

На правах рукописи



ЛАКИН Игорь Игоревич

Мониторинг технического состояния локомотивов по данным
бортовых аппаратно-программных комплексов

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и
электрификация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
КИСЕЛЕВ Валентин Иванович

Официальные оппоненты: **ШАНТАРЕНКО Сергей Георгиевич**,
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», проректор по научной работе.

МЕЛЬНИЧЕНКО Олег Валерьевич,
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой «Электроподвижной состав».

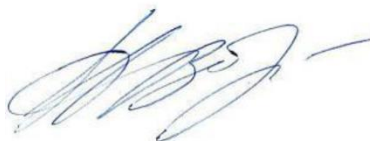
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС), г. Хабаровск.

Защита состоится «14» сентября 2016 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 218.005.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2205.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МГУПС (МИИТ) www.miit.ru.

Автореферат разослан « » июля 2016 г .

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. XXI в. ознаменовался изменениями системы управления локомотивным комплексом в соответствии с программой структурной реформы на железнодорожном транспорте (постановление Правительства РФ от 18 мая 2001 г. № 384). Отделена функция эксплуатации локомотивов (осталась в дирекции тяги – филиале ОАО «РЖД») от функции технического обслуживания и ремонта (ТОиР) локомотивов, которая с 1 июля 2014 года передана сервисным компаниям «ТМХ-Сервис» и «СТМ-Сервис». Доход сервисных компаний зависит не от объёма выполненных ремонтов, а от полезного пробега магистральных и часов работы маневровых локомотивов при условии обеспечения заданного уровня безопасности движения и надёжности локомотивов. Актуальной становится задача разработки перспективной системы мониторинга технического состояния локомотивов и режимов их эксплуатации (системы Мониторинга). Развитие бортовых аппаратно-программных комплексов локомотивов, деповских автоматизированных систем технического диагностирования и информационных систем железнодорожного транспорта позволяет решить актуальную задачу создания системы Мониторинга на современном техническом уровне, для чего необходима разработка научно-обоснованной модели системы Мониторинга.

Степень разработанности темы. Исследования надежности и работоспособности локомотивов отечественных железных дорог, систем их технического обслуживания и ремонта (ТОиР), систем диагностирования и мониторинга проводились научными коллективами НЭВЗ, ВЭЛНИИ и ЛЭС (г. Новочеркасск), КЗ и ВНИКТИ (г. Коломна), «Уральские локомотивы» и НПО «САУТ» (г. Екатеринбург), ВНИИЖТ, НИИАС, ПКБ ЦТ, ОЦВ (г. Москва), НИИТКД (г. Омск), «Дорожный центр внедрения Красноярской ж.д.», вузами МИИТ, ДВГУПС, ИрГУПС, ОмГУПС, СамГУПС, ПГУПС, РГУПС и др.

Значительный вклад внесли И.П.Исаев, В.Т.Стрельников, А.В.Горский, А.А.Воробьев, В.П.Феоктистов, В.М.Бочаров, А.В.Воротилкин, В.А.Гапанович, А.Д.Глущенко, А.Н.Головаш, В.И.Головин, А.А.Грачёв, Ю.А.Давыдов, В.Н.Игин, А.М.Замышляев, В.И.Зорин, Ю.М.Иньков, А.С.Космодамианский, Д.Л.Киржнер, С.М.Кузнецов, А.Г.Ламкин, О.Н.Назаров, А.Т.Осяев, А.В.Плакс, А.К.Пляскин, С.В.Покровский, Ю.П.Попов, Е.Н.Розенберг, И.Н.Розенберг, А.П.Семёнов, В.В.Семченко, А.В.Скребков, А.Ю.Тимченко, В.А.Четвергов, Н.Г.Шабалин, С.Г.Шантаренко, И.Б.Шубинский, E.Hedlund, N.Roddy, D.Gibson, R.Bliley и другие видные учёные и специалисты.

Настоящая диссертация является логическим развитием в современных условиях ранее выполненных научно-практических исследований в области мониторинга эксплуатации и технического состояния локомотивов как элемента системы сервисного технического обслуживания и ремонта.

Целью диссертационной работы являются повышение эксплуатационной надёжности и совершенствование организации сервисного обслуживания магистральных локомотивов посредством мониторинга их технического состояния в эксплуатации.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Разработать модель системы Мониторинга технического состояния локомотивов (системы Мониторинга), включая управление рисками наступления отказов.
2. Выполнить анализ факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность локомотивов, и выбрать информативные диагностические сигналы.
3. Разработать алгоритмы автоматизированного диагностирования технического состояния электровозов по данным их аппаратно-программных комплексов (АПК).
4. Разработать алгоритмические защиты электровозов от опасных режимов эксплуатации, приводящих к повышенной интенсивности отказов.
5. Разработать технические требования на систему поддержки принятия решений (СППР) при организации ремонта локомотивов с использованием теории нечётких множеств и теории надёжности.

Научная новизна. Разработана модель системы мониторинга технического состояния локомотивов с использованием данных бортовых аппаратно-программных комплексов, железнодорожных информационных систем и деповских систем технического диагностирования.

Разработаны алгоритмы диагностирования технического состояния электровозов на базе автоматизированного рабочего места расшифровки данных МСУЭ электровозов серии ВЛ80р.

Разработаны алгоритмические защиты от опасных режимов эксплуатации, связанных с превышением предельно допустимых токовых нагрузок, для отечественных электровозов переменного тока.

Предложены метод и аналитическая система управления рисками при организации и выполнении ремонтов локомотивов на базе автоматизированной системы управления сервисной компании.

Теоретическая и практическая значимость работы. На базе разработанной в диссертации модели системы Мониторинга предложен научно-обоснованный проект её практической реализации, в т.ч. система поддержки принятия решений при управлении рисками отказов локомотивов.

На основании статистического анализа возможностей железнодорожных информационных систем определена их функциональность в системе Мониторинга. Разработаны технические требования и эскизный проект модуля

мониторинга для использования производственно-диспетчерскими отделами сервисных локомотивных депо (СЛД) и отделами мониторинга эксплуатации локомотивов при Центрах управления тяговыми ресурсами ОАО «РЖД». Разработаны и внедрены методические указания, инструкции, положения и другие организационно-распорядительные документы.

На основании статистического анализа диагностических данных бортовых аппаратно-программных комплексов (АПК) локомотивов определена доступная в настоящее время глубина диагностирования, разработаны методы мониторинга по данным АПК. Определены фактические режимы эксплуатации и характеристики электровозов переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП). По результатам теоретических исследований разработаны требования на автоматизированное рабочее место диагностирования по данным АПК электровозов переменного тока. Разработаны и апробированы алгоритмические защиты электровозов переменного тока с ВИП от опасных режимов эксплуатации.

Методология и методы исследования. В модели системы Мониторинга использованы положения теории локомотивной тяги в сочетании с методами теории нечётких множеств, управления рисками, надёжности и вероятностно-статистическими методами. Для расчётов и анализа использованы математические функции пакета программ *MS Excel* и собственные программы, написанные на алгоритмическом языке *Visual Basic for Applications (VBA)*.

Положения, выносимые на защиту:

Модель системы мониторинга технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов с использованием данных информационных систем железнодорожного транспорта и деповских систем технического диагностирования.

Алгоритмы автоматизированного диагностирования технического состояния электровозов переменного тока с ВИП на базе автоматизированного рабочего места расшифровки данных МСУЭ.

Алгоритмические защиты от опасных режимов эксплуатации электровозов, связанных с превышением предельно допустимых токовых нагрузок.

Метод и аналитическая система управления рисками при организации и выполнении ремонтов локомотивов на базе автоматизированной системы управления сервисной компании.

Технические требования на систему поддержки принятия решений (СППР) при организации ремонтов локомотивов с использованием теории нечётких множеств и теории надёжности.

