

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта»

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

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
ЛАКИН Игорь Капитонович

Москва – 2021 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1 АНАЛИЗ ОПЫТА РАБОТЫ ЛОКОМОТИВОРЕМОНТНОГО КОМПЛЕКСА	19
1.1 ОСНОВНЫЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ТЕРМИНЫ И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ	19
1.2 ДОЛГОСРОЧНАЯ ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ ОАО «РЖД»	22
1.2.1 Промышленная и социальная роль железных дорог	22
1.2.2 Современное положение железных дорог в России	23
1.2.3 Перспективное развитие железных дорог в России	24
1.3 ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЛОКОМОТИВНОГО ПАРКА	25
1.4 СЕРВИСНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЛОКОМОТИВОВ	30
1.5 КОНТРАКТ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА	32
1.6 КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ТРАНСПОРТЕ	34
1.7 ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ БОРТОВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	38
1.7.1 Опыт управления жизненным циклом тепловозов General Electric	38
1.7.2 Опыт мониторинга компании Siemens	43
1.7.3 Европейская система управления железнодорожным движением	45
1.7.4 Отечественный опыт использования бортовых диагностических данных	46
1.7.5 Центры управления тяговыми ресурсами ОАО «РЖД»	55
1.8 ДЕПОВСКИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	57
1.9 ОПЫТ ДЦВ КРАСНОЯРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ	62
1.10 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ НА НАДЕЖНОСТЬ ЛОКОМОТИВОВ	67
1.10.1 Отечественная история обслуживания локомотивов	67
1.10.2 Математические методы управления при обслуживании	69
1.10.3 Роль систем диагностирования в организации обслуживания	76
1.12 ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 1	79
2 СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЛОКОМОТИВОВ	80

2.1	АНАЛИЗ ПОЛЕЗНОЙ РАБОТЫ ЛОКОМОТИВОВ	80
2.1.1	Методика анализа эффективности эксплуатации	80
2.1.2	Тяга в голове поезда (полезная работа локомотива)	88
2.1.3	Техническое обслуживание и ремонт	92
2.1.4	Результаты анализа полезной работы	96
2.2	АНАЛИЗ НАДЁЖНОСТИ ЛОКОМОТИВОВ	98
2.2.1	Надёжность локомотивов согласно национальным станартам	98
2.2.2	Категории отказов локомотивов	100
2.2.3	Прогнозирование категории отказа	101
2.2.4	Статистика отказов оборудования локомотивов	103
2.2.5	Результаты анализа надёжности локомотивов	106
2.3	УЧЁТ РАБОТЫ ЛОКОМОТИВОВ	107
2.4	АНАЛИЗ ПРОСТОЯ ЛОКОМОТИВОВ	114
2.5	ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2	116
3	АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	117
3.1	РАЗРАБОТКА МЕТОДА АНАЛИЗА СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	117
3.1.1	Постановка задачи анализа систем диагностирования локомотивов	117
3.1.2	Основные понятия технической диагностики	118
3.1.3	Цифровые технологии в системах диагностирования	122
3.1.4	Методы теории автоматического управления в диагностике	130
3.1.5	Гnoseологические предпосылки систем диагностирования	137
3.1.6	Методы теории информации в диагностике	141
3.1.7	Методика анализа эффективности систем технического диагностирования оборудования локомотива	147
3.2	ИНФОРМАЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ БОРТОВЫХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	151
3.2.1	Функциональная характеристика бортового диагностирования	151

3.2.2	Диагностирование электровозов переменного тока	154
3.2.3	Диагностирование электровозов постоянного тока	160
3.2.4	Диагностирование тепловозов	161
3.2.5	Бортовые системы учёта топлива	163
3.2.6	Результаты анализа эффективности бортовых систем	173
3.3	ИНФОРМАЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕПОВСКИХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	174
3.3.1	Реостатные испытания тепловозов	174
3.3.2	Вибродиагностирование	178
3.4	ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 3	180
4	РАЗРАБОТКА МЕТОДА И МЕТОДИКИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	181
4.1	ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ АНАЛИЗА	181
4.2	ЭФФЕКТ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	182
4.2.1	Источники эффекта	182
4.2.2	Сокращение времени ожидания ремонта	184
4.2.3	Сокращение объема плановых ремонтов	188
4.2.4	Сокращение объема неплановых ремонтов	188
4.2.5	Общий эффект от внедрения систем диагностирования	190
4.3	ЗАТРАТЫ НА ДИАГНОСТИРОВАНИЕ	191
4.3.1	Источники затрат	191
4.3.2	Капитальные затраты	191
4.3.3	Эксплуатационные затраты	192
4.3.4	Затраты на диагностирование	192
4.4	МЕТОД И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	193
4.4.1	Порядок расчёта чистой приведённой стоимости проекта	193

