

*На правах рукописи*



**СЕМЕНОВ АЛЕКСАНДР ПАВЛОВИЧ**

**МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ  
ЛОКОМОТИВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ  
МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Российский университет транспорта" РУТ (МИИТ)

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
**ЛАКИН Игорь Капитонович.**

Официальные оппоненты:

**БУЙНОСОВ Александр Петрович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», кафедра «Электрическая тяга», профессор.

**ГРАЧЕВ Владимир Васильевич**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство», доцент.

**ШАБАЛИН Николай Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», центр исследований и подготовки комплексных научных проектов, руководитель центра.

Ведущая организация:

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

Защита состоится *20 января 2022 г. в 13:00* на заседании диссертационного совета Д 218.005.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ) <https://rut-miit.ru>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » октября 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Согласно Указу Президента РФ от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» в Минтранс разработана долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года. Роль железнодорожного транспорта в отечественной экономике по-прежнему остаётся очень важной. Грузовые перевозки составляют 45 % от общих в стране и должны вырасти на 31 % при одновременном существенном повышении эффективности функционирования транспорта. Выручка ОАО «РЖД» должна вырасти на 66 %, прибыль на 363 % с ростом рентабельности по чистой прибыли на 486 %. Существенный рост экономических показателей обеспечивается за счёт роста технических показателей, повышения эффективности железнодорожной отрасли, снижения капитальных и эксплуатационных расходов. Это важно в локомотивном и локомотиворемонтном комплексах.

В мировой и отечественной практике технического обслуживания и ремонта (ТОиР) тягового подвижного состава имеется тенденция к переходу от планово-предупредительной системы к ремонту с учётом фактического технического состояния. Одновременно происходит переход на управление ТОиР комплексно на всём жизненном цикле локомотива, для чего с производителем заключается контракт жизненного цикла на сервисное ТОиР. Эти тенденции обусловлены развитием автоматизированных систем управления (АСУ) производством, микропроцессорных систем управления локомотивов (МСУ), автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) – встроенных в оборудование, бортовых на базе МСУ, деповских переносных и стационарных АСТД.

Массовое внедрение киберфизических производственных систем позволяет говорить о «четвёртой промышленной революции», методы которой следует осмыслить и применить в том числе в локомотиворемонтном комплексе. Требуется научно-практическая проработка новой технологии АСУ ТОиР.

Разработка модели управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования и принципов построения АСУ является актуальной.

**Степень разработанности темы исследования.** Диагностирование и управление надёжностью сложных систем являются предметом научно-практического рассмотрения, основы которых заложены отечественными учёными А. В. Мозгалевским, П. П. Пархоменко, В. В. Карибским, Е. С. Согомояном. Основные положения их трудов доведены до уровня национальных стандартов. Теория и практика технического диагностирования тягового подвижного состава, управления его надёжностью, техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) развивались в локомотиворемонтном комплексе. Особенно следует отметить труды следующих учёных: И. П. Исаев, В. Д. Кузьмич, В. М. Бочаров, А. П. Буйносов, А. А. Воробьев, А. В. Воротилкин, А. Т. Головатый, А. Н. Головаш, А. В. Горский, В. В. Грачёв, Ю. А. Давыдов, В. Н. Игин, А. М. Замышляев, Ю. М. Иньков, С. И. Ким, Д. Л. Киржнер, В. И. Киселев, А. С. Космодамианский, В. С. Коссов, С. М. Кузнецов, И. К. Лакин, А. Г. Ламкин, К. В. Липа, М. Л. Михальчук, В. В. Молчанов, А. Т. Осяев, А. В. Плакс, С. В. Покровский, Ю. И. Попов, О. Е. Пудовиков, А. Д. Пузанков, В. Н. Пустовой, В. В. Семченко, В. Т. Стрельников, Э. Д. Тартаковский, В. П. Феоктистов, В. Т. Черемисин, В. А. Четвергов, Н. Г. Шабалин, С. Г. Шантаренко и многие другие. Развитие теории и практики построения современной системы ТОиР локомотивов нашло место в научно-практических трудах молодых учёных А. А. Аболмасова, И. И. Лакина, И. В. Пустового, И. Ю. Хромова, В. А. Мельникова. Теорию и практику управления жизненным циклом локомотивов развивают лидеры локомотивостроения: General Electric Transportation, Siemens Transportation, Alstom Transport, Трансмашхолдинг, Синара. Научные школы созданы во ВНИИЖТ, ВЭлНИИ, ВНИКТИ, НИИТКД, ПКБ ЦТ, ДЦВ Красноярской ж.д., ДВГУПС, ИрГУПС, ОмГУПС, ПГУПС, СамГУПС, РГУПС, РУТ (МИИТ).

В диссертации развиваются научные основы управления надёжностью локомотивов через разработку модели управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования.

**Объектом исследования** является тяговый подвижной состав железных дорог, система управления жизненным циклом локомотивов, система технического обслуживания и ремонта локомотивов с использованием автоматизированных систем технического диагностирования оборудования локомотивов.

**Целью диссертационной работы** является повышение надёжности и эффективности эксплуатации ТПС через совершенствование системы ТОиР за счёт перехода на модель управления жизненным циклом локомотивов с комплексным использованием современных систем диагностирования (далее – Модель).

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

- 1 анализ мирового и отечественного опыта и тенденций развития систем управления жизненным циклом локомотивов, их систем технического обслуживания и ремонта, систем технического диагностирования;
- 2 вероятностно-статистический анализ надёжности отечественных локомотивов, условий их эксплуатации и эффективности систем технического обслуживания и ремонта;
- 3 анализ используемых показателей надёжности, разработка методов расчёта перспективных показателей в условиях современного управления жизненным циклом локомотива;
- 4 теоретический анализ функциональности современных систем технического диагностирования с позиций теории познания (гносеологии), информатики, теории автоматического управления для определения требований к системам технического диагностирования;
- 5 обоснование технико-экономической целесообразности практического использования различных видов систем диагностирования на этапе эксплуатации локомотивов;
- 6 разработка системы поддержки принятия решений в модели жизненного цикла локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования;
- 7 разработка технологической модели управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования, как киберфизической производственной системы, на основании выполненного в диссертации анализа мировых и отечественных тенденций развития систем управления жизненным циклом локомотивов, надёжности отечественных локомотивов, технико-экономической целесообразности применения систем технического диагностирования;
- 8 разработка методики практической реализации Модели и её апробация в сервисном ремонтном локомотивном депо.

**Научная новизна диссертационной работы:**

- 1 разработана технологическая модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием автоматизированных систем технического диагностирования при их техническом обслуживании и ремонте;
- 2 на основании вероятностно-статистического анализа данных об эксплуатации локомотивов с применением разработанного метода и методики обоснована степень влияния надёжности локомотивов и их системы ТОиР на эффективность эксплуатации локомотивов;
- 3 разработан метод расчёта вероятности наступления отказов локомотивов согласно их категориям по статистическим данным об эксплуатации локомотивов и заданным показателям надёжности оборудования локомотивов согласно национальным стандартам;
- 4 разработан метод анализа информационной эффективности систем технического диагностирования с использованием математического аппарата теории информации;
- 5 разработан метод определения технико-экономической целесообразности применения различных систем технического диагностирования оборудования локомотивов;
- 6 разработан метод прогнозирования продолжительности технического обслуживания и ремонта с определением индивидуального объёма ремонта по данным систем диагностирования путём имитационного моделирования с использованием динамически изменяющейся статистики продолжительности выполнения предыдущих ТОиР.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Разработана научно обоснованная модель управления жизненным циклом локомотивов при их ТОиР с использованием систем диагностирования, которая должна быть положена в основу управления надёжностью современных отечественных локомотивов. Модель реализована в группе компаний «ЛокоТех» в сервисном локомотивном депо «Братское», расположенном на Восточно-Сибирской железной дороге.

**Методология и методы исследования.** При анализе мировых трендов развития локомотивных комплексов и во всех остальных разделах в качестве базовой использована теория локомотивной тяги. При анализе надёжности

локомотивов применены математические методы теории вероятности, теории статистики и теории надёжности, с помощью которых обработаны большие массивы данных об эксплуатации локомотивов. При анализе возможностей современных автоматизированных систем технического диагностирования и возможности их реализации использованы методы теории информации и информационных систем, методы теории автоматического управления. При разработке метода технико-экономической оценки эффективности систем диагностирования использованы принятые методы расчёта окупаемости инновационных проектов и методы имитационного моделирования технологических процессов применительно к условиям локомотивных депо. При разработке системы поддержки принятия решений системы технического обслуживания и ремонта с использованием систем диагностирования использован метод «Цифровой двойник» и вероятностно-статистические методы. При разработке модели жизненного цикла с использованием систем диагностирования применены технологические методы «Киберфизические производственные системы», «Lean Production» и «Toyota Production System», методы систем менеджмента качества и сервисного обслуживания. При обработке статистики и имитационном моделировании использованы специально разработанные автором программы на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications (VBA) в среде MS Excel.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1 метод оценки эффективности эксплуатации локомотивов;
- 2 метод оценки информационной эффективности автоматизированных систем технического диагностирования;
- 3 метод оценки экономической целесообразности применения систем диагностирования;
- 4 метод прогнозирования времени проведения ТОиР при индивидуальном для каждой секции локомотива планировании объёма ремонта по данным систем диагностирования;
- 5 модель жизненного цикла локомотивов при использовании систем диагностирования.

**Степень достоверности.** Достоверность научных результатов диссертации обеспечена их сравнением с мировыми трендами, вероятностно-статистическим анализом параметров эксплуатации и обслуживания отечественных локомотивов, анализом физических процессов оборудования локомотивов и проверкой на практике основных теоретических положений. Эффективность предложенной Модели подтверждена её практической реализацией в сервисном локомотивном депо «Братское» ООО «ЛокоТех-Сервис» на Восточном полигоне ОАО «РЖД» в качестве системы управления жизненным циклом электровозов переменного тока производства АО «Трансмашхолдинг».

**Апробация работы.** Основные результаты научного исследования доложены, обсуждены и одобрены на 15-и научно-практических международных (МНПК) и всероссийских (ВНПК) конференциях: 3-я МНПК Юго-Западного федерального университета (г. Курск, 2012), МНПК «Эксплуатационная надежность подвижного состава» (НИИТКД, г. Омск, 2013), МНПК «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты» (ПГУПС, Санкт-Петербург, 2015, 2019, 2020), 3-я МНПК «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава» (ОмГУПС, г. Омск, 2015), 1-я, 2-я и 3-я МНПК «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов» (МИИТ, ЛокоТех, г. Москва, 2014, 2015, 2018); 10-я МНПК «Транспортная инфраструктура сибирского региона» (ИрГУПС, г. Иркутск, 2019), МНПК «Инновационные технологии развития транспортной отрасли» (ДВГУПС, г. Хабаровск, 2019), ВНПК, посвящённая 125-летию железнодорожного образования в Сибири (КРИЖТ ИрГУПС, г. Красноярск, 2019), МНПК «Эксплуатация и техническое обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава» (ДЦВ Красноярской ж.д., КРИЖТ, г. Красноярск, 2020), 4-я МНПК «Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта» (ОмГУПС, г. Омск, 2020), 24-я ВНПК «Инновационные технологии на железнодорожном транспорте» (КРИЖТ ИрГУПС, г. Красноярск, 2020).

Диссертация доложена и одобрена на заседании кафедры «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ), 2020, 2021).

**Личный вклад.** Все результаты, изложенные в диссертационной работе, получены автором лично и самостоятельно: выполнен литературный обзор



мирового и отечественного опыта, вероятностно-статистический анализ эффективности эксплуатации локомотивов, анализ информативности систем диагностирования и эффективности их применения, разработана модель технического обслуживания и ремонта с индивидуальным планированием объёма ремонта, которая внедрена при непосредственном участии автора.

**Список работ, опубликованных по теме диссертации.** Основные положения диссертации и полученные результаты опубликованы в 64-х научных работах, из них 12 статей в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК, 4 патента, 17 свидетельств на программное обеспечение, 29 статей в отраслевых журналах и трудах научных конференций, 2 научные монографии, одна из которых без соавторов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, семи разделов, заключения, списка использованных сокращений, списка литературы из 401 источника, двух приложений со справками о внедрении результатов исследований, содержит 379 страниц основного текста, включая 60 таблиц и 128 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приводятся обоснование актуальности темы диссертации, цели и задачи исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, их обоснованность, достоверность, а также данные об апробации и публикациях работы.