Степень достоверности научных положений и теоретических результатов диссертационной работы достигнута использованием методов статистического анализа при оценке достоверности выводов. При этом исходные выборки составили более 4 млн. наблюдений по 11-и различным сериям электровозов 17-и локомотивных депо. Обработаны данные о работе 1083-х локомотивов. Анализ данных АПК выполнен по 61-му локомотиву за 1525 часов их эксплуатации. Результаты исследований внедрены в работу сервисных локомотивных депо, что также подтверждает достоверность полученных результатов и сделанных научных выводов.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены, обсуждены и получили одобрение на международной научно-практической конференции (НПК) «Эксплуатационная надежность подвижного состава» (НИИТКД, Омск, 2013 г.), 5-й, 6-й и 7-й международных НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (ИрГУПС, Иркутск, 2014 – 2016 гг.), 1-й и 2-й международных НПК «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов» (МИИТ, ТМХ-Сервис, Локомотивные Технологии, Москва, 2014, 2015 гг.), Всероссийской международной НПК «120 лет железнодорожного образования в Сибири» (КрИЖТ, Красноярск, 2014 г.), 2-й всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов» (ОмГУПС, Омск, 2014 г.), 16-й НПК «Безопасность движения поездов» (МИИТ, 2015), 3-й всероссийской НПК с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава». (ОмГУПС, г. Омск, 2015 г.), НПК «Наука МИИТа – Транспорт» (МИИТ, 2016 г.). Диссертация доложена и одобрена на заседаниях кафедр «Электроподвижной состав» ИрГУПС (г. Иркутск, 2015 г.) и «Электропоезда и локомотивы» МИИТ (2016 г.).

Публикации. Основные положения диссертации и полученные результаты опубликованы в 22-х печатных работах общим объёмом восемь печатных листов, в т.ч. две научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. В публикации входят две монографии и 9 статей без соавторов. Две работы опубликованы за рубежом.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка сокращений, списка литературы из 206 источников. Диссертация содержит 195 страниц основного текста, включая 39 таблиц и 77 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены общая характеристика работы, цели исследования, структура исследования и аннотация содержания.

В первом разделе обоснована актуальность исследования, выполнен анализ (литературный обзор) мирового и отечественного опыта мониторинга технического состояния локомотивов, уровня развития информационных систем железнодорожного транспорта, бортовых аппаратно-программных комплексов (АПК) отечественных локомотивов и деповских автоматизированных систем технического диагностирования. Поставлены задачи исследований.

В мировой практике накоплен большой опыт мониторинга по данным АПК. Наиболее целостным следует считать опыт компании «*General Electric*», в которой на базе завода-производителя тепловозов (г. Эри, США) создан Центр Мониторинга (ЦМ), где по данным бортовых АПК *BrightStar Sirius Locomotive Control* собираются и обрабатываются данные о техническом состоянии более 15 тыс. тепловозов. На локомотиве каждые несколько секунд по данным датчиков проверяется наличие одного из 6 тыс. возможных проявлений отказов, при выявлении которого в ЦМ передаётся код ошибки. На экран диспетчера для принятия решения выводится информация - статистическая о возможных отказах и технологическая о порядке их устранения. Аналогичные системы создаются и другими мировыми производителями локомотивов – *Siemens AG, Bombardier, Alstom* и др.

Опыт мониторинга есть у отечественных заводов-производителей: НЭВЗ совместно с ВЭлНИИ и ЛЭС, «Уральские локомотивы» совместно с НПО «САУТ»; БМЗ совместно с ВНИКТИ. Есть опыт у НИИТКД, НИИАС, ВНИИЖТ, ОЦВ, «АВП Технология», ДЦВ Красноярской ж.д., МИИТ, ДВГУПС, ИрГУПС, ОмГУПС, СамГУПС, РГУПС, ПГУПС и др. вузов и НИИ.

На отечественном железнодорожном транспорте накоплен уникальный опыт в депо Рыбное Московской железной дороги (ж.д.), где совместно с учёными кафедры «Электрическая тяга» МИИТ была создана система статистического управления надёжностью электровозов серии ВЛ8. Доказано, что система технического обслуживания и ремонта локомотивов (ТОиР) должна содержать подсистему факторного анализа статистической информации о работе и техническом состоянии локомотивов с поддержкой принятия соответствующих корректирующих решений (мер).

Предпосылкой для создания научно обоснованной системы Мониторинга является развитие информационных систем железнодорожного транспорта, бортовых АПК локомотивов, деповских систем диагностирования.

Функциональность этих систем определяется при разработке модели системы Мониторинга, которая должна максимально приблизить систему ТОиР к ремонту по фактическому техническому состоянию локомотивов. Достижимость этой цели определяется в процессе исследования.

Во втором разделе по результатам выполненного анализа предложена структура модели Мониторинга (рисунок 1) и методы математической обработки и анализа данных.

Модель содержит подсистему сбора данных с АПК. Недостающие в АПК данные берутся из деповских автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД). Информация об эксплуатации локомотивов берётся из информационных систем железнодорожного транспорта (АСУЖТ). Ключевым элементом системы Мониторинга является подсистема управления рисками: логическая и математическая обработка данных с прогнозированием наличия риска отказов локомотивов для последующего принятия предупредительных мер. При этом риск R определяется как совокупность вероятности наступления опасного события и его возможных последствий:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^I (1 - m_i * R_i); \quad (1)$$

$$R_i = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - R_{ik}); \quad (2)$$

$$R_{ik} = K_{ik} * Q_{ik}, \quad (3)$$

где $R \in [0, 1]$ – совокупный риск, состоящий из рисков $R_i \in [0, 1]$ с весом $m_i \in [0, 1]$: 1 – максимальный вес, 0 – отсутствие последствий; $i \in [1, I]$.

R_{ik} – риск наступления отказа i из-за фактора $k \in [1, K]$;

Q_{ik} – вероятность опасного события (проявления фактора);

K_{ik} – коэффициент влияния фактора на риск опасного события $K_{ik} \in [0, 1]$.

«Классические» методы управления рисками имеют существенный недостаток из-за «жёсткости» применяемых понятий. Например, если полновесный поезд массой 6300 т (событие $A=\{0, 1\}$) следовал по руководящему подъёму (событие $B=\{0, 1\}$) со скоростью ниже заданной в 40 км/ч (событие $C=\{0, 1\}$), то возникает риск отказа тяговых электродвигателей (ТЭД) локомотива $R = \{0, 1\}$ из-за перегрева с последующим пробоем изоляции:

$$R = A \text{ and } B \text{ and } C. \quad (4)$$

В практике управления рисками возникает проблема: считать ли полновесным поезд массой 6300-1 т, нарушением скорость 40-1 км/ч и только часть подъема, пройденного с нарушением? В диссертации описанную проблему предложено устранить использованием методов теории нечётких множеств, нашедшей в последние десятилетия успешное применение в технике.