4.4.2	Помесячный расчёт коэффициента дисконтирования	193
4.4.3	Расчёт пробега локомотива	196
4.4.4	Порядок определения затрат	196
4.4.5	Порядок определения эффектов	197
4.4.6	Расчёт продолжительности обслуживания	197
4.4.7	Методика моделирования эффективности систем диагностирования	198
4.5	МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	201
4.5.1	Бортовые системы диагностирования локомотивов	201
4.5.2	Бортовые системы учёта расхода топлива тепловозов	205
4.5.3	Станции реостатных испытаний	206
4.5.4	Вибродиагностирование колёсно-моторных блоков	209
4.5.5	Станции испытания тяговых электродвигателей	210
4.5.6	Диагностирование состояния профиля бандажей колёсных пар	212
4.5.7	Системы диагностирования отдельных видов оборудования	213
4.6	ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ	214
4.7	ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 4	218
5	РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ВЫДАЧИ ЛОКОМОТИВОВ ПОСЛЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ	219
5.1	ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ	219
5.2	ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ	224
5.3	ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ	232
5.4	АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК	238
5.5	ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 5	242
6	РАЗРАБОТКА КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЛОКОМОТИВОВ	243
6.1	ВНЕШНЯЯ ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЛОКОМОТИВА	243
6.1.1	Киберфизические производственные системы и интероперабельность	243

6.1.2 Внешняя интероперабельность системы управления жизненным циклом локомотив	245
6.1.3 Информация этапа проектирования	246
6.1.4 Информация локомотивостроительных заводов	247
6.1.5 Информация этапа эксплуатации локомотивов	248
6.1.6 Информация локомотивного хозяйства	250
6.1.7 Информация сервисных компаний и локомотиворемонтных заводов	252
6.1.8 Информация локомотиворемонтных заводов	253
6.1.9 Схема взаимодействия информационных систем	254
6.1.10 Результаты анализ внешней интероперабельности	257
6.2 МЕТОДЫ ЧЕТВЁРТОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ РЕВОЛЮЦИИ	258
6.2.1 Аппаратно-программные платформы	258
6.2.2 Искусственный интеллект	262
6.2.3 Интернет вещей	262
6.2.4 Компьютерное зрение	263
6.2.5 Дополненная реальность	264
6.2.6 Автоматизированная система идентификации оборудования	265
6.2.7 Дистанционные средства связи	266
6.2.8 Контроль дислокации работников	266
6.2.9 Аддитивное производство	266
6.2.10 Дроны (квадрокоптеры).	267
6.2.11 Голосовой помощник	267
6.2.12 Результаты анализа применимости методов четвертой промышленной революции	268
6.3 ЦИФРОВОЕ SMART-ПРОИЗВОДСТВО	269
6.4 КИБЕРФИЗИЧЕСКАЯ РЕМОНТНАЯ ПОЗИЦИЯ	273
6.5 ВНУТРЕННЯЯ ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТЬ	277

6.6	МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ	279
6.6.1	Системы управления качеством продукции	279
6.6.2	Toyota Production System & Lean Production	284
6.6.3	Пирамида Гейнриха	286
6.6.4	Стандарт сервисного обслуживания электронных систем	288
6.6.5	Результаты анализ принципов управления производством	289
6.7	КИБЕРФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЛОКОМОТИВА	290
6.8	ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 6	303
7	ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ	304
7.1	СЕРВИСНОЕ ЛОКОМОТИВНОЕ ДЕПО «БРАТСКОЕ»	304
7.2	МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ	309
7.2.1	Методика построения цифрового локомотивного депо	309
7.2.2	Реконструкция сервисного локомотивного депо «Братское»	314
7.2.3	Эксплуатация нового депо	318
7.3	ЭФФЕКТЫ ОТ ВНЕДРЕНИЯ МОДЕЛИ В ДЕПО	320
7.4	ПЕРСПЕКТИВЫ ТИРАЖИРОВАНИЯ ОПЫТА	324
7.5	ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 7	326
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	327
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	331
	ЛИТЕРАТУРА	337
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. Справка о внедрении от АО "Трансмашхолдинг"	375
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Справка о внедрении от ООО "ЛокоТех"	377