**В первом разделе** приведён литературный обзор, анализ задач железнодорожного транспорта, мировых и отечественных тенденций развития систем управления жизненным циклом локомотивов. Поставлена задача исследования.

Поставленные в Долгосрочной программе развития ОАО «РЖД» до 2025 года задачи предполагают интенсивный путь развития железнодорожного транспорта. Развитие локомотивного и локомотиворемонтного комплексов является одним из ключевых в развитии транспорта, включая их техническое обслуживание и ремонт, диагностирование и управление жизненным циклом, снижение его стоимости.

Создаваемая в ОАО «РЖД» автоматизированная система управления (АСУ) «Цифровая железная дорога» объединяет в единую киберфизическую производ-

ственную систему все АСУ: от управления коммерческой работой, погрузки вагонов и работы станций до управления движением поездов, включая взаимодействие с тяговым подвижным составом. В задачу входит и управление жизненным циклом локомотивов в рамках проекта «Цифровое локомотивное депо».

Мировая тенденция – это использование бортовой диагностики. Наиболее комплексным является опыт компании General Electric (GE), которая реализовала из ситуационного центра на территории завода (г. Эри, США) мониторинг по всему миру в режиме online более 20 тыс. тепловозов с диагностированием более 10 тыс. видов инцидентов (ситуаций, отличных от нормальной работы), в т.ч. отказов и предотказов. Аналогичный опыт мониторинга во взаимодействии с системами ТОиР накоплен компаниями Siemens, Alstom, Bombardier прежде всего для мониторинга скоростных поездов. Имеется аналогичный опыт у отечественных локомотивостроительных компаний АО «Трансмашхолдинг» (ТМХ) и Группы «Синара»: Новочеркасский электровозостроительный завод (НЭВЗ), Брянский машиностроительный завод (БМЗ), Коломенский завод (КЗ) совместно с ВНИКТИ, «Уральские локомотивы» (УЛ, г. Верхняя Пышма, Свердловская область) имеют опыт мониторинга гарантийных локомотивов, но без взаимодействия с системой ТОиР.

В группе сервисных компаний «ЛокоТех» создана АСУ ТОиР «Сетевой график», которая собирает информацию из всех доступных источников о техническом состоянии локомотивов, включая бортовые МСУ. На основании собранной информации формируется индивидуальный для каждого локомотива объём ТОиР.

В НПО «САУТ» создана система «СВЛТР» для мониторинга технического состояния локомотивов производства УЛ. Информация попадает в геоинформационную систему с указанием дислокации локомотива, параметров его движения и наличия замечаний по техническому состоянию. В ОАО «РЖД» СВЛТР принята как базовая, в т.ч. для сбора данных о расходе топлива и электроэнергии.

Накоплен уникальный опыт обслуживания локомотивной силовой электроники и микропроцессорных систем управления в ДЦВ Красноярской ж.д. с использованием данных бортовых МСУ и встроенных систем диагностирования. На Восточном полигоне ОАО «РЖД» для электровозов переменного тока производства НЭВЗ в сетевых пунктах технического обслуживания локомотивов

(ПТОЛ) специально обученные бригады в случае необходимости восстанавливают работоспособность оборудования по крупно-агрегатной технологии с использованием переходного запаса. Неисправные блоки отправляют в базовое депо Боготол для восстановления с использованием специального оборудования и систем диагностирования. В результате внедрения технологии исключены опасные отказы выпрямительно-инверторных преобразователей (ВИП) и МСУ.

Наряду с использованием диагностических данных МСУ по-прежнему играют важную роль деповские стационарные и переносные системы технического диагностирования и испытания: станции реостатных испытаний дизель-генераторных установок (ДГУ) тепловозов, вибродиагностика, переносные диагностические устройства замера отдельных параметров оборудования, стационарные испытательные установки по видам оборудования и др.

Весь описанный мировой и отечественный опыт предполагает сохранение планово-предупредительной системы ТОиР несмотря на широкое применение автоматизированных систем технического диагностирования.

На основании выполненного анализа мирового и отечественного опыта поставлены задачи исследования (см. «Общая характеристика работы»).

**Во втором разделе** определена эффективность эксплуатации локомотивов. Для расчёта взяты данные автоматизированной информационной системы АСОУП ОАО «РЖД» (Автоматизированная система оперативного управления перевозками). Сформированы репрезентативные выборки данных об эксплуатации локомотивов 12-и массовых серий: ВЛ80С, ВЛ80Р, ВЛ85, 2ЭС5К, 3ЭС5К, ВЛ10, 2ЭС4К, 3ЭС4К, 2ТЭ10МК, 3ТЭ10МК, 2ТЭ116У, 2ТЭ25КМ. По каждой серии рассмотрено  $K = 40$  случайным образом выбранных локомотивов за 400 – 500 дней их эксплуатации (с учётом простоя на ТОиР – это около года эксплуатации), что позволяет достаточно объективно оценить работу локомотива, тем более, что годовые отчёты общеприняты на железнодорожном транспорте. Всего обработано 4,8 млн событий.

По каждому рассмотренному состоянию локомотива в эксплуатации ( $i \in [1, 15]$ ) каждой серии ( $j \in [1, 12]$ ) для выборки  $M_{ijk}$  ( $k \in [1, 40]$ ) рассчитаны математические ожидания  $M_{ij}$ , среднеквадратичные отклонения  $\sigma_{ij}$  и коэффициент вариации  $K_{vij}$  с использованием формул:

$$M_{ij} = \frac{1}{40} \sum_{k=1}^{40} (M_{ijk}); \sigma_{ij} = \sqrt{\frac{1}{39} \sum_{k=1}^{40} (M_{ijk} - M_{ij})^2}; K_{vij} = \sigma_{ij} / M_{1ij}. \quad (1)$$

Также рассчитаны минимальное  $Min$  и максимальное  $Max$  значения параметров, достигнутые отдельными локомотивами за весь период наблюдения.

Достоверность данных подтверждена через проверку их унимодальности по соответствию одному из законов распределения случайной величины по критерию согласия Колмогорова-Смирнова, при котором для выборки  $K_2$  из всех разниц  $\Delta_t$  каждого столбца гистограммы (диапазона  $t \in [1, 12]$ ) между статистической (эмпирической)  $F_{\phi t}$  и теоретической  $F_{mt}$  функциями распределения случайной величины выбирают максимальную:

$$\Delta_{\max} = Max(\Delta_t) = Max(F_{\phi t} - F_{mt}), \quad (2)$$

где:  $F_{\phi t} = N_t / N$ ;  $F_{mt} = N_{mt} / N_m$ ;  $N_t$  – число фактических попаданий в диапазон  $t$ ;  $N$  – размер эмпирической выборки;  $N_{mt}$  – число теоретических попаданий в диапазон  $t$ ;  $N_m$  – размер контрольной выборки:  $N_m = N$ .

По максимальному отклонению  $\Delta_{\max}$  вычисляется фактический показатель  $D_\phi$ , который для нормального закона распределения случайной величины:

$$D_\phi = \Delta_{\max} \cdot (K_2^{0,5} - 0,01 + 0,85 / K_2^{0,5}). \quad (3)$$

По таблице критерия Колмогорова-Смирнова  $D_m$  находится вероятность соответствия закону распределения случайной величины  $P$ :

$$P \cong Min (D_{mi} - D_\phi) \quad (4)$$

Дополнительно выполнен анализ взаимосвязи показателей работы локомотивов с использованием коэффициента корреляции  $r_{ij} \in [-1, +1]$  между значениями параметров групп  $i$  и  $j$  по каждой серии локомотива:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{40} (M_{ik} - M_i)(M_{jk} - M_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{40} (M_{ik} - M_i)^2 \sum_{k=1}^{40} (M_{jk} - M_j)^2}}, \quad (5)$$

В заключении по полученным статистическим показателям вычисляется положенный в основу коэффициент полезной работы локомотива  $K_{АП}$ :

$$K_{АП} = T_{тяга} / \Sigma T_i \quad \text{или:} \quad K_{АП} = 100 \% * T_{тяга} / \Sigma T_i, \quad (6)$$

где:  $T_{тяга}$  – время нахождения в состоянии «Тяга в голове поезда»;

$\Sigma T_i$  – общее время нахождения локомотива в эксплуатации.

Для автоматизации предложенного метода исследования разработан специальный пакет программ на алгоритмическом языке VBA в среде MS Excel (получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ).

В среднем коэффициент полезной работы локомотива  $K_{АП}$  составляет у тепловозов 38,3 %, а у электровозов 60 %, с возможностью достичь соответственно 57,5 % и 76,2 %.  $K_{АП}$  достаточно унимодален только у серии 2ЭС5К ( $P = 0,5$ ) и ВЛ80Р ( $P = 0,1$ ). У отдельных локомотивов серий ВЛ80С, ВЛ80Р, ВЛ85, 2ЭС5К превышал 70 %, что свидетельствует о наличии резервов для повышения эффективности. Повышение эффективности перевозочного процесса даёт 20 % сокращения потерь, ТОиР – около 10 % у электровозов и 20 % у тепловозов.

Наилучший среднесуточный пробег в среднем за год эксплуатации имеют локомотивы серий ВЛ85 (603 км), 3ЭС5К (578 км), эксплуатируемые на Восточном полигоне ОАО «РЖД». Худшие показатели у локомотивов серий 2ЭС4К (238 км), 2ТЭ10МК (276 км) и 3ТЭ10МК (293 км). Максимальный среднесуточный пробег в среднем за год имел локомотив серии ВЛ80С (735 км). Свыше 600 км имели отдельные локомотивы серий ВЛ80Р, ВЛ85, 3ЭС5К. Унимодалными были данные серий ВЛ80С ( $P = 0,5$ ) и ВЛ80Р ( $P = 0,3$ ).

Анализ коэффициента корреляции  $r$  между пробегом локомотива и его тонно-километровой работой подтвердил допустимость учёта работы локомотива в километрах пробега. Согласно шкале Чеддока весьма высокая корреляция ( $r \geq 0,9$ ) только у отдельных локомотивов серии ВЛ80С ( $r = 0,913$ ). Заметную корреляцию ( $r \in [0,5, 0,7]$ ) имеют серии 2ЭС4К и 2ТЭ10МК, остальные – высокую. Достаточно унимодалными являются данные серий 3ЭС5К ( $P = 0,5$ ), ВЛ80С ( $P = 0,3$ ), ВЛ80Р и 2ТЭ25КМ ( $P = 0,1$ ).

Процент времени ТОиР в общем бюджете времени локомотивов составил от 10 % (ВЛ80С, ВЛ85, 2ЭС5К, 3ЭС5К) до 25 % (3ТЭ10МК). У серий ВЛ80С, 2ЭС5К, 3ЭС5К, ВЛ10, 2ЭС4К отдельные локомотивы простаивали на ТОиР менее 5 %. Данные более унимодалны у серий ВЛ80Р ( $P = 0,7$ ), ВЛ85 ( $P = 0,7$ ), 2ТЭ10МК ( $P = 0,5$ ), и 2ТЭ116У ( $P = 0,7$ ).

Существенное влияние на эффективность эксплуатации локомотивов оказывает время ожидания ТОиР, которое в общем бюджете времени локомотива составляет от 2,7 % (ВЛ10) до 8,4 % (3ТЭ10МК). Процент времени ожидания планового ТОиР от общего бюджета времени составил от 0,8 % (ВЛ85) до 4,0 %

(2ТЭ25КМ). Свыше 3 % ожидание планового ТОиР составило у серий 2ЭС5К, 3ТЭ10МК, 2ТЭ116У. Время ожидания ТОиР в общем времени ТОиР составило от 20,6 % (ВЛ10) до 52,5 % (2ЭС5К). Свыше 40 % время ожидания в общем времени ТОиР у серий ВЛ80Р, 3ЭС5К, 2ТЭ25КМ.

Среднее взвешенное время простоя локомотивов на неплановых ремонтах (НР) составило 19,6 часов с максимальным у серии 2ТЭ25КМ (38,3 ч) и минимальным у серии ВЛ10 (4,3 ч.). На ТО-2 локомотивы стоят не более 2 ч, но это больше связано с принудительным переводом локомотива в состояние НР. Меньше всего на ТО-3 простаивают тепловозы серии 2ТЭ25КМ (30 ч.), больше – 3ТЭ10МК (100,6 ч.). На ТР-1 – соответственно 2ЭС5К (25 ч.) и 2ТЭ10МК (149,5 ч.). На ТР-2: 2ЭС5К (69 ч.) и 3ТЭ10МК (405 ч.). Время простоя на ТОиР существенно превышает нормативное, что является главной причиной снижения коэффициента технической готовности (КТГ) и коэффициента готовности к эксплуатации (КГЭ). Поэтому фактические данные о простое локомотивов на ТОиР использованы при расчёте технико-экономической эффективности систем диагностики в разделе 4.