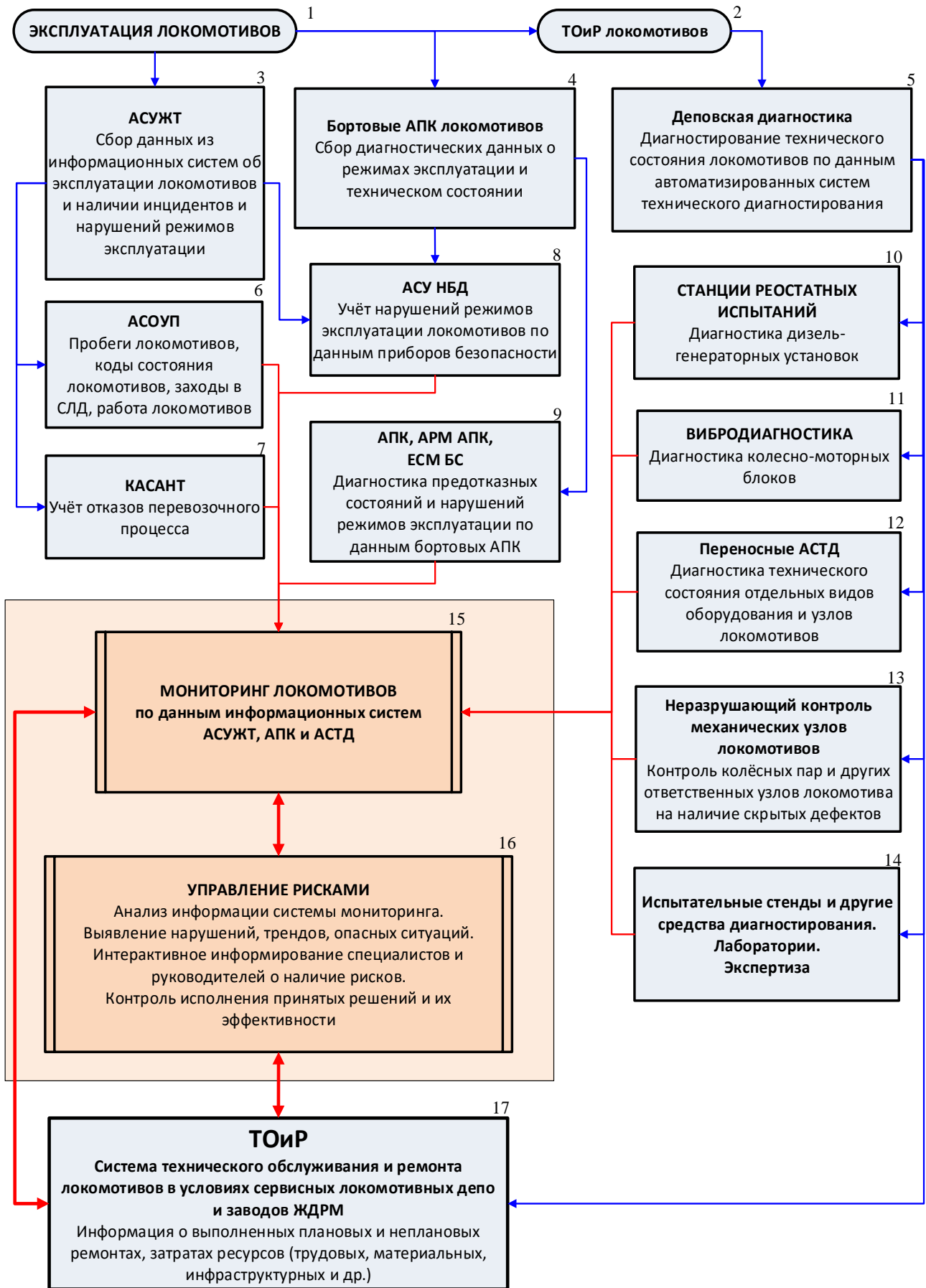


Рисунок 1 – Структура модели системы Мониторинга

В теории нечётких множеств основным понятием является собственно нечёткое множество A (*Fuzzy Set*), которое задаётся множеством входящих в него элементов $x \in X$ и функцией принадлежности $\mu_A(x) \in [0, 1]$ элементов x к множеству A (рисунок 2). В этом случае события A, B, C будут задаваться как:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}; B = \{(y, \mu_B(y)) \mid y \in Y\}; C = \{(z, \mu_C(z)) \mid z \in Z\}, \quad (5)$$

где: x, y, z – значения массы поезда, скорости и % следования с нарушением;

X, Y, Z – множества возможных значений x, y, z ;

$\mu_A(x), \mu_B(y), \mu_C(z)$ – функции принадлежности текущих значений x, y, z к множествам A, B, C (принимает значение в закрытом диапазоне от 0 до 1).

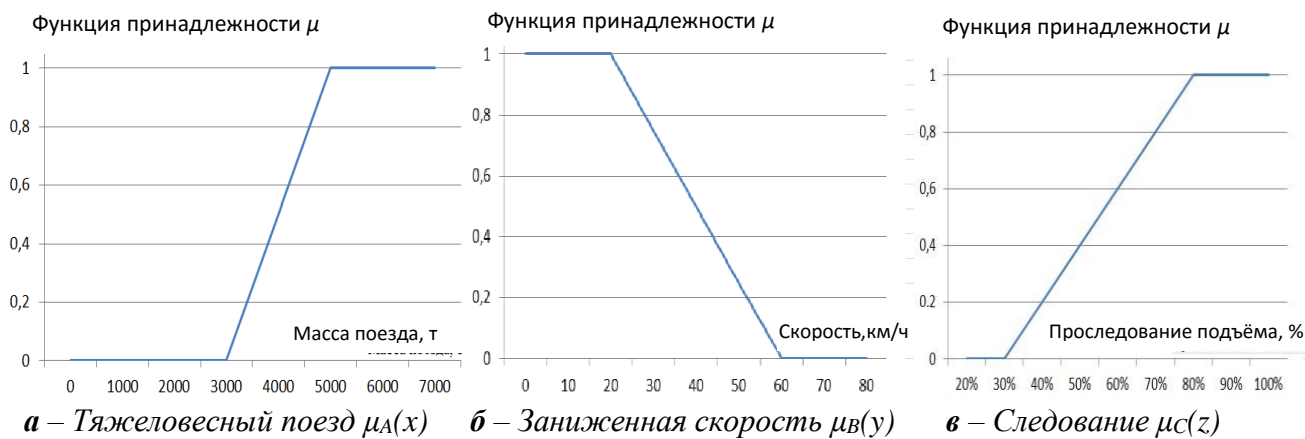


Рисунок 2 – Примеры функций принадлежности к нечётким множествам

При нечёткой логике риск наступления отказа R определяется по формуле:

$$R = \mu_A(x) * \mu_B(y) * \mu_C(z). \quad (6)$$

В разделе рассмотрены примеры логических утверждений управления рисками, предложен алгоритм реализации управления рисками с использованием теории нечётких множеств. На основании потребностей системы Мониторинга предложены несколько типов нечётких множеств: простые (как в рассмотренном примере), многопараметрические («надёжный локомотив», «сложное обслуживание» и др.), количественные (число неплановых ремонтов, срабатываний защит и др.), трендовые (рассматривается не сам параметр, а его тренд), корреляционные (множеством является зависимость одного параметра от другого), статистические (математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации и др.).

Многопараметрические множества D предлагается рассматривать как совокупность определяющих его простых множеств параметров. Например, многопараметрическое множество «Надёжный локомотив» определять через однопараметрические множества: число отказов N , время восстановления T и стоимость неплановых ремонтов Q :

$$D = \{(n, \mu_D(n)) \mid n \in N, (t, \mu_D(t)) \mid t \in T, (q, \mu_D(q)) \mid q \in Q, \}; \quad (7)$$

$$\mu_D(n, t, q) = \mu_D(n) * \mu_D(t) * \mu_D(q). \quad (8)$$

Методы теории нечётких множеств расширяют возможности вероятностных методов в части поддержки принятия решений за счёт формализации использования логических утверждений о возможных рисках.

На рисунке 3 приведена блок-схема предлагаемого алгоритма управления рисками с использованием теории нечётких множеств. На основании опыта ТООР и анализа причин отказов локомотивов формулируются логические утверждения условий R_i , при которых наступает отказ локомотива (блок 2). Для сформированного логического утверждения определяются входящие в него нечёткие множества A , B , C и др., определяются параметры этих нечётких множеств $A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$, $B = \{(y, \mu_B(y)) \mid y \in Y\}$, $C = \{(z, \mu_C(z)) \mid z \in Z\}$ (блок 3). Статистически или экспертно определяется вес риска m_i (блок 4). Для заданных параметров риска R_i (блоки 2 – 4) в результате мониторинга эксплуатации, технического состояния локомотивов и режимов их работы (блок 5) с заданной периодичностью рассчитываются значения рисков R_i (блок 6).