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Согласно Указу Президента РФ от 7.05.2018 № 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 т.ч. 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. Мозгалеvский [188, 189], П. П. Пархоменко [131], В. В. Карибский [131], Е. С. Согомонян [131]. Основные положения их трудов доведены до уровня национальных стандартов [52]. 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 [125, 126, 240, 334], В. Д. Кузьмич [149], В. М. Бочаров [20, 190], А. П. Буйносов [21 - 24], А. А. Воробьев [35, 36, 45, 48, 49], А. В. Воротилкин [37], А. Т. Головатый [41, 42], А. Н. Головаш [43, 190], А. В. Горский [46 - 48], В. В. Грачёв [89 - 91], Ю. А. Давыдов [95 - 98], В. Н. Игин [116], А. М. Замышляев [114], Ю. М. Иньков [123, 124], С. И. Ким [134], Д. Л. Киржнер [207], В. И. Киселев [135, 136], А. С. Космодамианский [145, 146], В. С. Коссов [147], С. М. Кузнецов [20], И. К. Лакин [154 - 168], А. Г. Ламкин, К. В. Липа [172 - 174], М. Л. Михальчук [185], В. В. Молчанов [199], А. Т. Осяев [203, 204], А. В. Плакс [216], С. В. Покровский [219], Ю. И. Попов, О. Е. Пудовиков [233, 234], А. Д. Пузанков [230, 231, 232, 363], В. Н. Пустовой [172], В. В. Семченко [184, 301, 302], В. Т. Стрельников [334], Э. Д. Тартаковский [337, 338, 339], М. Д. Федотов [207, 349], В. П. Феоктистов [123, 124], В. Т. Черемисин [362], В. А. Четвергов [363], Н. Г. Шабалин [123, 124, 366, 367, 368], С. Г. Шантаренко [369] и многие другие. Развитие теории и практики построения современной системы ТОиР локомотивов нашло место в научно-практических трудах молодых учёных А. А. Аболмасова [1], И. И. Лакина [152], И. В. Пустового [235], И. Ю. Хромова [356], В. А. Мельникова [180]. Теорию и практику управления жизненным циклом локомотивов развивают лидеры локомотивостроения: General Electric, Siemens, Bombardier, Alstom, Трансмашхолдинг, Синара и др. [171 - 173, 384, 394]. Научные школы созданы во ВНИИЖТ, ВЭЛНИИ, ВНИКТИ, НИИТКД, ПКБ ЦТ, ДЦВ Красноярской ж.д., ДВГУПС, ИрГУПС, ОмГУПС, ПГУПС, СамГУПС, РГУПС, РУТ.

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 мировых и отечественных опыта и тенденций развития систем управления жизненным циклом локомотивов, их систем технического обслуживания и ремонтов и 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 согласно стандартам показателям надёжности оборудования локомотивов;
- 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 использованы методы «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) [262], МНПК «Эксплуатационная надежность подвижного состава» (НИИТКД, г. Омск, 2013), МНПК «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты» (ПГУПС, Санкт-Петербург, 2015, 2019, 2020) [266, 275, 292, 293], 3-я МНПК «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава» (ОмГУПС, г. Омск, 2015) [156], 1-я, 2-я и 3-я МНПК «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов» (МИИТ, ЛокоТех, г. Москва, 2014, 2015, 2018) [168, 268, 272, 274]; 10-я МНПК «Транспортная инфраструктура сибирского

региона» (ИрГУПС, г. Иркутск, 2019) [282], МНПК «Инновационные технологии развития транспортной отрасли» (ДВГУПС, г. Хабаровск, 2019) [393], ВНПК, посвящённая 125-летию железнодорожного образования в Сибири (КРИЖТ ИрГУПС, г. Красноярск, 2019) [281], МНПК «Эксплуатация и техническое обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава» (ДЦВ Красноярской ж.д., КРИЖТ, г. Красноярск, 2020) [291, 296, 297], 4-я МНПК «Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта» (ОмГУПС, г. Омск, 2020) [294, 295], 24-я ВНПК «Инновационные технологии на железнодорожном транспорте» (КРИЖТ ИрГУПС, г. Красноярск, 2020) [167, 281].