Выполнен анализ соответствия показателей надёжности оборудования локомотивов, указываемых в их технических условиях (ТУ) согласно ГОСТ 27.002-2015 и показателей надёжности, принятых в ОАО «РЖД». В ТУ обычно указывают ограниченное число параметров, в т.ч. параметр потока отказов  $\lambda$  (число отказов на 1 млн км), который по данным эксплуатации можно рассчитать по формуле:

$$\lambda = n / (N \cdot \sum L), \quad (7)$$

где:  $n$  – число отказов оборудования за заданный период времени;

$N$  – общее число рассматриваемого оборудования;

$\sum L$  – пробег рассматриваемого оборудования локомотивов, млн км.

Требуемые показатели надёжности в ОАО «РЖД» нормируются в контракте жизненного цикла (КЖЦ) как три категории отказов в зависимости от тяжести последствий, что соответствует понятию «вид отказа» в ГОСТ 27.002-2015, как единица классификации отказов по его последствию. Отказ первой категории возникнет в момент следования тяжеловесного поезда по руководящему (критическому) подъёму. Из анализа статистики эксплуатации локомотивов на полигоне по данным ГИД «Урал» и ИСУЖТ можно рассчитать вероятность возникновения отказа первой категории  $P_1$ . Аналогично можно рассчитать

вероятность отказа второй категории  $P_2$ . Тогда  $P_3 = 1 - P_1 - P_2$ . Ожидаемое число отказов  $n$  по категориям  $n_1, n_2, n_3$  можно рассчитать по формулам:

$$n_1 = n \cdot P_1; \quad n_2 = n \cdot P_2; \quad n_3 = n \cdot P_3 = n - n_1 - n_2; \quad (8)$$

где общее число отказов  $n$  определяется из статистики отказов или теоретически как произведение интенсивности отказов и пробега:  $n = \lambda \cdot \sum L$ . Таким образом, возможен переход от показателей надёжности в ТУ к показателям КЖЦ.

В АСУ ТОиР группы компаний «ЛокоТех» налажен мониторинг продолжительности, стоимости и типа работ: цикловые и сверхцикловые. Выполненный анализ статистических данных показал соизмеримость объёма сверхцикловых работ с работами при неплановом заходе: учёт отказов по числу неплановых заходов не достоверен. Поэтому управлять надёжностью локомотивов целесообразней по стоимости жизненного цикла локомотива (ЖЦЛ), в т.ч. по стоимости цикловых и сверхцикловых работ, для выявления которых и сокращения времени на планирование необходимы средства диагностирования, желательно автоматизированные и бортовые.

**В третьем разделе** выполнен анализ функциональности современных систем технического диагностирования (СТД) с позиций теорий познания, информации и информационных систем, цифровых технологий, автоматического управления.

Термины «Цифровизация». «Цифровая экономика», «Цифровая железная дорога», «Цифровое депо», «Цифровой локомотив» изначально означают применение компьютеров с двоичной системой счисления, а также применение интеллектуальных информационных технологий. Диагностика также должна иметь микропроцессорное управление: датчики в оборудовании локомотивов должны преобразовывать контролируемые параметры в электрический аналоговый сигнал с дальнейшим его преобразованием в цифровой при помощи аналогово-цифровых преобразователей (АЦП). Расчёт требуемой разрядности АЦП для обеспечения точности измерения сигналов показал достаточность разрядности от 6 до 12, поэтому задача решается. Системы диагностики должны быть автоматические или автоматизированные (АСТД) с инкапсуляцией в программном обеспечении методов диагностирования и автоматической передачей результатов в АСУ ТОиР.

Само диагностирование должно строиться по принципам теории автоматического управления с обязательной реализацией обратных связей.

Множества входных  $X$ , выходных  $Y$  в отличие от внутренних сигналов  $Z$  являются конечными. Число  $N_x$  входных сигналов  $x_i \in X$  ( $i = [1, N_x]$ ) и число  $N_y$  выходных сигналов  $y_j \in Y$  ( $j = [1, N_y]$ ) ограничено. Число  $N_z$  внутренних сигналов  $z_k \in Z$  ( $k = [1, \infty]$ ) бесконечно: для определения исправности необходимо бесконечное число сигналов  $k \rightarrow \infty$  и бесконечное время  $t \rightarrow \infty$ . Таким образом, определение технического состояния объекта всегда предполагает ограниченную точность диагноза с ограниченной вероятностью ошибок первого и второго родов. Множества сигналов  $X$  и  $Y$  обязательны для диагностирования работоспособности объекта. Для проверки исправности, локализации места неисправности и прогнозирования остаточного ресурса могут понадобиться внутренние сигналы  $Z$ .

Алгоритм диагностирования сводится к последовательной подаче совокупности входных сигналов  $X(t)$  в период времени  $t$  с регистрацией реакции объекта диагностирования в период времени  $(t+1)$  по всем выходным сигналам  $Y(t+1)$  и необходимым внутренним сигналам  $Z(t+1)$ . В этом случае диагностирование сводится к работе конечного автомата Мура (без памяти) и автомата Мили (с памятью):

$$Y(t+1) = H(t, X(t), Y(t), Z(t)), \quad (9)$$

где:  $H$  – оператор перехода объекта диагностирования (конечного автомата) от текущего состояния в период времени  $t$  к состоянию в момент времени  $t+1$ .

Оператор перехода  $H$  устанавливает однозначную связь между множествами  $X(t)$ ,  $Z(t)$  и множествами  $Y(t+1)$ ,  $Z(t+1)$  для исправного состояния.

Теоретически число возможных отказов оборудования локомотивов  $i$  и их энтропия  $H_N$  бесконечны:  $i \rightarrow \infty$ ,  $\sum H_i \rightarrow \infty$ . На практике число фиксируемых неисправностей  $N$  конечно:  $i \in [1, N]$ . Для каждого отказа будет свой оператор перехода  $H_i$ , совокупность которых создаёт таблицу функций неисправностей (ТФН), определяющую конечную энтропию объекта диагностирования  $\sum H_i$ .

По статистике эксплуатации можно определить вероятность  $P_i$  наступления каждого вида отказа  $i$  за заданный период. Тогда для оценки информативности  $I_i$



можно использовать формулу Шеннона:  $I_i = -P_i \cdot \log_2(P_i)$ , при условии, что  $\sum_{i=0}^N P_i \leq 1$ . Главный недостаток этой формулы – отсутствие учёта стоимости и времени восстановления оборудования после отказа. Например, отказ реле по стоимости и времени восстановления не соизмерим с отказом дизеля, а информативность по формуле Шеннона может быть одинаковой и оценка эффективности диагностики будет неадекватной. Предлагается дополнительно учитывать удельную стоимость восстановления, как отношение стоимости восстановления  $C_i$  после отказа  $i$  к общей стоимости ТОиР  $S = \sum_{i=0}^N (C_i)$ :

$$I_i = -P_i \cdot \log_2(P_i \cdot (C_i/S)). \quad (10)$$

Тогда информационная энтропия объекта диагностирования  $I_\Sigma$  будет:

$$I_\Sigma = -\sum_{i=0}^N (P_i \cdot (C_i/S) \cdot \log_2(P_i \cdot (C_i/S))), \quad (11)$$

а информативность системы диагностирования будет:

$$I_{АСТД} = -\sum_{i=0}^N (E_i \cdot P_i \cdot (C_i/S) \cdot \log_2(P_i \cdot (C_i/S))), \quad (12)$$

где  $E \in [0, 1]$  – вероятность правильного диагностирования (эффективность).

Предлагается информационную эффективность систем диагностирования оценивать через их способность уменьшать энтропию знаний о техническом состоянии объекта диагностирования с использованием коэффициента эффективности  $k_{АСТД}$ , определяемого как отношение информативности АСТД  $I_{АСТД}$  к общей энтропии состояний объекта диагностирования  $I_\Sigma$ :

$$k_{АСТД} = I_{АСТД} / I_\Sigma = [\sum_{i=0}^N (E_i \cdot I_i)] / [\sum_{i=0}^N I_i] = \\ = [\sum_{i=0}^N (E_i \cdot P_i \cdot (C_i/S) \cdot \log_2(P_i \cdot (C_i/S)))] / [\sum_{i=0}^N (P_i \cdot (C_i/S) \cdot \log_2(P_i \cdot (C_i/S)))] \quad (13)$$

Для анализа эффективности АСТД по предложенной формуле разработан соответствующий метод и алгоритм анализа.

Как перспективные первыми рассмотрены бортовые системы диагностирования отечественных локомотивов на базе микропроцессорных систем управления (МСУ) локомотивов. Коэффициент информативности МСУ электро-возов переменного тока производства НЭВЗ (г. Новочеркасск)  $k_{МСУД} = 0,600$ , постоянного –  $k_{МПСУ} = 0,648$ . Информативность МСУ тепловозов оказалась выше:  $k_{МСУ-ТП} = 0,695$ . Анализ показал, что информативность систем диагностирования на базе МСУ за счёт установки дополнительных датчиков и новых алгоритмов реально поднять до  $k_{МПСУ} = 0,814$ . Таким образом, наряду с бортовыми АСТД необходимо

использование деповских АСТД в случаях, когда данных бортовых систем недостаточно.

Выполнено сравнение информативности бортового (на базе МСУ-ТП,  $k_{\text{ДГУ}} = 0,610$ ) и стационарного (станция реостатных испытаний,  $k_{\text{ДГУ}} = 0,922$ ) диагностирования дизель-генераторной установки (ДГУ) тепловоза. Бортовые АСТД могут проверить правильность функционирования ДГУ, локализовать место отказа. Стационарные АСТД могут проверять исправность, хотя и не полностью. Таким образом, остаётся потребность в испытательно-наладочных стендах. Информативность систем вибродиагностирования экипажной части локомотива высокая:  $k_{\text{ВИБРО}} = 0,927$ , но также ниже 1.

Повышение информативности деповских, бортовых и встроенных систем диагностирования возможно за счёт увеличения числа датчиков и их чувствительности, разработки более сложных математических методов для определения технического состояния объекта, локализации места неисправности, прогнозирования остаточного ресурса. Однако это может привести к недопустимо высокой стоимости системы ТОиР, а в случае с бортовыми АСТД – и к снижению надёжности тягового подвижного состава.

**В четвёртом разделе** разработан метод и выполнено технико-экономическое обоснование (ТЭО) практической целесообразности применения АСТД в системе ТОиР при управлении жизненным циклом локомотивов. АСТД реализуемы для большинства видов оборудования, но расчёты показали, что внедрение всех видов АСТД в ТОиР экономически нецелесообразно, т.к. составит в целом на сеть дорог более 400 млрд руб.: срок окупаемости проекта составит десятки лет. Требуется индивидуальный подход к обоснованию необходимости различных видов АСТД.

Техническое состояние локомотива в процессе эксплуатации определяется по диагностическим данным бортовых МСУ и субъективным замечаниям машиниста. При постановке локомотива на ремонт, в процессе и выдаче после ремонта кроме визуального осмотра используются системы диагностирования и испытательные стенды. Диагностика может позволить выполнять ремонт по фактическому техническому состоянию (предиктивный ремонт), что сократит стоимость и время простоя на ТОиР, особенно при выполнении работ типа «осмотреть, при

необходимости отремонтировать). Но часто, наоборот, необходимы дополнительные сверхцикловые работы по устранению предотказных состояний («предотказов»), когда локомотив ещё работоспособен, но уже неисправен или есть тренд к неисправности (есть риск наступления отказа). За счёт устранения предотказов во время планово-предупредительных ремонтов предупреждаются более дорогие отказы во время эксплуатации с неплановым заходом локомотива на ремонт. В результате повышается коэффициент полезной работы локомотива  $K_{АП}$ .