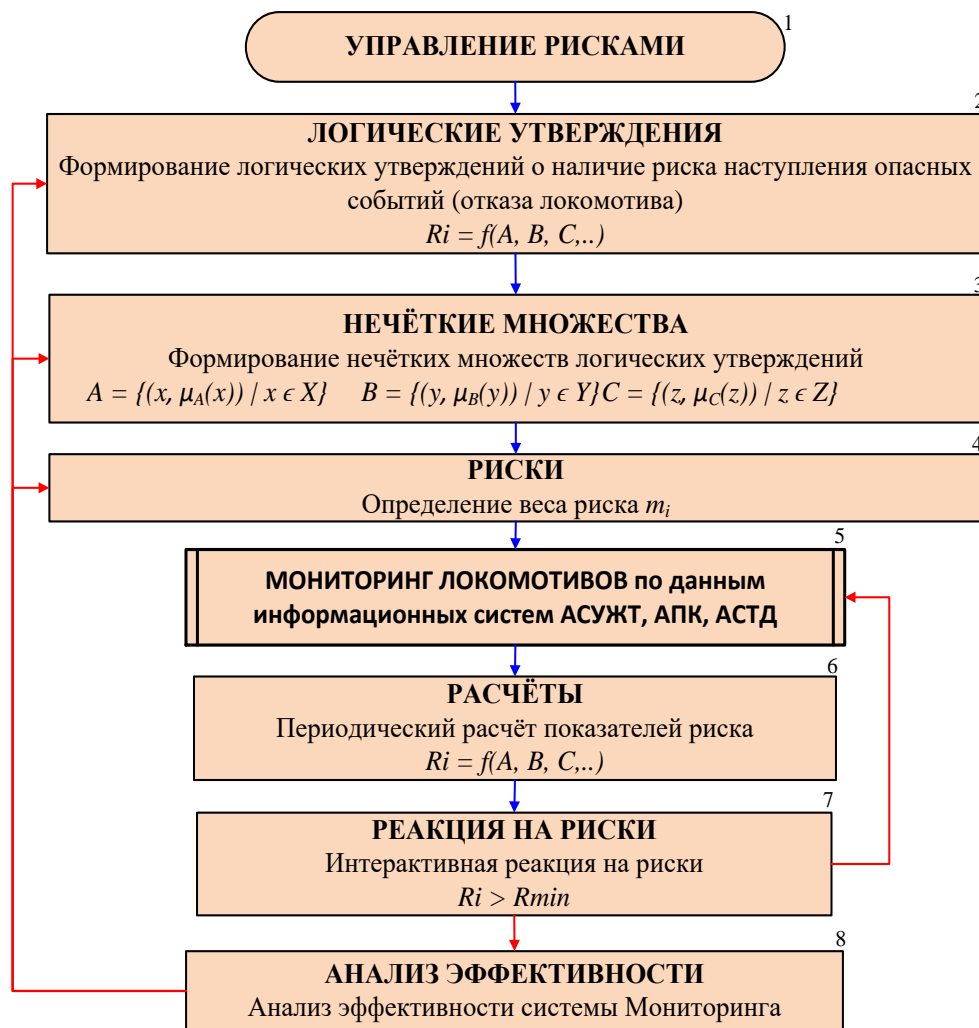


Рисунок 3 – Алгоритм управления рисками

Если уровень риска превысил предельное значение $R_i > R_{imin}$ (блок 7), то принимаются корректирующие меры. Одновременно контролируется эффективность управления риском i с использованием логического утверждения R_i (блок 8). При необходимости вносятся изменения в логическое утверждение, нечёткие множества, в функции принадлежности, периодичность анализа и др. (блоки 2 - 4).

Предлагаемый метод управления рисками реализуется на базе информационных систем сервисных компаний путём инкапсуляции предложенного алгоритма. Реализуемость метода доказана статистическим анализом информативности данных АПК и АСУЖТ в разделах 3 и 4.

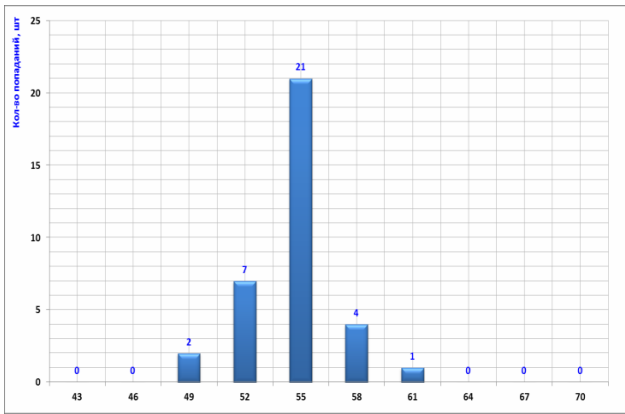
Третий раздел посвящён анализу эксплуатационных показателей локомотивов по данным АСУЖТ (как самая информативная выбрана АСОУП). Выполнен статистический анализ данных об эксплуатации локомотивов, в результате чего обоснован порядок их использования в модели системы Мониторинга. Предложены алгоритмы использования информационных систем при мониторинге эксплуатации локомотивов.

При анализе использовались унифицированные методы статистического анализа. Наличие закономерностей определялось проверкой принадлежности полученных математических ожиданий m_x наблюдаемых физических величин x_i из выборки N и их среднеквадратичных отклонений σ_x законам распределения случайной величины, прежде всего, нормальному и логнормальному законам с использованием критерия Пирсона χ_p^2 .

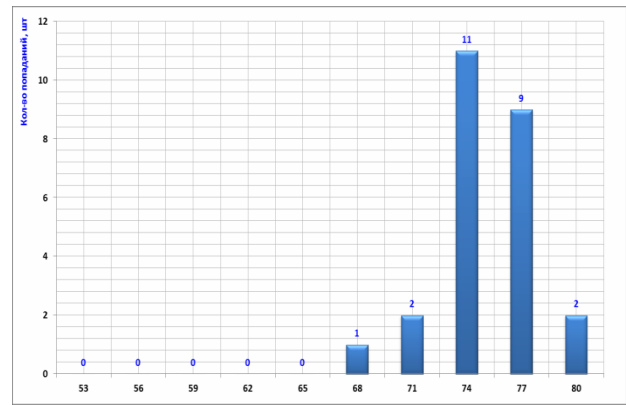
Теоретическое число попаданий Δn_j в диапазон j [$x_{\text{ЛЕВОЕ}}$, $x_{\text{ПРАВОЕ}}$] определялось как интеграл функции распределения выбранного закона $f(x)$ (на практике – суммирование с числом диапазонов 10 тысяч, когда $\Delta x \approx dx$):

$$P_j = \int_{x_j^{\text{Л}}}^{x_j^{\text{П}}} f(x) dx \quad (9)$$

Для анализа из АСОУП в *Excel* экспортированы данные об эксплуатации электровозов 11 различных серий (ВЛ80р, 3ВЛ80р, ВЛ80с, 3ВЛ80с, ВЛ85, ЭП1, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К, 2ЭС4К, 3ЭС4К) из 17 депо приписки. Всего 31 выборка по 1083-м локомотивам с общим числом событий 4 226 438. Данные обработаны с использованием функций *Excel* и специально написанных программ на *Visual Basic for Applications (VBA)*. Результаты исследований представлены визуально в виде гистограмм (примеры на рисунках 4 - 6).

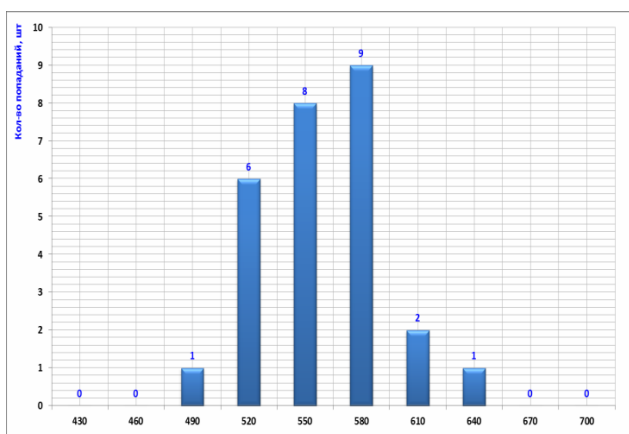


а – 3ВЛ80р ($P_\phi = 0,7$)

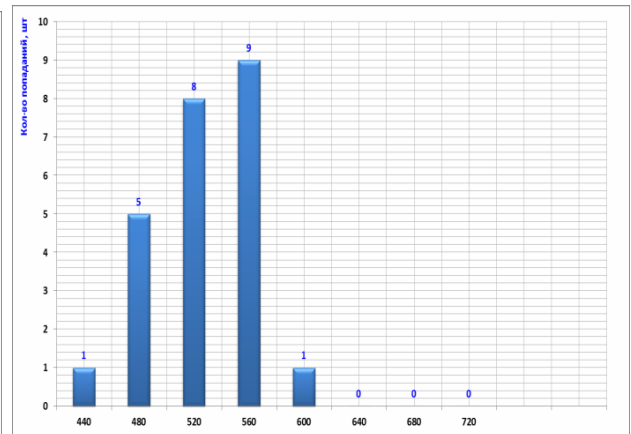


б – ВЛ80р ($P_\phi = 0,95$)