Диссертация доложена и одобрена на заседании кафедр «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.

Публикации. Основные положения диссертации и полученные результаты опубликованы в 65-и научных работах, из них 12 статей в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК, 4 патента, 18 свидетельств на программное обеспечение, 29 статей в отраслевых журналах и трудах конференций, 2 монографии, одна из которых без соавторов [300]. Всего имеется 82 публикации.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи разделов, заключения, списка использованных сокращений, списка использованных источников и литературы из 401 источника, приложения с двумя справками о внедрении результатов исследований, содержит 380 страниц основного текста, включая 60 таблиц и 128 рисунков.

Соответствие диссертации паспорту специальности ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации 05.22.07 – «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: исследование соответствует

формуле специальности – направлено на разработку проблем качества подвижного состава, ремонта и технического обслуживания. Объектами являются локомотивы, технологии ремонта и технического обслуживания. Соответствует следующим разделам области исследования специальности:

п.1: *Эксплуатационные характеристики и параметры подвижного состава, повышение их эксплуатационной надежности и работоспособности.* Системы электроснабжения железных дорог и метрополитенов. Методы и средства снижения потерь электроэнергии.

п.2: *Системы технического обслуживания, эксплуатации и технологии ремонта устройств электроснабжения и подвижного состава, развитие парков локомотивов и вагонов.*

п.3: *Техническая диагностика подвижного состава и систем электроснабжения. Критерии оценки состояния подвижного состава и систем электроснабжения железных дорог и метрополитенов. Системы автоматизации процессов технической диагностики этих объектов.*

В первом разделе на основании задач, стоящих перед отечественным железнодорожным транспортом, мировых и отечественных тенденций развития железнодорожного транспорта обоснована и сформулирована задача исследования. Через литературный обзор показано, что есть мировая тенденция использования в качестве автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) микропроцессорных систем управления (МСУ) современных локомотивов в системе ТОиР при их эксплуатации с использованием элементов технологии ремонта по фактическому состоянию в системе планово-предупредительного технического обслуживания и ремонта (ТОиР) [368]. При этом остаются и деповские системы диагностирования, испытаний и настройки оборудования. Показан отечественный положительный опыт. В результате обоснованы и сформулированы задачи исследования.

Во втором разделе на основании статистического анализа надёжности и условий эксплуатации отечественных локомотивов определена степень влияния ТОиР и АСТД на эффективность эксплуатации локомотивов. Предложен метод оценки эффективности эксплуатации локомотивов через коэффициент полезной

работы. По большой репрезентативной выборке данных об эксплуатации основных серий локомотивов выполнен комплексный статистический анализ, для чего разработано специальное программное обеспечение на алгоритмическом языке Visual BASIC for Applications (VBA) в среде Microsoft (MS) Excel. Рассчитан эффект, который может дать повышение эффективности системы ТОиР и средств технического диагностирования. Показано, какой эффект стоит ожидать от применения АСТД при выполнении ТОиР. Определена математическая взаимосвязь показателей надёжности согласно стандартам и принятым в ОАО «РЖД» категориям отказов.

В третьем разделе выполнен анализ функциональности современных систем технического диагностирования с позиций теории познания, цифровых технологий, теории автоматического управления и теории информационных систем. Обоснован подход к диагностированию через создание АСТД. Предложен метод анализа информационной эффективности АСТД как отношение информативности АСТД к информационной энтропии объекта диагностирования. В основу метода положена формула Шеннона, доработанная под решаемые задачи: наряду с вероятностью возникновения отказов в формуле учтена стоимость восстановления работоспособности локомотива. На основании разработанного метода выполнен расчёт информационной эффективности АСТД различных видов оборудования. Доказано, что современные бортовые АСТД на базе МСУ не позволяют в полном объёме отказаться от деповских АСТД и перейти на предиктивный ремонт.