Эффект  $R$  от внедрения диагностики состоит из трёх составляющих:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = C_L * \sum_{y=1}^Y (\Delta T_y) / T_L + \sum_{i=1}^{X-1} (\Delta R_{2i}) - \Delta R_{2X} + R_{ОТК} - \sum_{n=1}^N (R_{пред n}), \quad (14)$$

где:  $R_1$  – эффект от сокращения эксплуатируемого парка локомотивов;

$R_2$  – эффект от сокращения себестоимости ТОиР;

$R_3$  – эффект от сокращения числа и последствий отказов;

$C_L$  – стоимость нового локомотива;

$x, y$  – очередной ремонт из множеств  $X, Y$ :  $x \in [0, X], y \in [0, Y]$ ;

$n$  – очередной отказ из множества  $N$ :  $n \in [0, N]$ ;

$T_L$  – ресурс времени локомотива;

$\Delta T_y$  – сокращение непроизводительного времени простоя на ремонте  $y$ ;

$\Delta R_{2i}$  – сокращение затрат на  $i$ -м ремонте;

$\Delta R_{2X}$  – дополнительные затраты на усиленный ремонт;

$R_{ОТК}$  – стоимость устранения отказа и восстановления работоспособности;

$R_{ПРЕД n}$  – стоимость устранения  $n$ -го предотказа.

Затраты диагностики состоят из капитальных  $Q_K$  (покупка, монтаж оборудования и обучение) и эксплуатационных  $Q_Э$  (зарплата диагностов, расходные материалы и энергоресурсы, метрологическое обслуживание и др.).

Согласно предложенной формуле разработан метод определения эффективности применения АСТД по показателю «Чистая приведенная к текущему дню стоимость проекта»  $NPV$  (Net Present Value), который обычно рассчитывается по годам  $y \in [0, Y]$  (аннуитетно). Применительно к ТОиР процесс изменения  $NPV$  целесообразней рассмотреть как непрерывный процесс интегрирования:

$$NPV = - Q_K + \int CF(t)(1+R)^{-t} dt, \quad (15)$$

где  $CF(t)$  – денежный поток на момент времени  $t$ ;

$R$  – аннуитетная ставка дисконтирования денежных потоков.

Моделирование выполнено с точностью до месяца  $m \in [1, 12]$ , для чего процесс интегрирования заменён на процесс двойного суммирования:

$$NPV = -Q_K + \sum_{y=0}^Y \sum_{m=1}^{12} (ZE_{ym} - ZT_{ym}) * 1,1^{-(y + m/12)}, \quad (16)$$

где:  $y$  – цикл по годам с нулевого года по заданный  $Y$ :  $y \in [0, Y]$ ;

$m$  – цикл по двенадцати месяцам каждого года:  $m \in [1, 12]$ ;

$ZE_{ym}$  и  $ZT_{ym}$  – полученный эффект и затраты в  $y$ -м годе и  $m$ -м месяце.

Для расчёта  $NPV$  систем диагностики разработан алгоритм моделирования и соответствующее программное обеспечение на алгоритмическом языке VBA в среде MS Excel (получено свидетельство на программу для ЭВМ). В программе задаются исходные данные: капитальные  $Q_K$  и все виды эксплуатационных расходов  $Q_{Эi}$  и доходов  $R_i$ , в т.ч. по различным видам ТОиР.

Межремонтные пробеги задаются согласно нормативам для каждой серии локомотива, т.к. они достаточно строго соблюдаются. Из-за большого перепростоя на ТОиР время взято не нормативное, а статистически определённое в разделе 2.

В результате программа последовательно ежемесячно рассчитывает пробег локомотива с учётом его простоя на ремонте, определяет типы наступивших по пробегу ТОиР с соответствующими доходами и расходами. Результаты моделирования выводятся на отдельный лист в виде таблицы и графика изменения  $NPV$ . Моделирование подтвердило высокую окупаемость бортовых систем диагностирования (рисунок 1). Окупается и бортовая система АПК «Борт» при диагностировании дизеля.

Станции реостатных испытаний и испытательные станции окупаются за счёт исключения отказов из-за некачественного ремонта. Вибродиагностика – при исключении отказов экипажной части. Переносные системы окупаются при сокращении числа отказов. Не окупается система замера профиля бандажа.

Моделирование показало, что главный эффект от систем диагностирования – это сокращение парка локомотивов. Наибольший эффект на тяжёлых видах ремонта дают станции реостатных испытаний – более 10 % сокращения. Около 3-х процентов дают бортовые системы, что составляет почти 600 млн руб. на каждые 100 локомотивов. Эффект достигается на «лёгких» видах ТОиР: от ТО-1 до ТР-1.

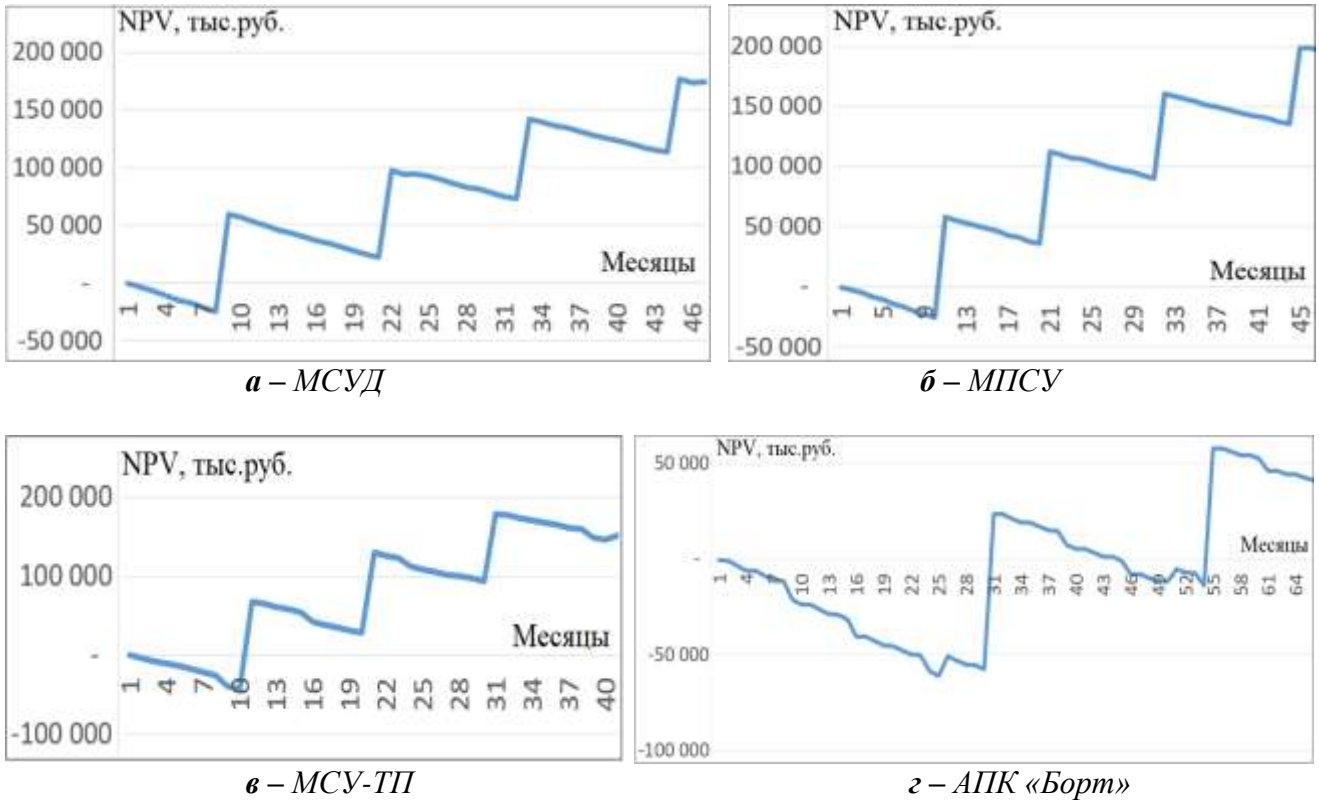


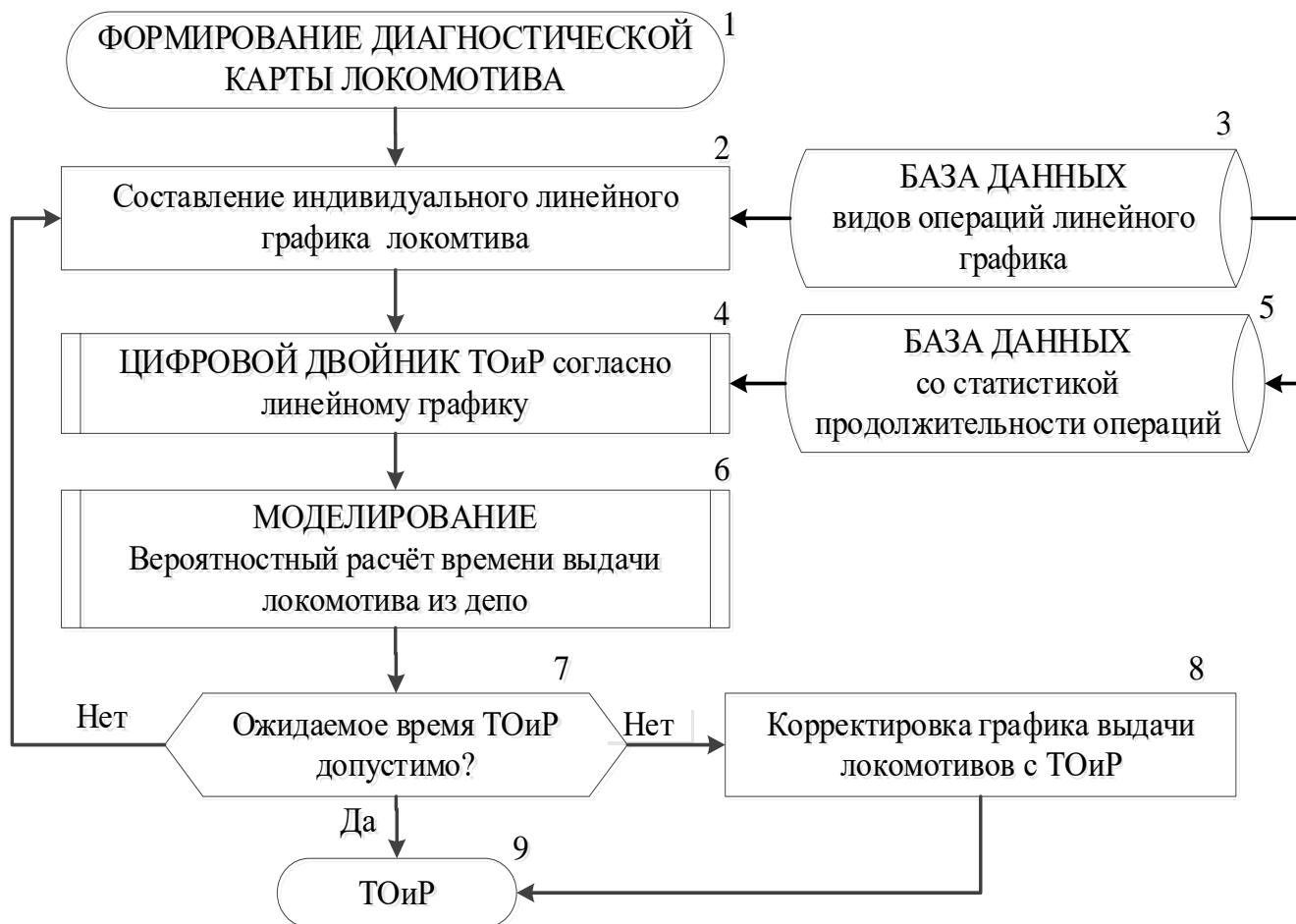
Рисунок 1 – NPV бортовых систем диагностирования

Минимально необходимый набор систем диагностирования по результатам исследований 3-го и 4-го разделов использован в разрабатываемой модели.

**В пятом разделе** предложен метод прогнозирования времени выдачи локомотивов на линию после ТОиР: при индивидуальном планировании объёма работ по данным диагностики возникает проблема с неопределённостью времени выдачи локомотива, что затрудняет его подвязку под поезд.

Предлагается по технологии «Цифровой двойник» (рисунок 2) в процессе выполнения ремонтных операций накапливать информацию о математическом ожидании их продолжительности, среднеквадратичном отклонении, определять закон распределения случайной величины (предварительно до начала моделирования), фиксировать статистические данные форс-мажорных ситуаций: отсутствие ресурсов, ожидание свободности оборудования и другое.