Рисунок 4 – Удельная работа ВЛ80р

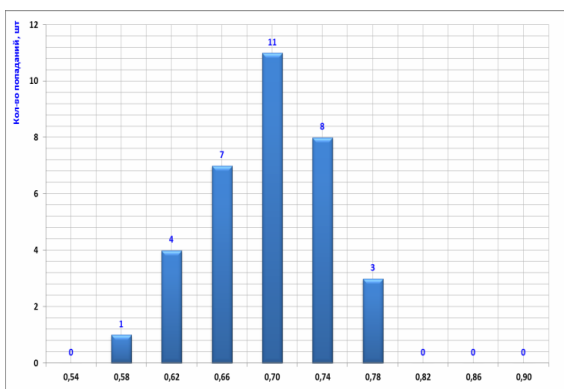


а – 3ВЛ80р ($P_\phi = 0,95$)

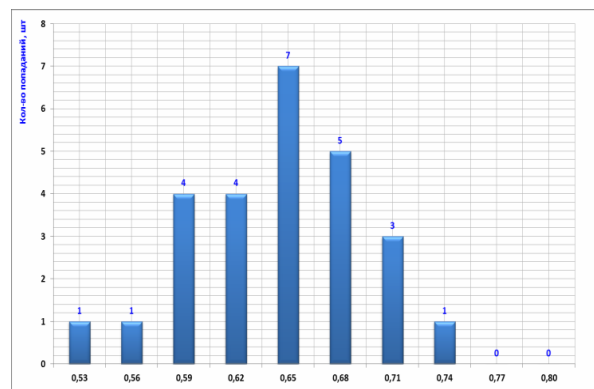


б – ВЛ80р ($P_\phi = 0,90$)

Рисунок 5 – Среднесуточный пробег ВЛ80р



а – 3ВЛ80р ($P_\phi = 0,98$)



б – ВЛ80р ($P_\phi = 0,95$)

Рисунок 6 – Коэффициент готовности ВЛ80р

Выполненные расчёты с проверкой на унимодальность и соответствие нормальному закону распределения показали, что анализ эксплуатационной работы следует вести отдельно по каждой серии для каждого локомотивного депо или полигона. В этом случае данные подчиняются нормальному или логнормальному закону распределения случайной величины с вероятностью принадлежности P_ϕ в диапазоне $P_\phi = 0,6 - 0,8$ и реже $P_\phi = 0,8 - 0,98$.

При сервисном обслуживании локомотивов в качестве основного показателя надёжности локомотивов выбран коэффициент технической готовности (КТГ) локомотива n-ой серии:

$$\text{КТГ}_{n\phi} = T_{pcn} / (T_{pcn} + T_{отп} + T_{плп} + T_{аиз}), \quad (10)$$

где: T_{pcn} - время пребывания в работоспособном состоянии;
 $T_{отп}$ - суммарное время пребывания на гарантийном ремонте;
 $T_{плп}$ - суммарное время пребывания на ТОиР;
 $T_{аиз}$ - суммарное время ожидания ТОиР.

Анализ показал, что снижение значения КТГ определяется не столько надёжностью локомотива, сколько логистическими издержками, прежде всего ожиданиями ТОиР (ТО-2 – 17 %, ТО-2, ТР-1 – 16 %, НР – 10 %). Сами неплановые ремонты (НР) составляют только 8 % в потерях КТГ.

В диссертации выполнен корреляционный анализ взаимного влияния эксплуатационных и технических параметров. Для анализа вычислялся коэффициент корреляции $r_{xy} \in [-1, 1]$ (далее по тексту – R):

$$r_{yx} = \frac{\alpha_{11}(y, x) - m_y m_x}{\sigma_y \sigma_x}, \quad (11)$$

где $\alpha_{11}(y, x)$ – второй смешанный начальный момент, характеризующий математическое ожидание попарного произведения случайных величин x_i и y_i , составляющих выборки исходных данных объёма N .

Корреляционный анализ взаимного влияния эксплуатационных показателей локомотивов позволил выявить ряд закономерностей. В частности, несмотря на ярко выраженное тримодальное распределение массы грузовых поездов (рисунок 7), переход с учёта работы локомотивов по пробегу к тонно-километровой работе не целесообразен, т.к. коэффициент корреляции между пробегом и работой составляет $R=0,902$.

Выявлено высокое влияние на КТГ удельной работы ($R=0,93$), интенсивности отказов ($R=0,98$) и суточного пробега ($R=0,83$). Число НР ощутимо влияет на производительность локомотива ($R=-0,49$).

Определены основные типы нечётких множеств АСОУП для модели системы Мониторинга: допустимая масса поезда, полновесный поезд, тяжеловесный поезд, длинносоставный поезд, «перепробег» и «перепростой» локомотива по каждому виду ТОиР, надёжный локомотив, интенсивная эксплуатация локомотива, высокий/низкий КТГ.

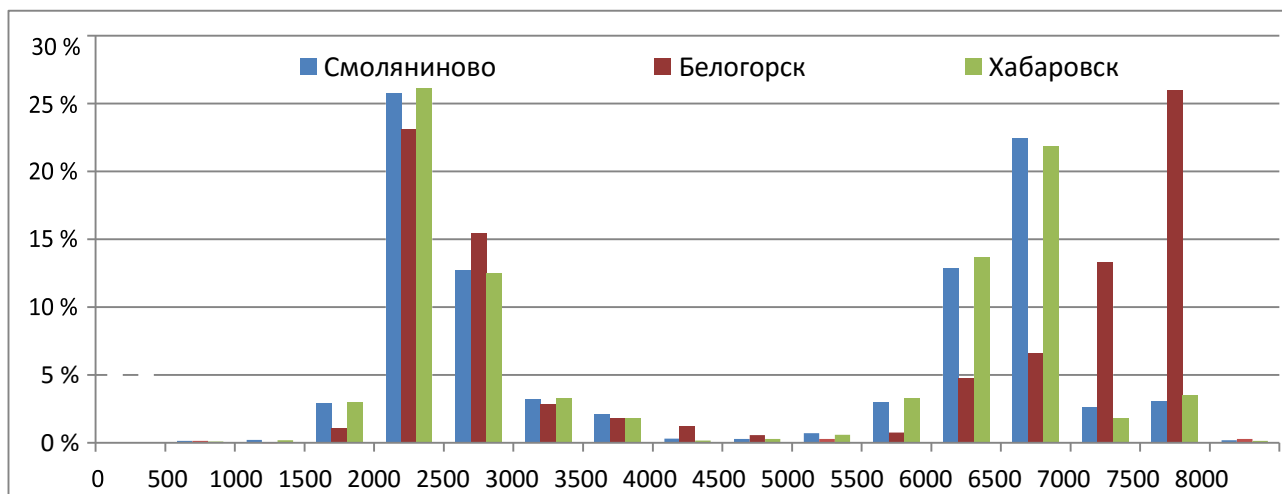


Рисунок 7 – Распределение массы поездов электровозов 4ЭС5К

Анализ показал, что АСОУП является информативным источником данных для системы Мониторинга.

Четвёртый раздел посвящён анализу возможностей современных бортовых АПК локомотивов при реализации системы Мониторинга. Выполнен анализ диагностической функциональности АПК. Проведен комплексный анализ статистических данных АПК на примере электровозов серии ВЛ80р с МСУЭ. Определены диагностические возможности современных бортовых систем управления. Определено место АПК в модели системы Мониторинга. Отдельным разделом описаны предлагаемые алгоритмические защиты электровозов переменного тока от опасных (обладающих риском отказа) режимов эксплуатации.

Основными диагностическими параметрами любого объекта диагностирования являются его входы $x \in X$ и выходы $y \in Y$. Современные АПК представляют собой конечные автоматы (Мура и Миля), реализующие функцию преобразования входных сигналов $x \in X$ в выходные $y \in Y$ в момент времени $t+1$ с учетом предыдущего в момент времени t внутреннего состояния $z \in Z$ во времени:

$$Y(t+1) = H(t, X(t), Y(t), Z(t)). \quad (12)$$

Зная оператор перехода H работоспособного локомотива, по входным X и выходным Y сигналам АПК можно проверить правильность функционирования локомотива. Проверка работоспособности предполагает полную проверку всех предусмотренных преобразований оператора H , что не всегда возможно по итогам поездки: за поездку реализуются не все возможные режимы работы, не будет проверена работоспособность всех защит. Проверка исправности локомотива требует существенно больше датчиков для измерения внутренних параметров $z \in Z$:

$$Z(t+1) = H(t, X(t), Y(t), Z(t)). \quad (13)$$

Таким образом, диагностические возможности АПК изначально ограничены проверкой правильности функционирования локомотива, а при увеличении времени наблюдения – проверкой работоспособности. При анализе возможностей АПК определяется их функциональность - недостающие функции реализуются стационарными и переносными деповскими автоматизированными системами технического диагностирования (АСТД).