В четвёртом разделе выполнен технико-экономический анализ практической целесообразности (эффективности) применения АСТД в системе ТОиР при управлении жизненным циклом локомотивов. Показано, что целесообразность практического применения АСТД требует отдельного доказательства, т.к. в целом задача оснащения локомотивных депо всеми видами АСТД экономически убыточна. Разработан метод технико-экономического обоснования (ТЭО) необходимости различных видов АСТД. На алгоритмическом языке VBA разработано программное обеспечение для имитационного моделирования эксплуатации и ТОиР локомотивов с использованием АСТД с целью определения дисконтированного срока их окупаемости по показателю Net Present Value «Чистая

приведенная к текущему дню стоимость проекта». Выполнено моделирование для основных видов АСТД. Определён необходимый набор СТД.

В пятом разделе предложен метод прогнозирования времени окончания ТОиР и передачи локомотива в эксплуатацию, что становится актуальным при переходе на систему индивидуального планирования объёма ремонта каждой секции локомотива по данным АСТД. Показано, что при комплексном использовании АСТД в процессе ТОиР момент готовности локомотива к эксплуатации становится неопределённым, что затрудняет планирование тяговых ресурсов для процесса перевозок. Предложен метод прогнозирования времени выдачи локомотива после ТОиР. Разработана имитационная вероятностно-статистическая модель технологических процессов ТОиР для условий сервисного ремонтного локомотивного депо, когда по данным комплекса АСТД составляется индивидуальный сетевой график ремонта каждой секции локомотива и имитационным моделированием определяется вероятность окончания ремонта для ожидаемых периодов времени. Модель испытана в MS Excel с VBA.

В шестом разделе по результатам выполненных исследований описана модель управления жизненным циклом локомотивов (ЖЦЛ) с использованием современных методов технического диагностирования как киберфизическая производственная система. Выполнен анализ применимости в условиях ремонтного депо основных технологий «Индустрия 4.0», методов системы менеджмента качества и бережливого производства (Toyota Production System & Lean Production), стандарта сервисного обслуживания ITIL/ITSM и других современных методов управления производственными процессами. Определен порядок взаимодействия по принципу интероперабельности АСУ железнодорожного транспорта (АСУЖТ), АСУ локомотивостроительных и локомотиворемонтных заводов, АСУ системы сервисного ТОиР. Предложена технология «Универсальная ремонтная позиция».

В седьмом разделе предложена методика практической реализации научно обоснованной в диссертации модели ЖЦЛ с комплексным использованием АСТД, соответствующих технических и технологических решений на примере электровазов переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями производства НЭВЗ (г. Новочеркасск), обслуживаемых в сервисном локомотивном депо (СЛД) «Братское» группы компаний «ЛокоТех»,

расположенного на станции «Вихоревка» Восточно-Сибирской железной дороги ОАО «РЖД». В депо произведена комплексная реконструкция, созданы универсальные ремонтные позиции, в которых на основе механизации, информатизации, цифровизации и комплексного диагностирования реализована интероперабельная технология «Цифровое депо».

В Заключение сформулированы полученные в результате научно-практических исследований выводы и предложения по дальнейшим работам.

В разделе «Литература» приведен список использованных литературных источников, на все из которых в тексте диссертации есть ссылки.

В приложении А приведены сканы двух справок о внедрении результатов исследований от АО «Трансмашхолдинг» и ООО «ЛокоТех».

Встречающиеся в тексте диссертации названия оборудования, изделий, фирм и являются зарегистрированными товарными знаками соответствующих компаний.

1 АНАЛИЗ ОПЫТА РАБОТЫ ЛОКОМОТИВОРЕМОНТНОГО КОМПЛЕКСА

1.1 ОСНОВНЫЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ТЕРМИНЫ И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Используемые в тексте диссертации специфические термины соответствуют принятым в основополагающих документах железнодорожного транспорта и отечественной промышленности [19, 25, 41, 42 – 88, 124, 125, 188, 226, 240, 344, 374 – 379]. В случае необходимости даётся пояснение используемым терминам. Далее оговорены основные из них.