При приёмке локомотива на ТОиР после диагностирования составляется сетевой график его ремонта, по которому в АСУ вероятностными методами с использованием ранее накопленной статистики моделируется процесс ТОиР и вычисляется ожидаемое время ремонта.



**Рисунок 2 – Алгоритм работы цифрового двойника ТОиР**

Моделирование повторяется многократно, что позволяет получить распределение вероятности ожидаемого времени ТОиР. Для моделирования разработаны алгоритмы (рисунки 3 – 5) и соответствующее программное обеспечение, получено авторское свидетельство Роспатента.

Результаты моделирования – это вероятностная гистограмма распределения времени выполнения ТОиР за определённые периоды времени. Алгоритмы отлажены в среде VBA Excel. На рисунке 6 приведён пример тестового сетевого графика ремонта и результаты моделирования по нему за 1000 итераций.

Диспетчер по результатам моделирования может планировать подвязку локомотива к поезду, либо изменить сетевой график ремонта за счёт перераспределения ресурсов, изменения последовательности действий, использования обходных решений вместо полноценного ремонта. Таким образом, проблему неопределённости времени ремонта при использовании систем диагностирования можно решить методом имитационного моделирования по принципу «Цифровой двойник».

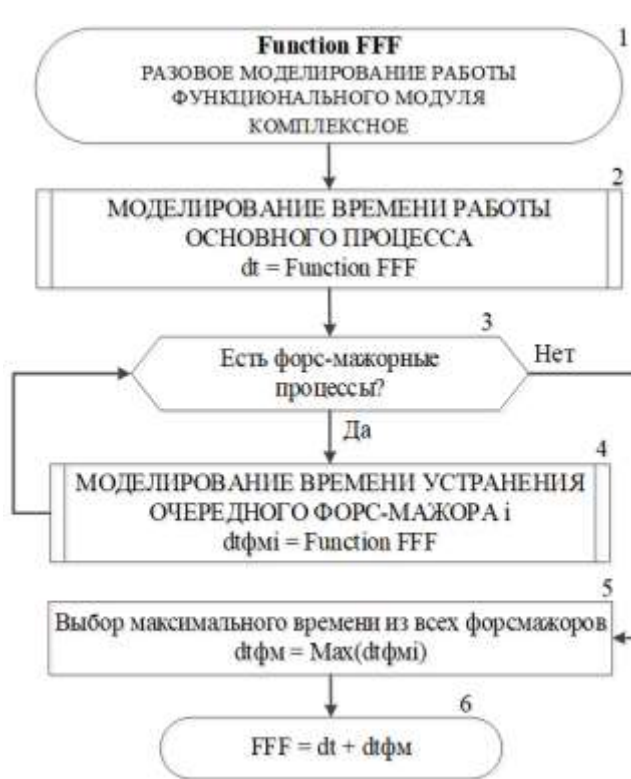


Рисунок 3 – Алгоритм учёта форс-мажора

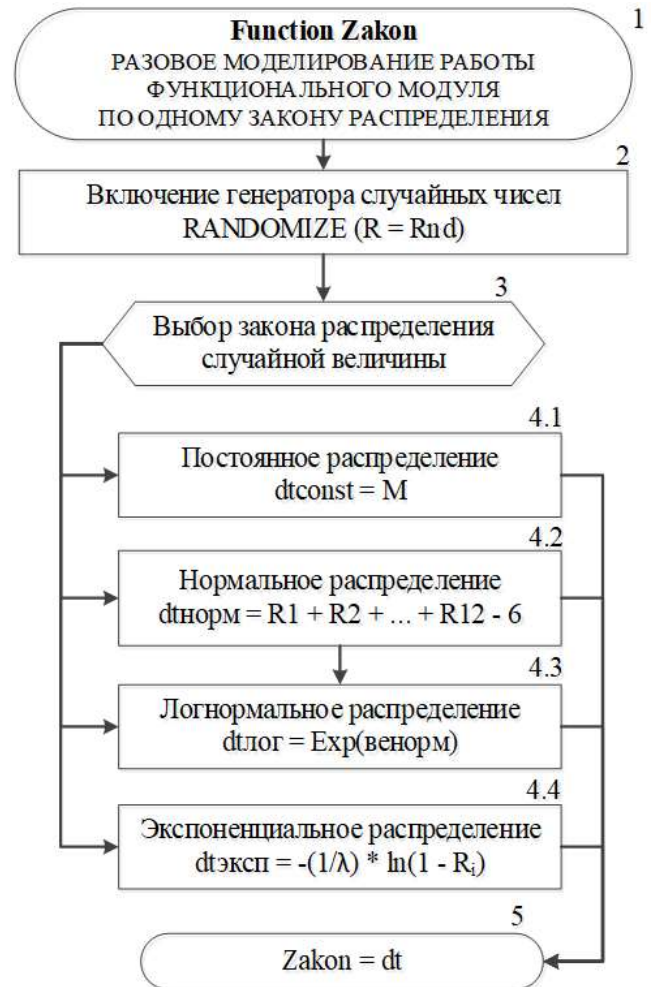
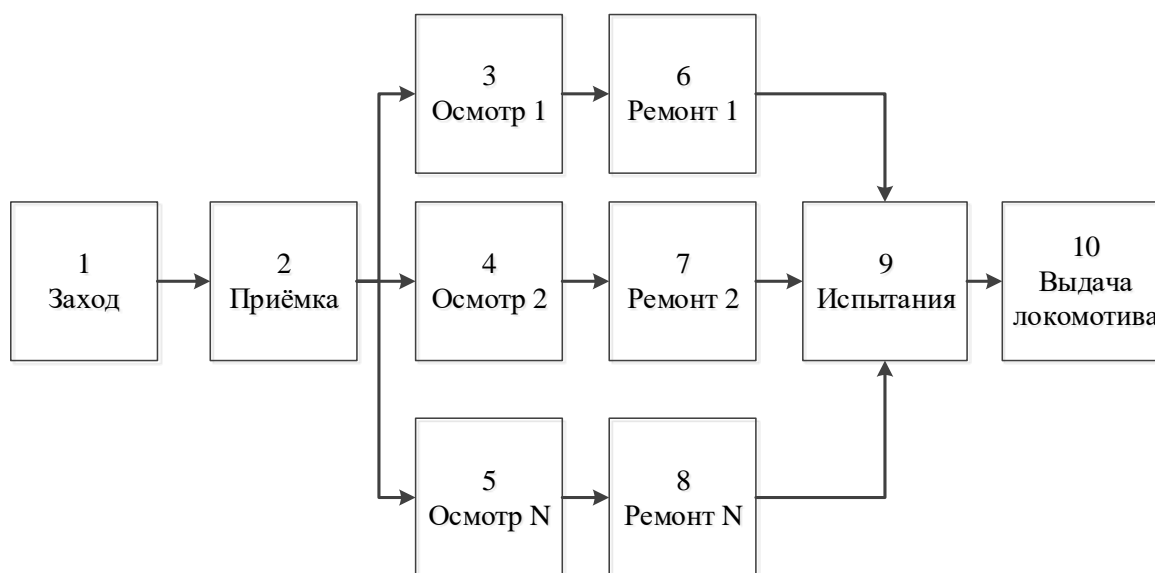
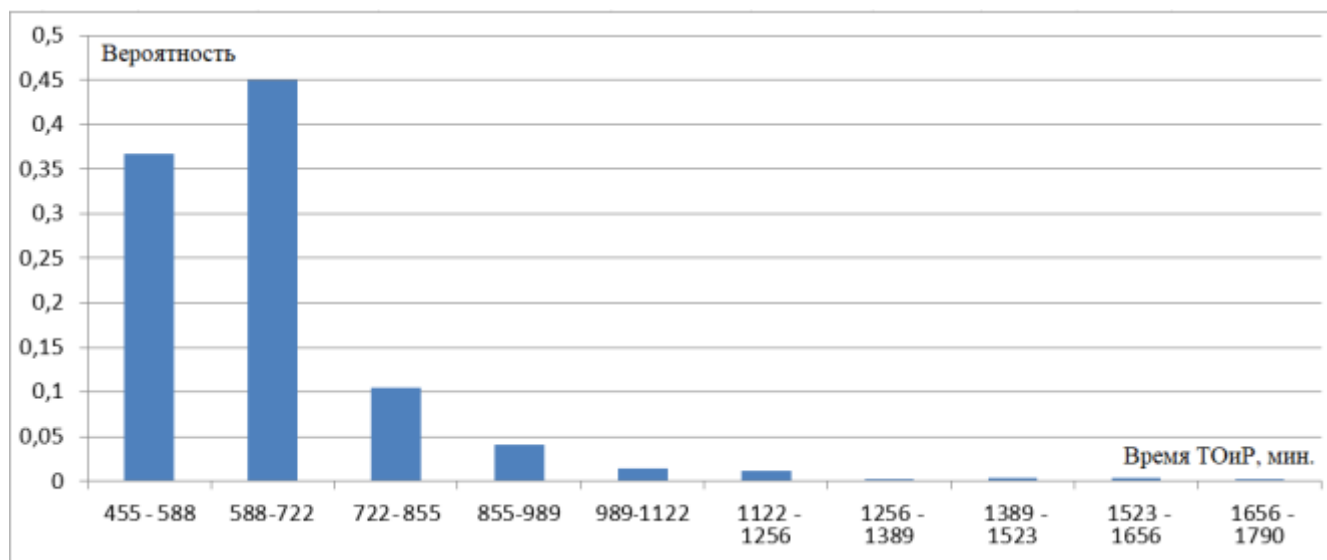
Рисунок 4 – Моделирование работы функционального элемента по заданному закону распределения случайной величины с вычислением времени выполнения операции  $dt$  для нормального, логнормального и экспоненциального законов распределения случайной величины

Рисунок 5 – Моделирование с использованием цифрового двойника ТОиР



*а – Тестовая модель сетевого графика*



*б – Результаты моделирования*

**Рисунок 6 – Пример тестового моделирования процесса ТОиР**

В шестом разделе приведено описание разработанной модели управления жизненным циклом локомотивов с использованием систем технического диагностирования, полученной в результате выполненных исследований, описанных в предыдущих разделах (далее – Модель).

В киберфизической модели управления жизненным циклом локомотивов выделено пять уровней: два типовых и три специфических. Аппаратно-программная платформа выбирается из имеющихся на IT-рынке. Стандартные технические решения в основном связаны с предложениями технологии «Индустрия 4.0». Специализированные технические и технологические решения описаны в диссертации. Системы интеллектуального управления связаны с поддержкой принятия решений при управлении жизненным циклом, пример



которой описан в пятом разделе. Именно по отношению к этому уровню пирамиды часто применяют термины «Умное производство» (Smart Production), «Цифровое производство», «Интеллектуальная система управления» и даже «Искусственный интеллект». В модели жизненного цикла понимается так называемый «слабый» искусственный интеллект, а не искусственный разум в понимании Алана Тьюринга и Айзека Азимова с тремя правилами робототехники.

Модель включает в себя все принципы и аппаратно-программные средства, используемые в настоящее время: «Индустрия 4.0» (Интернет вещей, компьютерное зрение, дополненная реальность, RFID и NFC метки для идентификации оборудования, работа с большими данными, облачные технологии и др.), «Бережливое производство», Системы менеджмента качества, библиотеки сервисного обслуживания и другие. Контролируемые при управлении жизненным циклом локомотивов параметры распределяются согласно пирамиде Гейнриха, для управления безопасностью движения поездов необходимо контролировать надёжность технических средств железнодорожного транспорта, включая локомотивы, для чего необходимо контролировать качество их эксплуатации и технического обслуживания. В диссертации предложено в качестве «основания пирамиды» рассматривать параметры технического обслуживания и ремонта: типы работ (планово-предупредительные цикловые, планово-предупредительные сверхцикловые, устранение отказов и предотказов), их продолжительность и стоимость, используемые ресурсы.

Киберфизическая модель управления жизненным циклом локомотивов должна обладать интероперабельностью, т.е. возможностью информационного обмена различных информационных систем.

Внешнюю интероперабельность предлагается обеспечить через систему управления базами данных (СУБД) «Электронный паспорт жизненного цикла локомотива», собирающую информацию от АСУ всех предприятий, задействованных в жизненном цикле локомотивов: системы автоматического проектирования (САПР) локомотивов и оборудования об их структуре, требуемых ТОиР и условиях эксплуатации, АСУ локомотивостроительных заводов о номерах установленного оборудования, их изготовителях и результатах испытаний, АСУ ТОиР и локомотиворемонтных заводов о результатах выполненных ТОиР, АСУ

железнодорожного транспорта об эксплуатации локомотивов. Предложен возможный вариант схемы взаимодействия АСУ.