По предложенной методике выполнен анализ диагностической функциональности бортовых аппаратно-программных комплексов управления электровозов переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП). Для исследования выбран АПК серии МСУЭ модернизированных электровозов переменного серии ВЛ80р, силовая схема которых является типовой для всех отечественных электровозов с ВИП. ВЛ80р с МСУЭ выбран из-за доступности данных для исследования. Данные с МСУЭ электровозов ВЛ80р собраны с помощью переносных flash-накопителей. В процессе исследования обработаны данные 61-го электровоза по 1 млн. событий у каждого (объем выборки ограничивался возможностями *Excel*). Всего проанализировано 1525 часов работы локомотивов.

Рассчитаны распределения токов у электровозов в эксплуатации (рисунок 8). 54 % времени электровозы находятся в тяговом режиме, 34 % - в режиме выбега, 12 % - в рекуперации. Средний ток в тяге находится в диапазоне от 400 до 500 А. При этом максимальные токи - в 4-й зоне регулирования. Максимальное значение достигало 1300 А, что превышает допустимые в 1200А. В режиме рекуперации токи существенно меньше, что говорит об использовании режима рекуперации в основном для ограничения скорости.

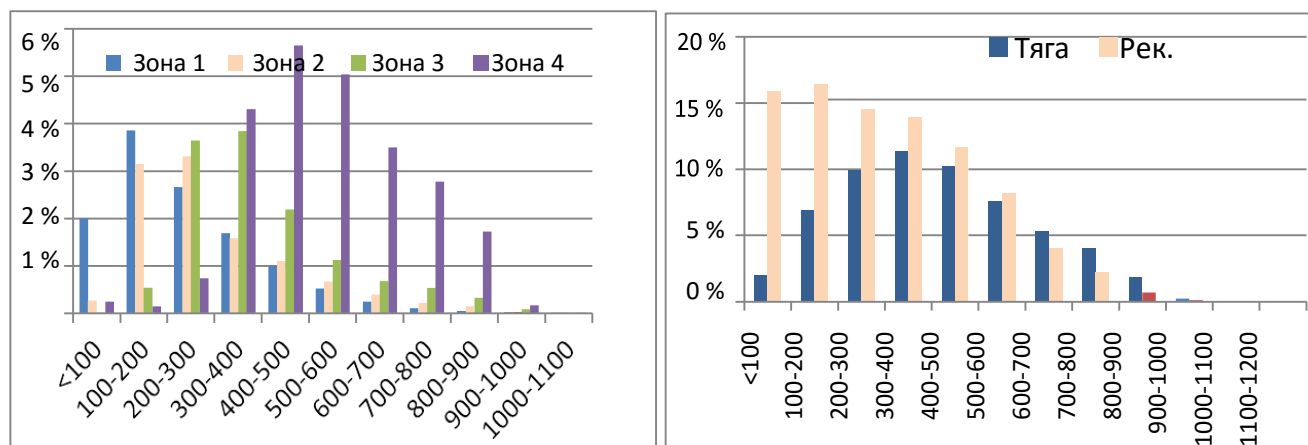


Рисунок 8 – Гистограммы распределения токов электровозов

Анализ углов управления ВИП показал, что 37 % времени в тяге угол регулирования ВИП находится в диапазоне 150 – 160 электрических градусов (эл.град.), что соответствует режиму выбега – 156 эл.град. в первой зоне.

Значения угла регулирования ниже 9 эл.град. свидетельствуют о неисправности датчиков угла коммутации. Аналогично угол 160 эл.град. в рекуперации указывает на неисправность датчиков. Отмечено, что с углами 50-130 эл.град. электровоз следует дольше, чем в диапазонах 10-50, 130-160 эл.град., что очевидно объясняется большим приращением напряжения в этом диапазоне.

На рисунке 9 показано распределение скоростей в тяге и рекуперации. Высокие скорости в рекуперации подтверждают вывод о работе в режиме ограничения скорости с малыми токами на затяжных спусках.

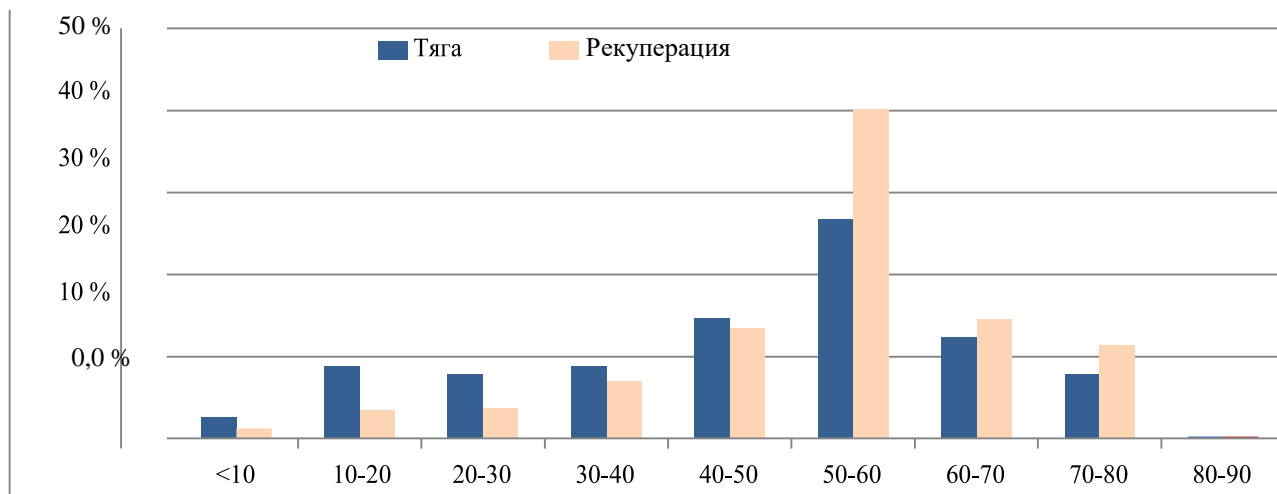


Рисунок 9 – Скоростные режимы работы электровозов

Анализ коэффициента корреляции токов двигателей показал, что по его значению ниже 0,95 (теоретически должен быть 1, фактически – 0,997) можно судить о наличии предотказных состояний. Разброс токов ТЭД составил в среднем 15 %, что свидетельствует о необходимости подбора тяговых характеристик двигателей с целью выравнивания токов.

Таким образом, современные АПК представляют собой полноценный источник диагностической информации для системы Мониторинга. Развитие диагностической функциональности возможно за счёт установки дополнительных датчиков, увеличения объёма записи данных, развития алгоритмов обработки данных, реализации дистанционной передачи данных.

Следующее направление исследований – алгоритмические защиты. В ходе анализа данных АСОУП и МСУЭ обнаружено наличие многочисленных нарушений режимов эксплуатации электровозов (рисунок 10), существенно снижающих их надёжность. Алгоритмические защиты за счёт доработки программного обеспечения АПК позволяют исключить работу локомотива в опасных режимах. У электровозов переменного тока с ВИП следует снижать мощность ВИП (снижать напряжение на ТЭД), ограничивать ток ТЭД.