Жизненный цикл определён национальными стандартами [73, 83, 85, 86] как «совокупность явлений и процессов, повторяющаяся с периодичностью, определяемой временем существования типовой конструкции изделия от её замысла до утилизации или конкретного экземпляра изделия от момента завершения его производства до утилизации» [83, 85, 201, 208]. Жизненный цикл железнодорожного подвижного состава определён в ГОСТ 31539-2012 [73] как «совокупность взаимосвязанных, последовательно осуществляемых процессов установления требований к потребительским свойствам и техническим параметрам железнодорожного подвижного состава, а также процессов его создания, применения и утилизации». В диссертации не рассматриваются этапы разработки, изготовления и утилизации локомотива: применительно к области решаемых задач под жизненным циклом локомотива (ЖЦЛ) будет пониматься этап его «применения по назначению» «в перевозочном процессе, выполнении технического обслуживания и ремонта (ТОиР) с поддержанием и восстановлением его качества, содержании в запасе или в ожидании работы» [82], которое этим же стандартам определено как «**эксплуатация**». Таким образом, в диссертации рассматривается этап эксплуатации жизненного цикла локомотива.

Как следует из принятых определений, «техническое обслуживание и ремонт» (ТОиР) – это один из элементов жизненного цикла на этапе эксплуатации локомотива. При этом согласно ГОСТ 18322-78 [51] техническое обслуживание – это «комплекс операций по поддержанию работоспособности изделия при использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировании». А ремонт – это «комплекс операций по восстановлению исправности или

работоспособности изделий и восстановлению ресурсов изделий или их составных частей». На практике разделить операции технического обслуживания от операций ремонта достаточно сложно. Например, на ремонте объёма ТР-1 более половины работ звучит как «осмотреть, в случае необходимости отремонтировать» (протереть, смазать и др.). Поэтому далее по тексту будет использоваться обобщённое понятие ТОиР как совокупность понятий «Техническое обслуживание» и «Ремонт». Система ТОиР – это «совокупность взаимосвязанных средств, документации ТОиР и исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления качества изделий, входящих в эту систему». Из приведённых определений следует что понятие ТОиР является наряду с полезной работой основным элементом жизненного цикла локомотива (ЖЦЛ) на этапе его использования. Поэтому в работе из всех элементов ЖЦЛ особое внимание будет уделяться ТОиР.

Стоимость жизненного цикла локомотива понимается как «суммарные финансовые затраты на осуществление стадии применения жизненного цикла единицы железнодорожного подвижного состава», что в стандарте трактуется как «значимый элемент стоимости жизненного цикла». В диссертации под стоимостью жизненного цикла понимается стоимость ТОиР. Под **управлением стоимостью жизненного цикла** локомотива согласно стандарту будет пониматься «выработка и осуществление мер, направленных на изменение стоимости жизненного цикла путем оптимизации договорных условий его поставки, совершенствования системы эксплуатации, определения целесообразных сроков его модернизации и списания».

Диагностирование в диссертации понимается согласно ГОСТ 20911-89 [52] как решение одной из следующих задач: контроль технического состояния, поиск места и определение причин отказа (неисправности), прогнозирование технического состояния. **Система технического диагностирования (СТД)** понимается как «совокупность средств, объекта и исполнителей, необходимая для проведения диагностирования (контроля) по правилам, установленным в технической документации» [75]. СТД и автоматизированная СТД (АСТД) наряду с понятиями ЖЦЛ, ТОиР и АСУ являются в диссертации базовыми. В диссертации используются понятия **встроенная, бортовая, деповская СТД и АСТД**, которые в

ряде случаев отличаются от принятых в стандарте. Точное определение этих интуитивно понятных терминов дано в подразделе 3.1.2 диссертации.

Модель жизненного цикла – целевое понятие в диссертации, разработка которой является целью научного исследования. В самом общем виде **модель** – это «абстрактное представление реальности в какой-либо форме (например, в математической, физической, символической, графической или дескриптивной), предназначенное для представления определённых аспектов этой реальности и позволяющее получить ответы на изучаемые вопросы» [187]. В диссертации используется функциональная технологическая модель жизненного цикла локомотива, предназначенная для изучения особенностей работы системы. Функциональные модели могут быть представлены в виде схем, графов, блок-схем, текстовым описанием. Именно так и будет описана разработанная модель.

Таким образом, все основные понятия поставленной в диссертации цели разработки модели управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования определены и далее используются только в описанном значении.