Внутреннюю интероперабельность ТОиР следует обеспечить путём автоматизации сбора информации от всех видов автоматизированных систем технического диагностирования, включая бортовые и встроенные, от станков и технологического оборудования с микропроцессорным управлением. В основу модели предлагается положить Универсальную ремонтную позицию депо, включающую в себя все выше описанные принципы (рисунок 7).

На основании анализа мирового и отечественного опыта (литературного обзора) управления жизненным циклом локомотивов в целом и их ТОиР в частности (раздел 1), вероятностно-статистического анализа причин низкой надёжности отечественных локомотивов (раздел 2), информационных возможностей современных автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД, раздел 3) и технико-экономической целесообразности их применения (раздел 4), разработки метода прогнозирования времени выдачи локомотивов после ТОиР с использованием современных подходов организации производства как киберфизических производственных систем (раздел 6), предлагается следующая модель управления жизненным циклом отечественных локомотивов.

Создаётся система управления базами данных (СУБД) «Электронный паспорт жизненного цикла локомотива» (ЭПЛ), в которую по принципам внешней интероперабельности собирается вся информация из всех информационных систем о каждом локомотиве на протяжении всего его жизненного цикла.

Этап проектирования локомотивов осуществляется с использованием соответствующих средств автоматизации проектирования (САПР): формируется структура оборудования для этой серии, определяется система ТОиР. Предусматривается бортовая и встроенные автоматизированные системы технического диагностирования (АСТД), которые должны обеспечить как контроль технического состояния оборудования в эксплуатации, выявление предотказных состояний, так и позволять прогнозировать остаточный ресурс оборудования.

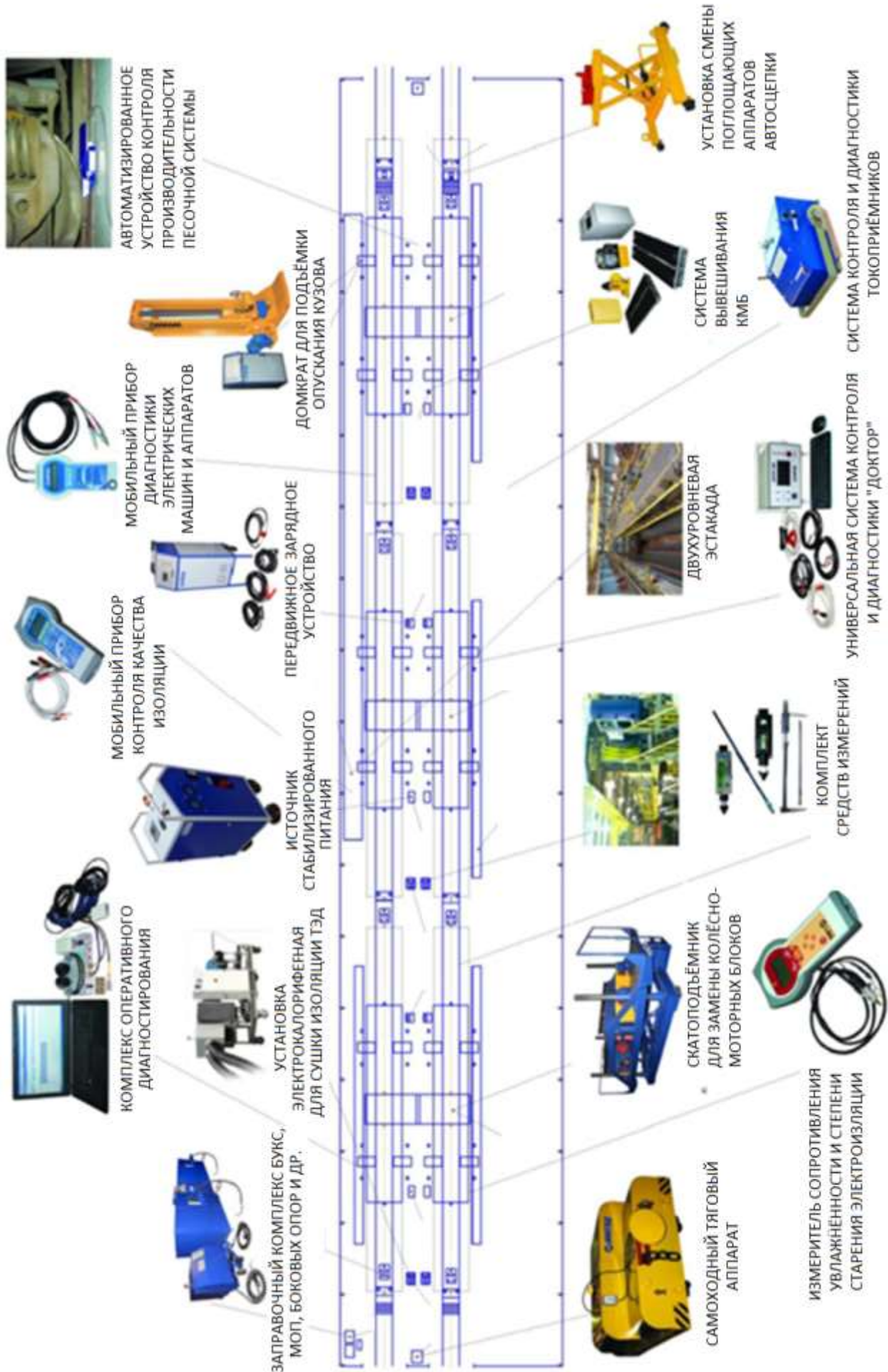


Рисунок 7 – Универсальная киберфизическая ремонтная позиция

На этапе изготовления локомотива по данным АСУ завода в электронном паспорте создаётся новый экземпляр нужной серии локомотива с указанием его номера, типов и номеров линейного оборудования, заводов-изготовителей или поставщиков, результатов испытания оборудования и локомотива в целом и др. Поставка локомотивов идёт по контракту жизненного цикла (КЖЦ).

В ОАО «РЖД» локомотив и его линейное оборудование ставятся на хозяйственный (бухгалтерский) учёт в ЕК АСУ ФР. Данные синхронизируются с ЭПЛ на всём этапе эксплуатации и утилизации локомотива. Дальнейшее накопление информации об эксплуатации локомотива идёт в информационных системах АСОУП, ГИД «Урал», ИСУЖТ и др. Одновременно по замечаниям машиниста и данным МСУ ведётся мониторинг технического состояния локомотивов.

В АСУ ТОиР сервисных компаний и локомотиворемонтных заводов фиксируются основные параметры надёжности локомотивов по числу отказов, объёму выполненных плановых и дополнительных работ. При этом используются автоматизированные системы технического диагностирования для планирования индивидуального для каждого локомотива объёма работ. Вся информация также передаётся в ЭПЛ. Таким образом, на основании информации всех АСУ на протяжении жизненного цикла локомотивов формируется комплексная информация, позволяющая управлять стоимостью и эффективностью жизненного цикла локомотивов, обосновано заключать контракты жизненного цикла.

**Седьмой раздел** является заключительным и описывает практическую реализацию разработанной модели управления жизненным циклом локомотивов с использованием автоматизированных систем технического диагностирования, описана методика её реализации.

По заданию компаний «ЛокоТех» и «Рослокомотив» пилот-проект Модели реализован в сервисном локомотивном депо «Братское» станции «Вихоревка» Восточно-Сибирской железной дороги ОАО «РЖД». Депо по контракту жизненного цикла обслуживает электровозы переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) и приводом постоянного тока производства НЭВЗ: 52 двухсекционных серии 2ЭС5К и 141 трёхсекционный серии 3ЭС5К.

Надёжность локомотивов на момент начала работ в 2018-м году была ниже установленной требованиями контракта жизненного цикла. Коэффициент готовности к эксплуатации был ниже 0,92 при нормативном уровне 0,95. Имел место перепростой локомотивов как в ожидании ТОиР, так и во время ТОиР. Качество обслуживания электровозов в депо «Братское» не соответствовало требованиям. Потери времени наблюдались при перекатке колёсно-моторных блоков и обточке колёсных пар. Время простоя существенно превышало нормативное. Были большие логистические потери. Качество ремонта было низким.

Выполнена реконструкция депо под сквозную технологию: приёмка локомотива, диагностирование, организация процесса ТОиР, завершение обслуживания, выдача локомотива на линию. Внедрены шесть универсальных ремонтных позиций (включая перекачку колёсно-моторных блоков и обточку колёсных пар). Реализована расшифровка данных бортовых МСУД, измерение износа бандажей колёсных пар и тормозных колодок, анализ износа моторно-осевых подшипников, замер состояния изоляции тяговых электродвигателей и электрических аппаратов. В процессе ТОиР диагностируются биение и износ коллектора двигателей, уровень масла в моторно-осевых подшипниках. Результаты фиксируются в АСУ ТОиР. Автоматизированный склад выдаёт запчасти только по электронным нарядам. Реализован пономерной учёт ремонтируемого оборудования. Формируется электронный чек-лист. Управление процессом ТОиР осуществляется диспетчерским аппаратом из ситуационного центра, в котором на больших экранах отражаются все процессы.

В результате внедрения Модели реализованы следующие автоматические и автоматизированные функции: диспетчеризация из единого центра, прогнозирование отказов на основе телеметрии, определение износа тормозных колодок, прогнозирование износа колёсных пар и моторно-осевых подшипников, RFID идентификация линейного оборудования, видео распознавание номеров секций, видео фиксация хода ремонта, контроль биения коллектора и износа тяговых электродвигателей, измерение параметров бандажей колёсных пар, измерение уровня масла в редукторе, автоматизированный склад, идентификация сотрудников и их позиционирование в цеху, автоматическая выдача, контроль исполнения и закрытие нарядов рабочим с дальнейшим начислением зарплаты, планирование

работ и ресурсов, мобильные приложения для закрытия нарядов, учёт колёсных пар, выходной электронный чек-лист, система менеджмента качества.

Внедрение Модели завершено в конце 2019-го года и позволило сократить время ТОиР в 3 раза, на ремонте в объёме ТР-1 – с 42-х до 22-х часов. Коэффициент готовности к эксплуатации (КГЭ) вырос с 0,914 до заданного. Парк маневровых локомотивов и число локомотивных бригад сокращены на 30 %. Объём ремонтов увеличен до 180 секций в месяц. Использование данных бортовых МСУ сократило затраты на 240,8 тыс. руб. в месяц, из них 71 тыс. руб. – за счёт сокращения объёмов и стоимости ТОиР, 169,7 тыс. руб. – за счёт снижения затрат на внеплановые ремонты.

В результате внедрения Модели сократились время осмотра состояния бандажей колесных пар, объём работ по вибродиагностированию подшипников качения колесно-моторных блоков, время осмотра буксовых узлов, объём работ по добавлению пластичной смазки, время проверки уровня и состояния смазки и ревизия в моторно-осевых подшипников, время ревизии моторно-осевых подшипников, объём работ по проверке уровня смазки в кожухах, время на осмотр гидравлических гасителей колебаний.

Полученный технико-экономический эффект позволяет тиражировать Модель на весь Восточный полигон ОАО «РЖД», электрифицированный на переменном токе. Предполагается сокращение базовых сервисных локомотивных депо с 23-х до 10 и увеличение обслуживаемого в депо парка с 300 до 800 секций.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе лично автором выполнены самостоятельные научно-практические законченные исследования с получением новых теоретических положений. Обоснованы технические и технологические апробированные решения в области управления жизненным циклом локомотивов (ЖЦЛ), внедрение которых вносит значительный вклад в развитие локомотиворемонтного комплекса железнодорожного транспорта России.

1 Разработана технологическая модель автоматизированной системы управления жизненным циклом локомотивов (АСУ ЖЦЛ), представляющая собой киберфизическую производственную систему, объединяющую в себе по принципу

внутренней интероперабельности автоматизированные системы технического диагностирования оборудования локомотивов (АСТД), включая бортовые и встроенные, технологическое оборудование с микропроцессорным управлением и АСУ техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР) локомотивов (с использованием методов «Индустрии 4.0», систем менеджмента качества, бережливого производства, сервисного обслуживания и др.), а также объединяющую в себе по принципу внешней интероперабельности все АСУ, участвующие в жизненном цикле локомотива: системы автоматического проектирования оборудования локомотивов (САПР), АСУ локомотиво-строительных и локомотиворемонтных заводов, АСУ эксплуатирующих организаций (включая АСУЖТ ОАО «РЖД»), АСУ ТОиР сервисных компаний с функциями поддержки принятия решений. В основе Модели предлагается создать систему управления базами данных (СУБД) «Жизненный цикл локомотива» (ЖЦЛ), для которой описан порядок её формирования и обновления.

