборудованию определено, что ежедневно регистрируется достаточное количество сообщений; с увеличением локомотивного парка 2ЭС6 растет их значение. Отмечена сезонность регистрации; специалистам Центра мониторинга затруднительно анализировать каждый случай регистрации, в связи с чем ценность передаваемой оперативной информации снижается.

2. Модель прогнозирования регистрации достоверных диагностических сообщений обеспечит оптимизацию обработки диагностических сообщений на 30 %, а устранение предполагаемых неисправностей на ПТО и сервисных локомотивных депо возрастет на 10–15 %. Работа модели основывается на обработке диагностических сообщений конкретного электровоза, что подчеркивает ее динамичность в плане адаптации к истории возникших неисправностей и проводимых неплановых ремонтов.

3. Определены критерии по тяговым электродвигателям: на уровне ± 150 А по разнице тока якоря между смежными группами наблюдается исправное их состояние, определенные границы корреляционной связи между диагностическими сигналами конкретизируют уточненные неисправности, связанные с электрическими повреждениями обмоток тяговых электродвигателей.

4. Модель определения технического состояния тяговых электродвигателей позволяет верно определить техническое состояние в 74 % случаев по принципу «исправен/неисправен», выявить потенциальную неисправность в 52 % случаев, уточнить тип неисправности в 56 % случаев.

5. Способ определения остаточного ресурса (оставшегося пробега до замены) лимитирующих компонентов при интеграции в информационные системы ОАО «РЖД» и обязательном использовании в техническом обслуживании и ремонте обеспечит снижение рисков выдачу электровоза с недостаточным ресурсом таких элементов до плановой замены на уровне 90–95 %.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

В изданиях, входящих в перечень ВАК

1. 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.

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

3. 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.

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

Научные работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus

5. Tyushev, I. Organization of repair of locomotives on the data of monitoring their technical condition / A. Buynosov, M. Yakimov, S. Sizy, I. Tyushev // IOP conference series: materials science and engineering. VIII International Scientific Conference Transport of Siberia. 2020. T. 918. С. 012151.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

6. Тюшев, И.А. Автоматизированная система расчета остаточного ресурса лимитирующих компонентов электровоза / И.А. Тюшев, Д.Л. Худояров, А.Н. Обухов / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №RU 2019618935, 08.07.2019. Заявка №2019617575 от 24.06.2019.

В других изданиях

7. Тюшев, И.А. Развитие систем бортовой диагностики локомотивов / Д.Л. Худояров, И.А. Тюшев // Инновационный транспорт. – 2019. – №4(30). – С. 4–48.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. Статья [4] подготовлена лично, в ней отражены результаты определения технического состояния тяговых электродвигателей. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: в [1] выявлены критерии в диагностических данных по тяговым электродвигателям с электрическими повреждениями, в [2] выполнен анализ регистрации диагностических сообщений по оборудованию, в [3] предложен метод определения достоверности диагностических сообщений, в [6] предложен способ определения остаточного ресурса лимитирующих компонентов электровоза, в [7] проведен анализ системы мониторинга технического состояния электровозов 2ЭС6, в [8] предложен способ определения отличительных критериев в диагностических данных, в [9] предложен способ определения технического состояния тяговых электродвигателей с использованием отличительных критериев, в [10] усовершенствован ранее разработанный автором способ определения технического состояния тяговых электродвигателей, в [11] исследована ситуация ресурса при эксплуатации колесных пар и предложен способ контроля их геометрических параметров.

Тюшев Игорь Андреевич

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

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 19.10.2023. Формат 60×84 1/16

Усл. печ. л. 1,2. Заказ 812 Тираж 100 экз.

УрГУПС, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66