В тексте используются сокращения, расшифровка которых приведена в конце диссертации в списке использованных сокращений. Также расшифровка сокращений даётся при первом их использовании в тексте или после долгого его неиспользования. При этом учтено, что большое число сокращений затрудняет восприятие текста. Поэтому число сокращений минимизировано и оставлены только следующие наиболее часто используемые сокращения АСТД, АСУ, ЖЦЛ, МСУ, ТОиР.

1.2 ДОЛГОСРОЧНАЯ ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ ОАО «РЖД»

1.2.1 *Промышленная и социальная роль железных дорог*

Развитие железнодорожного транспорта изначально неразрывно связано с развитием промышленности [29, 30, 228, 238, 353]. Первым этапом следует считать промышленную революцию в Англии, начавшуюся с изобретения Эдмундом Картрайтом механического ткацкого станка, повысившего производительность труда в 40 раз. Последовавшая концентрация производства для эффективного использования парового привода станков потребовала больших объёмов перевозки угля из Стоктон-он-Тиса и хлопка из Ливерпуля в Дарлингтон (с 1825 г.) и Манчестер (с 1830 г.), что привело к строительству в Англии Джорджем Стефенсоном первых железных дорог на паровой тяге. Именно их коммерческий успех предопределил настоящий «бум» в строительстве железных дорог в мире.

Наряду с промышленным железные дороги имели и социальное значение. Общеизвестный факт, что США стали единым государством «де факто» только после строительства «Трансконтинентальной Железной дороги» в 1860-х годах. Строительство железных дорог в России во многом предопределило экономическое развитие страны во второй половине 19 века, удешевило товарообмен, расширило зоны распространения товаров, повысило специализацию и кооперацию производства. По настоящему единым государством Россия стала после завершения строительства Транссибирской магистрали в конце XIX – начале XX века.

И в дальнейшем железные дороги были в центре исторических событий в России. Поражения в Крымской (1854) и Японской (1905) войнах в значительной степени объяснены неготовностью железных дорог перевозить грузы и войска. Гражданская война (1918 – 1920 гг.) началась именно на железной дороге. Вклад железных дорог в победу в Великой отечественной войне трудно переоценить. Блокадный Ленинград смог выжить во многом благодаря «Дороге победы». Многие города стали центрами промышленности именно благодаря наличию железной дороги, и, наоборот, бывшие центры (Енисейск, Томск, Каинск) перестали быть таковыми.

Таким образом, развитие отечественных железных дорог в России неразрывно связано с макроэкономическим и социальным развитием России [108].

1.2.2 Современное положение железных дорог в России

В ОАО «РЖД» 19.03.2019 утверждена Долгосрочная программа развития компании до 2025 года (ДПР) [108, 265, 271], в которой на основании сравнения показателей отечественных железных дорог с железными дорогами ведущих железнодорожных держав предлагаются показатели, которых надо достичь до 2025 года. Железные дороги России занимают достойное место в ряду ведущих железнодорожных держав: США, Китай, Индия, Япония, Франция, Германия, Канада и др. По дальности перевозок РФ существенно превосходит другие страны (более 1917 км; у США – 1568 км, у Китая – 886 км). При этом участковая скорость одна из самых высоких в мире – 40,7 км/ч (США – 41,2 км/ч). А стоимость перевозок за 1000 т·км – одна из самых низких: \$147 (Франция: \$562, Германия: \$461, Китай: \$250, США: \$246). Рентабельность по EBITDA (Earnings before interest, taxes, depreciation and amortization) также на высоком уровне – 27 % (США: до 42 %, Европа: 18 %, ЮАР: 42 %, Индия: 9 %) [108, 265, 271].

По отправке пассажиров безусловными лидерами являются Индия (8,8 млрд в год), на втором месте Германия (2 млрд), на третьем – Китай (1,6 млрд), Россия на пятом месте (1 млрд). По показателю млрд пасс.-км РФ сильно уступает Китаю (1 258) и Индии (1 159), у России – 125. По совокупным показателям обслуживания пассажиров Россия уступает Франции, Германии и Индии по причине отставания в высокоскоростном движении. Сейчас в РФ железные дороги осуществляют 24,7 % перевозок пассажиров (52 % - воздушный, автомобильный – 23,2 %) [108, 265, 271].