2 Выполнен анализ мирового и отечественного опыта управления жизненным циклом локомотивов с использованием литературных источников и собственного опыта. Анализ показал, что, наряду с остающейся в основе планово-предупредительной системой сервисного ТОиР, есть тенденция использования данных бортовых АСТД на базе микропроцессорных систем управления локомотивов (МСУ), которые поступают в АСУ ТОиР по радиоканалу в режиме реального времени (online) для дополнительного индивидуального планирования объёма ТОиР. Опыт использования данных бортовых и встроенных АСТД при организации сервисного ТОиР локомотивов есть как у зарубежных лидеров локомотивостроения, так и у отечественных компаний. При этом важно объединить технологические процессы мониторинга и диагностирования с технологическими процессам планирования в АСУ ТОиР. Мировой и отечественный опыт использован в разработанной Модели.

3 Разработан метод оценки эффективности использования тягового подвижного состава (ТПС) через коэффициент полезной работы  $K_{АП}$ : отношение времени нахождения локомотива в состоянии «тяга в голове поезда» согласно классификатору АСОУП ОАО «РЖД» к общему времени эксплуатации (в долях единицы или процентах). Разработано соответствующее программное обеспечение на алгоритмическом языке Visual BASIC for Applications (VBA) в среде MS Excel, с

помощью которого выполнен анализ эксплуатации отечественного локомотивного парка: по данным АСОУП (АСУЖТ ОАО «РЖД») случайно отобранных 40 локомотивов по 12-и самым массовым сериям (8 серий электровозов и 4 серии тепловозов) за 400 – 500 дней их эксплуатации (с учётом проведения ТОиР – это год эксплуатации). Размер репрезентативной выборки гарантирует достоверность полученных результатов. Доказано, что в среднем у локомотивов  $K_{АП} = 48 \%$  при одновременном несоблюдении требований контрактов на сервисное обслуживание по надёжности. При этом есть отдельные локомотивы, у которых по итогам работы за год  $K_{АП} \geq 75 \%$ . Потери в эксплуатации  $\Delta K_{АП} = 25 \%$ , в ожидании ТОиР  $\Delta K_{АП} = 14,4 \%$ , при выполнении ТОиР  $\Delta K_{АП} = 5 \%$ . При этом ТОиР занимает около 10 % у электровозов и 20 % у тепловозов общего бюджета времени. Таким образом, оптимальная модель жизненного цикла локомотивов является важным резервом повышения эффективности их эксплуатации как за счёт повышения эффективности использования локомотивов, так и за счёт повышения эффективности сервисного ТОиР, в т.ч. за счёт сокращения времени простоя на ТОиР до уровня нормативного и выше.

4 Выполненный анализ принятых в контрактах жизненного цикла локомотивов (КЖЦ) между ОАО «РЖД» и поставщиками локомотивов показателей надёжности по категориям отказов согласно классификатору системы учёта отказов «КАС АНТ» ОАО «РЖД» показал, что категории отказов в большей степени зависят от условий эксплуатации локомотивов, а не от производителей оборудования. Разработан вероятностно-статистический метод установления взаимосвязи между показателями надёжности, предусмотренными стандартом, и показателями, принятыми в КЖЦ.

5 Разработан метод оценки информационной эффективности систем технического диагностирования с позиций теории познания (гносеологии), теорий информации, автоматического управления и цифровизации. Взятая за основу формула Шеннона дополнена статистической вероятностью наступления отказа и стоимостью устранения отказа в удельных единицах. Введён коэффициент информационной эффективности АСТД, как отношение её информативности по предложенной формуле к общей информационной энтропии объекта диагностирования. По предложенному методу выполнен анализ информационной эффективности наиболее распространённых автоматизированных систем



технического диагностирования (АСТД). Доказано, что бортовые АСТД обладают ограниченной информативностью даже при расширении их функциональности, поэтому исключить из системы ТОиР деповские стационарные и переносные АСТД нельзя.

6 Разработан метод технико-экономической оценки эффективности внедрения АСТД имитационным моделированием в среде MS Excel с использованием специально разработанной на VBA программы месячного расчёта чистой приведённой стоимости проекта (NPV). Доказано, что применение всех видов существующих АСТД оборудования локомотивов экономически нецелесообразно. Доказана эффективность применения бортовых АСТД, автоматизированных систем реостатных испытаний дизель-генераторных установок, виброиспытаний колёсно-моторных блоков и ряда других АСТД.

7 Разработан метод оперативной экспертной оценки продолжительности проведения ТОиР при его организации с индивидуальным для каждой секции планированием объёма ремонта с учётом диагностических данных совокупности всех АСТД. В основу метода положено вероятностно-статистическое моделирование продолжительности отдельных ремонтных операций с целью вероятностной оценки ожидаемого времени ТОиР каждой конкретной секции локомотива. Для проверки метода разработано соответствующее программное обеспечение в среде MS Excel на VBA.

8 Выполнена практическая реализация системы ТОиР по предложенной модели жизненного цикла локомотивов (ЖЦЛ) в сервисном локомотивном депо «Братское» на станции Вихоревка (Восточно-Сибирская железная дорога) группы компаний «ЛокоТех» применительно к электровозам переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями производства НЭВЗ. Внедрение модели позволило существенно повысить эффективность работы депо (простой на ТОиР сокращён в три раза, коэффициент готовности к эксплуатации приведен в норму, логистические потери сокращены на 30 % и др.), тем самым доказав эффективность предложенных технических и технологических решений по результатам теоретических исследований. Запланировано тиражирование технологии во всех сервисных локомотивных депо Восточного полигона ОАО «РЖД», обслуживающих аналогичные электровозы.

9 Перспективой дальнейшей разработки темы является:

- адаптация разработанной модели и технологии ТОиР для других серий локомотивов;
- инкапсуляция в АСУ ТОиР всех предложенных математических методов управления с целью повышения эффективности системы ТОиР по предложенной Модели управления жизненным циклом;
- расширение функциональности бортовых АСТД за счёт установки дополнительных датчиков, развития встроенных в само оборудование АСТД, разработки дополнительных методов прогнозирования остаточного ресурса оборудования и локомотива в целом;
- дальнейшая интеграция всех видов АСТД в АСУ ТОиР, в информационные системы «Цифровое депо» и «Цифровая железная дорога» (ИСУЖТ).

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

*а) в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ*

- 1 Семенов, А.П. Обеспечение эксплуатационной надежности поездов метрополитена на основе системы сбора, обработки и анализа диагностической информации [Текст] / А.П. Семенов // Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – Т. 14. – № 2. – С. 98-104.
- 2 Семенов, А.П. Исследование эффективности эксплуатации локомотивов [Текст] / А.П. Семенов, И.К. Лакин // Известия Транссиба. – 2019 (2018). – № 4(36). – С. 41-53.
- 3 Семенов, А.П. Модель вибрационного диагностирования тягового подвижного состава [Текст] / А.П. Семенов // Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 5. – С. 45-49.
- 4 Семенов, А.П. Использование технологии "цифровой двойник" при управлении ремонтом локомотивов [Текст] / А.П. Семенов, И.К. Лакин, И.Ю. Хромов // Мир транспорта. – 2019. – № 6. – С. 82-92.
- 5 Семенов, А.П. Направления повышения эффективности эксплуатации локомотивов [Текст] / А. П. Семенов, И.К. Лакин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – № 3 (63). – С. 89-98.
- 6 Семенов, А.П. Цифровое депо – технологическая основа цифровой трансформации локомотивного комплекса [Текст]/ А.П. Семенов, О.С. Валинский, А.М. Лубягов, А.Н. Маврин, Д.В. Казарин // Железнодорожный транспорт. –2020. № 3. С. 26-32.
- 7 Семенов, А. П. Цифровизация ремонтного производства тягового подвижного состава / А.П. Семенов, Д.В. Казарин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 1 (45). – С. 93-103.
- 8 Семенов, А.П. Мониторинг технического состояния электропоездов переменного тока по расходу электроэнергии на тягу поездов [Текст] / А.П. Семенов, В.В. Семченко, И.Ю. Хромов // Мир транспорта. – 2020. – № 5. – С. 62-89.

- 9 Семенов, А.П. Информационная энтропия систем технического диагностирования локомотивов / А.П. Семенов, И.К. Лакин, И.Ю. Хромов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 42–53.
- 10 Семенов, А.П. Разработка модели управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования / А.П. Семенов // Известия Транссиба. – 2020. – № 3. – С. 58-65.
- 11 Семенов, А.П. Расчёт вероятности категорий отказов по надёжности оборудования локомотивов / А.П. Семенов, И.К. Лакин // Известия Транссиба. – 2020. – № 4. – С. 2-8.
- 12 Семенов, А. П. Организация управления жизненным циклом отечественных локомотивов / А. П. Семенов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2021, № 1. – С. 62-71.

*б) патенты*

- 1 Комплекс микропроцессорных устройств для изменения параметров работы двигателей внутреннего сгорания [Текст]: Пат на промышленный образец 98083 Российская Федерация, МКПО 10-04; 10-05 / Семенов А.П., Степанов А.Н.; заявитель и патентообладатель: НИИТКД; заявка № 2015501888 от 16.05.2015.
- 2 Моечная машина [Текст]: Пат. 165204 Российская Федерация, МПК В08В 3/08 / Семенов А.П., Мехедов В.К. Слинкин С.А.; заявитель и патентообладатель: НИИТКД» (RU); приоритет 11.01.2016; опубл. 10.10.2016, бюл. № 28.
- 3 Устройство и способ оценки технического состояния асинхронных двигателей [Текст]: Пат. 2711647 Российская Федерация, МПК G01M 7/02 / Семенов А.П., Скляр А.В.; заявитель и патентообладатель: НИИТКД» (RU); приоритет 08.04.2019; опубл. 17.01.2020, бюл. № 2.
- 4 Способ диагностики тормозной сети поезда [Текст]: Пат. 2711476 Российская Федерация, МПК В60Т 17/22; G01L 19/08 / Семенов А.П., Мехедов В.К., Барабанов В.Д.; заявитель и патентообладатель: ОАО «РЖД» (RU); приоритет 08.04.2019; опубл. 17.01.2020, бюл. № 2.

*в) свидетельства РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ*

- 1 Свид. 2018613898. Система управления диагностикой «Vibroinf» / Семенов А.П., Елисеев С.В., Балкашин В.В., Степанов А.Н.; заявитель и патентообладатель: НИИТКД» (RU). - заявл. 16.05.2013.
- 2 Свид. 2013616274. Комплексная система управления технологией восстановления электрических машин «Суховой». / Семенов А.П., Елисеев С.В., Степанов А.Н., Столяров Д.В.; заявитель и патентообладатель: НИИТКД» (RU). - № 2013614103; заявл. 16.05.2013.
- 3 Свид. 2013614067. Комплексная система управления процессом восстановления аккумуляторных батарей «Комплекс ЭДС». / Семенов А.П., Елисеев С.В., Степанов А.Н., Столяров Д.В.; заявитель и патентообладатель: НИИТКД (RU); заявл. 16.05.2013.
- 4 Свид. 2016614060 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Система управления стендом комплексных испытаний воздухораспределителей и авторежимов (СИМГВР). / Семенов А.П., Скляр А.В., Кузнецов А.Н.; заявитель и патентообладатель: НИИТКД»(RU); заявл. 24.02.2016.