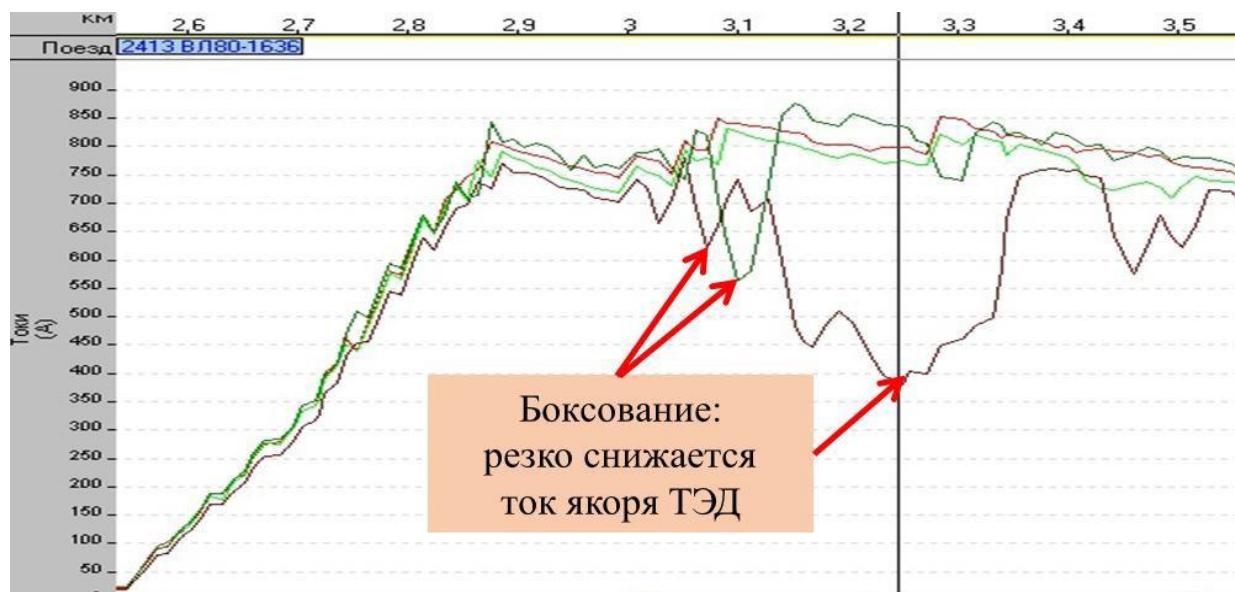


Рисунок 10 – Пример нарушения режимов эксплуатации

Одно из частых нарушений – следование поезда на руководящем подъеме с пониженной скоростью (рассмотрен ранее). Второе – превышение пяти минут тяги с током $I_{я}=1200\text{А}$. В последнем случае предложено контролировать объем выделяемой энергии Q и, в случае превышения, снижать ток тяговых электродвигателей:

$$Q = I_{я}^2 * r * t, \quad (14)$$

где $I_{я}$, r – ток якоря и сопротивление ТЭД; t – время наблюдения.

Предлагается при допущении, что за $t < 10$ минут отвода тепла практически не будет, рассчитывать выделенное тепло, которое не должно превышать максимально допустимое значение:

$$Q_{\text{MAX}} = 1200\text{А} * 1200\text{А} * 5 * 60 * 0,1 = 43,2 \text{ МДж}. \quad (15)$$

Разработаны алгоритмические защиты от следующих опасных режимов эксплуатации: превышение пятиминутных токов ТЭД по суммарной выделяемой энергии; боксование и юз; завышенное напряжение на ТЭД при повышенном напряжении в контактной сети; многократное срабатывание защит, большой разброс токов ТЭД, отсутствие прогрева ТЭД перед поездкой, применение вспомогательного тормоза в режиме тяги (для борьбы с боксованием). От перевода МСУЭ в режим «Ручной» для блокирования защит и от отключения бортового компьютера с целью исключения записи диагностических данных реализована защита ограничением тока на уровне длительного значения. Теоретически аналогично можно защищаться от нарушения норм пробега по видам ремонта ТОиР: в случае превышения норм на 10% ограничивать ток ТЭД на уровне длительного значения. Для этого в АПК следует ввести информацию о пробегах локомотива по видам ТОиР и нормативные данные.

В пятом разделе описана модель системы Мониторинга и её практическая реализация, оценена экономическая эффективность исследования.

Модель системы Мониторинга представляет собой совокупность подсистемы сбора и обработки данных бортовых аппаратно-программных комплексов, информационных систем и депокских систем диагностирования (см. рисунок 1) и подсистемы управления рисками на базе математических и логических методов теории статистики, надёжности и нечётких множеств.

Исследования в области Мониторинга эксплуатационных показателей электровозов реализованы в алгоритмах модуля мониторинга эксплуатации локомотивов, реализующего функции контроля суточных и среднесуточных пробегов, КТГ и простоя на ремонте, функции прогнозного и оперативного планирования постановки локомотивов на ремонт и др.

Разработаны и реализованы алгоритмы автоматизированного диагностирования на базе компьютерного рабочего места расшифровки данных МСУЭ электровозов ВЛ80р (АРМ МСУЭ). АРМ внедрён в сервисном локомотивном депо «Боготол-Сибирский», а также используется в Дорожном центре внедрения Красноярской ж.д.

По предложенным алгоритмическим защитам модернизирован электровоз ВЛ80р-1689. Испытания и опытная эксплуатация локомотива показали высокую эффективность предложенных алгоритмических защит. При опытной эксплуатации локомотива зафиксированы многократные срабатывания алгоритмических защит и даже три остановки на перегоне по вине машиниста. Для реализации алгоритмических защит электрическая схема электровоза практически не изменялась. Добавлен только датчик напряжения на тяговом электродвигателе. Защиты реализованы за счёт доработки программного обеспечения МСУЭ силами ДЦВ Красноярской ж.д. Накопленный опыт применим для всех серий электровозов переменного тока с ВИП: подготовлены технические требования для алгоритмической защиты электровозов серий Э5К, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К ЭП1М и др.

Разработаны технические требования на систему поддержки принятия решений (СППР), реализуемую на базе предложенного метода управления рисками с использованием теории нечётких множеств и теории надёжности. В Excel с использованием VBA реализован прототип СППР.

Технико-экономический эффект достигается за счёт сокращения числа unplanned ремонтов, нарушений режимов эксплуатации и предотказных состояний локомотивов. Кроме того, улучшается использование локомотивного парка за счёт сокращения логистических потерь и повышения качества планирования при постановке локомотивов на ремонт, что даёт возможность уменьшить приписной парк.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований получены новые научно обоснованные технические и технологические решения и разработки, направленные на совершенствование организации ремонта и повышение эксплуатационной надёжности магистральных локомотивов, что позволит повысить информативность контроля технического состояния локомотивов в эксплуатации, сократить число unplanned ремонтов и объём дополнительных работ во время плановых ремонтов, снизить продолжительность простоя локомотивов в ремонте. Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Разработана модель системы мониторинга технического состояния локомотивов (система Мониторинга), основу которой составляют система сбора информации (с бортовых аппаратно-программных комплексов (АПК) локомотивов, информационных систем железнодорожного транспорта и деповских автоматизированных систем технического диагностирования) и аналитическая система управления рисками наступления отказов.
2. Выполнен анализ факторов, влияющих на эксплуатационную надёжность магистральных электровозов, определены информативные диагностические сигналы для системы мониторинга их технического состояния в эксплуатации. Наиболее информативными для системы Мониторинга диагностическими сигналами АПК являются токи тяговых электродвигателей (ТЭД). По их значению, скорости изменения, разбросу, взаимной корреляции и др. диагностируются как техническое состояние ТЭД, цепей управления, силовых цепей и оборудования, так и нарушения режимов эксплуатации. Второй группой диагностических сигналов являются сигналы скорости вращения колёсных пар, по которым контролируется скорость движения поезда, наличие боксования и юза, а в сочетании с током - характеристики колёсно-моторных блоков и их разброс. Дополнительные диагностические сигналы (срабатывание защит, температура, давление, напряжение в контактной сети, на ТЭД и в цепях локомотива, другие сигналы с аналоговых и бинарных датчиков) позволяют повысить качество и глубину диагностирования. При этом от диагностирования правильности функционирования и работоспособности можно переходить к проверке исправности.
3. Разработаны алгоритмы диагностирования технического состояния электровозов на базе автоматизированного рабочего места (АРМ) расшифровки данных МСУЭ. АРМ внедрён в сервисном локомотивном депо «Боготол-Сибирский» и в Дорожном центре внедрения Красноярской железной дороги (ДЦВ Красноярской ж.д.).
4. Доказано, что корреляционный анализ параметров однотипного оборудования электровозов между собой (например, токов ТЭД, скоростей вращения колёсных пар) с другими параметрами локомотива позволяет выявлять наличие предотказных состояний.

5. Теоретически обоснована с использованием методов теории нечётких множеств в сочетании с методами управления рисками, методами статистического анализа и управления надёжностью адекватность параметров системы мониторинга диагностируемых узлов локомотивов их техническому состоянию.
6. Информационные системы железнодорожного транспорта позволяют анализировать параметры эксплуатации локомотивов, которые являются обязательным дополнением к диагностической информации АПК.
7. Разработаны алгоритмические защиты от опасных режимов эксплуатации электровозов, в т.ч. связанных с превышением предельно допустимых токовых нагрузок. Доказано, что значительная часть нарушений режимов эксплуатации может быть исключена за счёт применения в программном обеспечении АПК алгоритмических защит от опасных (обладающих риском отказа) режимов работы локомотива. Разработанные алгоритмические защиты испытаны на электровозах серии ВЛ80р с МСУЭ и показали свою высокую эффективность.
8. Предложены метод и аналитическая система управления рисками при организации и выполнении ремонтов локомотивов на базе автоматизированной системы управления сервисной компании. Разработаны технические требования на систему поддержки принятия решений (СППР) при организации ремонтов локомотивов с использованием теории нечётких множеств и теории надёжности.
9. Разработанная модель системы Мониторинга внедрена в работу сервисной локомотивной компании ООО «ТМХ-Сервис» группы компаний «Локомотивные технологии» в виде программного модуля мониторинга, автоматизированного рабочего места расшифровки данных АПК, алгоритмических защит и системы поддержки принятия решений (СППР). Практическая реализация модели подтверждает правильность предложенных технических и технологических решений.
10. Использование данных мониторинга технического состояния локомотивов в эксплуатации и при организации ремонтов позволяет снизить число отказов локомотивов, а также продолжительность простоя локомотивов в депо.
11. Достоверность полученных в диссертации результатов и выводов обеспечена большим объёмом обработанных статистических данных как информационных систем железнодорожного транспорта, так и данных бортовых аппаратно-программных комплексов электровозов.
12. В качестве рекомендаций по дальнейшей разработке темы диссертации предлагается проведение исследований по совершенствованию системы Мониторинга с развитием логического аппарата на базе теории нечётких множеств и расширением числа диагностических параметров, дальнейшая интеграция системы Мониторинга в автоматизированную систему управления сервисным техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов для обеспечения их работоспособности в эксплуатации.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

I Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Киселев, В.И. Опыт сервисного обслуживания локомотивов [Текст] / В.И. Киселев, И.И. Лакин // Железнодорожный транспорт. – 2014. – №4. – С. 64 – 67.
2. Лакин, И.И. Нечёткие множества в системе поддержки принятия решений информационных систем локомотивного комплекса [Текст] / И.И. Лакин // - Известия Транссиба. – 2015. – №3. – С. 24 – 30.

II В научных журналах, материалах конференций, в монографиях

3. Аболмасов, А.А. Применение принципов «встроенного качества» для повышения надежности локомотивов [Текст] / А.А. Аболмасов, В.А. Мельников, И.И. Лакин // Украина. Локомотив інформ. – 2015. – №5. – С. 28 – 30.
4. Лакин, И.И. Планово-предупредительный вид ремонта тягового подвижного состава с учётом его технического состояния [Текст] / И.И. Лакин // Материалы второй всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Эксплуатационная надёжность подвижного состава", ОмГУПС, Омск, 2013. – С. 23 – 27.
5. Лакин, И.И. Мониторинг режимов эксплуатации локомотивов по диагностическим данным бортовых МСУ [Текст] / И.И. Лакин // Труды V международной научно-практической конференции "Транспортная инфраструктура Сибирского региона", ИрГУПС, Иркутск, 2014. – С. 44 – 46.
6. Аболмасов, А.А. Мониторинг и диагностирование технического состояния локомотивов [Текст] / А.А. Аболмасов, В.А. Мельников, И.И. Лакин. - Berlin: LAP Lambert Academic Publishing AG & CO.KG, 2014. – 136 с.
7. Лакин, И.И. Особенности эксплуатации локомотивов на больших полигонах [Текст] / И.И. Лакин // Материалы первой международной научно-практической конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов», ТМХ-Сервис, Москва, 2014. – С. 181 – 185.
8. Лакин, И.И. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов [Текст] / И.И. Лакин // Материалы всероссийской НПК с международным участием «120 лет железнодорожного образования в Сибири», КриЖТ, Красноярск, 2014. – С. 70 – 76.
9. Лакин, И.И. Методология мониторинга технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов [Текст] / И.И. Лакин // Труды второй всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Эксплуатационная надёжность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов», ОмГУПС, Омск, 2014. – С. 25– 31.
10. Аболмасов, А.А. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов с использованием бортовых микропроцессорных систем управления [Текст] / А.А. Аболмасов, В.А. Мельников, И.И. Лакин // Локомотив. – 2015. – №2. – С. 4 – 7.

11. Аболмасов, А.А. Алгоритмическая защита локомотивов [Текст] / А.А. Аболмасов, В.А. Мельников, И.И. Лакин // Локомотив. – 2015. – №3. – С. 8 – 10.
12. Аболмасов, А.А. "Встроенное качество" в информационных системах локомотиворемонтного комплекса [Текст] / А.А. Аболмасов, В.А. Мельников, И.И. Лакин // Локомотив. – 2015. – №6. – С. 6 – 8.
13. Пустовой, И.В. Сетевое планирование ремонта сервисных локомотивов [Текст] / И.В. Пустовой, И.И. Лакин // Локомотив. – 2015. – №7. – С. 6–10.
14. Киселев, В.И. Автоматизация управления рисками отказов локомотивов [Текст] / В.И. Киселев, И.И. Лакин // Локомотив. – 2015. – №9. – С. 37–38.
15. Лакин, И.И. Использование методов теории нечётких множеств при управлении рисками в системе мониторинга эксплуатации локомотивов [Текст] / И.И. Лакин // Труды VI Международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура сибирского региона», ИрГУПС, Иркутск, 2015. – С. 338 – 343.
16. Киселев, В.И. Использование нечётких множеств в информационных системах локомотивного комплекса для поддержки принятия решений [Текст] / В.И. Киселев, И.И. Лакин // Труды МИИТ: шестнадцатая НПК "Безопасность движения поездов". – 2015. – С. II-68.
17. Семченко, В.В. Анализ режимов эксплуатации электровозов серии ВЛ80р [Текст] / В.В. Семченко, Е.А. Мальцев, И.И. Лакин // Локомотив / – 2015. – №11. – С. 40 – 41.
18. Лакин, И.И. Возможности бортовых АПК локомотивов для мониторинга их технического состояния [Текст] / И.И. Лакин // Материалы третьей всероссийской НТК с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава», ОмГУПС, Омск, 2015. – С. 102 – 107.
19. Лакин, И.И. Мониторинг технического состояния локомотивов и управление рисками [Текст] / И.И. Лакин // Материалы второй научно-практической конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов», ТМХ-Сервис, Москва, 2015. – С. 174 – 179.
20. Липа, К.В. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов в ТМХ-Сервис Теория и практика [Текст] / К.В. Липа, А.А. Белинский, В.Н. Пустовой, И.И. Лакин и др. – М.: ООО «Локомотивные Технологии», Москва, 2015. – 212 с.
21. Лакин, И.И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным АСОУП [Текст] / И.И. Лакин // Материалы Конференции «Наука МИИТа - транспорту», Москва, 2016. – С. I-68.
22. Лакин, И.И. Анализ эксплуатационных показателей локомотивов [Текст] / И.И. Лакин // Материалы седьмой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона», ИрГУПС, Иркутск, 2016. – С. 17 – 20.

ЛАКИН Игорь Игоревич

**МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛОКОМОТИВОВ
ПО ДАННЫМ БОРТОВЫХ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ
КОМПЛЕКСОВ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и
электрификация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Подписано в печать 05.07.2016

Заказ № 817

Формат 60x90/16

Усл.-печ. л. – 1,5

Тираж 80 экз.

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9 стр. 9, МИИТ