- 5 Свид. 2016613989. Система управления стендом для ремонта и испытаний главной части воздухораспределителей (СИГВР). / Семенов А.П., Скляр А.В., Кузнецов А.Н.; заявитель и патентообладатель: НИИТКД» (RU); заявл. 24.02.2016.
- 6 Свид. 2016613990. Система управления стендом для ремонта и испытаний авторежимов (СИАРЕЖ). / Семенов А.П., Скляр А.В., Кузнецов А.Н.; заявитель и патентообладатель: НИИТКД» (RU). заявл. 24.02.2016.
- 7 Свид. 2016613988. Система управления стендом гидравлических и пневматических испытаний соединительных рукавов (СИПСР). / Семенов А.П., Скляр А.В., Кузнецов А.Н.; заявитель и патентообладатель: НИИТКД» (RU); заявл. 24.02. 2016.
- 8 Свид. 2016613993. Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Система управления стендом для ремонта и испытаний магистральных частей воздухораспределителей (СИМВР). / Семенов А.П., Скляр А.В., Кузнецов А.Н.; заявитель и патентообладатель: НИИТКД» (RU); заявл. 24.02.2016.
- 9 Свид. 2017661832. Программа анализа данных оборудования локомотивов. / Семенов А.П., Кузнецов С.М., Петров А.М., Демин О.М., Деглан В.А.; заявитель и патентообладатель: НИИТКД» (RU); заявл. 24.02. 2016.
- 10 Свид. 2017662100. Программа мониторинга оборудования локомотивов. / Семенов А.П., Кузнецов С.М., Петров А.М., Демин О.М., Деглан В.А.; заявитель и патентообладатель: НИИТКД (RU); заявл. 24.02.2016.
- 11 Свид. 2017662903. Управление системой контроля и диагностирования параметров подвижного состава «Доктор». / Семенов А.П., Скляр А.В., Степанов А.Н.; заявитель и патентообладатель: НИИТКД (RU); заявл. 06.10.2016.
- 12 Свид. 2018612280. Обучающе-контролирующая программа «PoTeGra». / Семенов А.П., Деглан В.А., Слинкин С.А., Мехедов В.К.; заявитель и патентообладатель: НИИТКД» (RU); заявл. 25.12.2017.
- 13 Свид. 2018612355. Программа взаимодействия базы данных с программой «PoTeGra». / Семенов А.П., Деглан В.А.; заявитель и патентообладатель: НИИТКД (RU); заявл. 25.12. 2017.
- 14 Свид. 2018620282. База данных хранения и обработки параметров оборудования локомотивов. / Семенов А.П., Кузнецов С.М., Петров А.М., Демин О.М., Деглан В.А.; заявитель и патентообладатель: НИИТКД (RU); заявл. 25.12.2017.
- 15 Свид. 2020661153. Вероятностно-статистическое моделирование работы ремонтного локомотивного депо с целью прогнозирования времени выполнения технического обслуживания и ремонта (ТОиР). / А.П.Семёнов, И.К.Лакин. Заявитель и патентообладатель: НИИТКД (RU). заявл. 09.09.2020.
- 16 Свид. 2020661903 Статистический анализ эффективности эксплуатации локомотивов. / А.П.Семёнов, И.К.Лакин. Заявитель и патентообладатель: НИИТКД (RU). заявл. 16.09. 2020.
- 17 Свид. 2021618782 Расчёт чистой приведенной стоимости проекта (NPV) для оценки эффективности внедрения автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) локомотивов. / А.П.Семёнов, И.К.Лакин. Заявитель и патентообладатель: НИИТКД (RU); заявл. 20.04.2021.

*г) статьи в отраслевых журналах и материалах конференций*

- 1 Семенов, А.П. Применение информационных технологий при совершенствовании системы ремонта железнодорожной техники [Текст] / А.П. Семенов, А.Н. Головащ, Д.Э. Тиссен, М.В. Лифанов // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сборник научных статей III Международной научно-практической конференции / Минобрнауки России; – Курск: Юго-Зап. Гос. Ун-т., 2012. – С. 181-185.
- 2 Семенов, А.П. Проблема обеспечения постоянства величины натяга в конических соединениях тяговых электродвигателей локомотивов [Текст] / А.П. Семенов, Н.В. Калинин // Измерения: состояние, перспективы развития: тез. докл. Междунар. Науч.-практ. Конф. – Челябинск: ЮурГУ, 2012. – Т. 2. – С. 39-46.
- 3 Семенов, А.П. Обеспечение эксплуатационной надежности поездов метрополитена на основе системы сбора, обработки и анализа диагностической информации [Текст] / А.П. Семенов, // Измерения: состояние, перспективы развития: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – Челябинск: ЮурГУ, 2012. – Т. 2. – С. 69-77.
- 4 Семенов, А.П. Комплексные решения автоматизации технологических процессов диагностирования и ремонта подвижного состава [Текст] / А.П. Семенов, С.В. Елисеев // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: Материалы X Междунар. науч.-практ. конф. – СПб: ПГУПС, 2015. – С. 65-68.
- 5 Семенов, А.П. Организация проведения реостатных испытаний при комиссионных проверках с использованием данных бортовых систем [Текст] / А.П. Семенов, С.М. Кузнецов // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава: Материалы третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием в трех частях. Часть 1. – Омск: ОмГУПС, 2015. – С. 107-115.
- 6 Семенов, А.П. Способ определения теплотехнического состояния ДГУ тепловозов [Текст] / А.П. Семенов, С.М. Кузнецов // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: материалы второй международной научно-практической конференции / Локо-Тех; МИИТ. – М.: ООО «Локомотивные технологии», 2015. – С. 264-268.
- 7 Семенов, А.П. Применение современных систем диагностирования в транспортном комплексе [Текст] / А.П. Семенов // Приоритетные направления и актуальные проблемы развития средств технического обслуживания летательных аппаратов: Сборник материалов докладов II Всероссийской НПК. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. – С. 36-38.
- 8 Семенов, А.П. Применение технологии промывки авиационных жидкостных систем и агрегатов в производственных условиях ремонтных предприятий ОАО «РЖД» [Текст] / А.П. Семенов, В.Б. Кровяков, С.А. Максимович / Сборник докладов и выступлений научно-деловой программы Международного военно-технического форума «Армия-2016» / МО РФ. – М.: 2016. – С. 235-239.
- 9 Семенов, А.П. Статистический анализ проблемы повышения эффективности эксплуатации локомотивов [Текст] / А.П. Семенов // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: материалы третьей международной научно-практической конференции / ООО «ЛокоТех»; МИИТ. – М.: ООО «ЛокоТех», 2018. – С. 325-332.
- 10 Семенов, А.П. О подходе к комплексному диагностированию локомотивов [Текст] / А.П. Семенов // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов:

- материалы третьей международной научно-практической конференции / ООО «ЛокоТех»; МИИТ. – М.: ООО «ЛокоТех», 2018. – С. 333-335.
- 11 Семенов, А.П. Повышение показателей эффективности вибрационного диагностирования колесно-моторных блоков локомотивов [Текст]/ А.П. Семенов // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век: Сборник трудов VI-й Международной научно-технической конференции. В 2-х т. – СПб: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. –Т. 1. – С. 159-164.
  - 12 Семенов, А.П. Как повысить эффективность использования локомотивов [Текст] / А.П. Семенов // Локомотив. – 2018. – №. 10. – С. 40-41.
  - 13 Семенов, А.П. Источники повышения эффективности использования бюджета времени локомотивов [Текст] / А.П. Семенов // Локомотив. – 2018. – №. 10. – С. 33-34.
  - 14 Семенов, А.П. Роль цифровых двойников в управлении сервисным обслуживанием локомотивов [Текст] / А.П. Семенов, И.К. Лакин, И.Ю. Хромов // Локомотив. – 2019. – № 6. – С.41-42.
  - 15 Семенов, А.П. Цифровая трансформация управления ремонтом локомотивов с использованием технологии цифрового двойника [Текст] / А.П. Семенов, И.К. Лакин // Цифровизация транспорта и образования: материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 125-летию железнодорожного образования в Сибири. – Красноярск: КрИЖТ – ИрГУПС, 2019. – С. 367-380.
  - 16 Семенов, А.П. Цифровая трансформация управления ремонтом локомотивов [Текст]/ А.П. Семенов, И.К. Лакин // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 10-я Междунар. НПК, 21-24 мая 2019 г. – ИрГУПС: 2019. – Т. 2. – С. 182-185.
  - 17 Семенов, А.П. Использование технологии «цифровой двойник» при управлении ремонтом локомотивов [Текст]/ А.П. Семенов, И.К. Лакин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2019. – Т. 63, № 3. – С. 89-98.
  - 18 Семенов, А.П. Технология «цифровой двойник» при техническом обслуживании локомотивов [Текст]/ А. П. Семенов // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2019. – № 3 (20). – С. 38-40.
  - 19 Семенов, А.П. «Цифровое депо» – инновационное решение для системы содержания парка локомотивов [Текст]/ А.П. Семенов, О.С. Валинский, А.М. Лубягов, А.Н. Маврин, Д.В. Казарин. // Локомотив. – 2020. – № 2. – С. 2-6.
  - 20 Семенов, А.П. Реализация проекта «Цифровое депо» и «Универсальная ремонтная позиция» [Текст] / А.П. Семенов // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава: труды ВНК с международным участием. – Красноярск: ДЦВ Красноярской ж.д., 2020. – С. 71-81.
  - 21 Семенов, А.П. Статистические методы повышения эффективности эксплуатации локомотивов [Текст] / А.П. Семенов // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава: труды ВНК с международным участием. – Красноярск: ДЦВ Красноярской ж.д., 2020. – С. 299-306.
  - 22 Семенов, А.П. Комплексное диагностирование локомотивов [Текст]/ А.П. Семенов // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава: труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Красноярск: ДЦВ Красноярской ж.д., 2020. – С. 305-309.
  - 23 Семенов, А.П. Организация технологического процесса оценки ресурса подшипниковых и редукторных узлов колесно-моторных блоков локомотивов в

- сервисных локомотивных депо России [Текст] / А.П. Семенов, А.В. Зайцев // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава: труды ВППК с международным участием. – Красноярск: ДЦВ Красноярской ж.д., 2020. – С. 310-317.
- 24 Лакин И.К. Автоматизация управления надёжностью оборудования локомотивов / И.К. Лакин, В.В. Семченко, А.П. Семенов // Локомотив. – 2020. – № 9. – С. 35-36.
- 25 Семенов, А.П. Перспективы развития цифровых технологий в сервисных ремонтных локомотивных депо / А.П. Семенов, В.В. Семченко, И.К. Лакин // Локомотив. – 2020. – № 11. – С. 2-5
- 26 Семенов, А.П. Разработка и реализация модели технического обслуживания и ремонта локомотивов с комплексным использованием автоматизированных систем технического диагностирования / А.П. Семенов – Локомотивы. Электрический транспорт – XXI век: Сборник материалов VII Международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 10-12 ноября 2020 г.) – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. – С. 58-64.
- 27 Лакин, И.К. Перспективы перехода на предиктивный ремонт локомотивов / И.К. Лакин, А.П. Семенов // Локомотивы. Электрический транспорт – XXI век: Сборник материалов VII Международной научно-технической конференции (Санкт-Петербург, 10-12 ноября 2020 г.) – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. – С. 64-69.
- 28 Лакин, И.К. Особенности основных понятий в области надёжности тягового подвижного состава / И.К. Лакин, А.П. Семёнов, К.В. Кудрин // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте: труды XXIV Всероссийской научно-практической конференции КриЖТ ИрГУПС. – Красноярск: КриЖТ ИрГУПС. – 2020. – Т. 2. – С. 98-101.
- 29 Семенов, А.П. Разработка киберфизической модели системы управления жизненным циклом локомотивов / А.П. Семенов, В.В. Семченко, И.К. Лакин / Локомотив. – 2021. – № 3. – С. 36-39.

#### *д) НАУЧНЫЕ МОНОГРАФИИ*

- 1 Матяш Ю.И. Информационные технологии и системы диагностирования железнодорожных вагонов при производстве и ремонте: Монография. Научное издание / Ю.И. Матяш, А.П. Семенов, Т.Б. Брылова, Е.В. Кондратенко. – М.: ВИНТИ РАН, 2020. – 256 с., ил. ISBN 978-5-902928-86-7.
- 2 Семенов, А.П. Модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования. Научная монография / А.П.Семенов – Омск: ООО «Образование Информ», 2021. – 368 с. Ил.107, Табл. 58, библиогр. 367 назв. ISBN 978-5-98649-052-6.

**СЕМЕНОВ Александр Павлович**

**МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЛОКОМОТИВОВ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОГО  
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание  
ученой степени доктора технических наук

---

Подписано в печать «12» октября 2021 г.  
Объем 2,5 усл. печ. л.

Заказ № 2636  
Тираж 100 экз.

Формат 60x90/16

---

127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9 стр. 9,  
ЦСО Отдел дизайна вёрстки и печати РУТ (МИИТ)