По грузовым перевозкам Россия находится на сопоставимом с США и Китаем уровне. По числу грузовых вагонов (1 млн) Россия уступает только США (1,6 млн). Грузооборот составляет 45 % от общего в России (трубопроводный – 47,8%, автомобильный – 4,6 %). В общем доходе ОАО «РЖД» (1698 млрд руб.) грузовые перевозки составляют 88 % (1494 млрд руб.) [108, 265, 271].

Запланировано существенно повысить эффективность функционирования железнодорожного транспорта. Выручка с 2 370 млрд руб. в 2018 г. должна вырасти до 3937 млрд руб. в 2025 г. (+ 66 %). Прибыль – с 157 до 728 млрд руб. (+363 %). Рентабельность по EBITDA – с 18,7 % до 29,4 % (+57 %). Рентабельность по чистой прибыли – с 1,5 % до 8,8 % (+486 %). Погрузка грузов – с 1299 млн тонн в 2018 году до 1703,7 млн тонн в 2025 г. (+31 %). Грузооборот без учёта порожнего пробега – с

2595 до 3537 млрд т·км (+36 %). Инвестиции до 2025 г. составят 7553 млрд руб., из них по подвижному составу – 1213 млрд руб. [108, 265, 271].

1.2.3 Перспективное развитие железных дорог в России

В мировой промышленности (особенно в США) роль железных дорог признаётся очень важной, но как исторически проходящей. Большие расстояния, плохая развитость автомобильных дорог и большая доля добывающей промышленности оставляют ведущую роль железных дорог в России, поэтому предусматривается перспективное масштабное их развитие. Предусмотрено строительство Северо-Сибирской магистрали длиной 1892 км (Нижевартовск – Белый Яр – Усть-Илимск). Разрабатывается проект «Урал Промышленный – Урал Полярный» в 1200 км. Остаётся в планах давний проект железной дороги Крайнего Севера от Салехарда до порта Харасавей, а также от станции Лабытнанги до Норильска. Развивается на север Якутская железная дорога. Наряду с глобальными проектами предусмотрено строительство ряда рокадных железных дорог, в т.ч. в Кызыл (Тува), Сыктывкар и др. Строятся обходные пути вокруг крупных промышленных центров. На более далёкую перспективу в рамках проекта транспортной доступности регионов России рассматривается строительство железной дороги на Чукотку. Кроме внутренних магистралей обсуждается строительство и международных транспортных коридоров, в т.ч. в рамках проекта «Новый шёлковый путь».

Таким образом, роль железнодорожного транспорта России остаётся важной в развитии отечественной промышленности, поэтому предусмотрен опережающий рост экономических показателей железнодорожного транспорта по сравнению с техническими, обеспечить который можно за счёт повышения эффективности отрасли, в т.ч. локомотивного и локомотиворемонтного комплексов. Необходимо внедрение инновационных методов технического обслуживания и ремонта локомотивов (ТОиР) на этапе эксплуатации их жизненного цикла. В диссертации это предлагается сделать за счёт комплексного использования систем технического диагностирования в технологических процессах ТОиР жизненного цикла локомотивов.

1.3 ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЛОКОМОТИВНОГО ПАРКА

Восстановление локомотивного хозяйства за последние 10 – 12 лет позволило снизить износ локомотивного парка с 85 % до 66 % [108]. Необходимо дальнейшее повышение эффективности эксплуатации локомотивов.

Наряду с требованиями к тяговым характеристикам локомотива предъявляются высокие требования к его надёжности и системе сервисного обслуживания. Пробег между обслуживаниями на ПТОЛ (ТО-2) должен вырасти до 12 тыс. км. Число отказов на миллион километров пробега необходимо уменьшить до десяти с одновременным уменьшением себестоимости ТОиР. Один из главных показателей надёжности локомотива – «коэффициент готовности к эксплуатации» (КГЭ), который введён в контракте жизненного цикла вместо ранее использовавшегося показателя «коэффициент технической готовности» (КТГ) [106, 107, 142, 143, 271, 347], должен вырасти до 0,95 (95 %). В диссертации рассмотрены инновационные решения для достижения нового уровня качества и надёжности.

Стратегией научно-технологического развития холдинга «РЖД» [332, 333] среди приоритетов определены и требования к подвижному составу: повышение безопасности и надёжности, развитие мониторинга подвижного состава, повышение энергетической эффективности, инновационные телекоммуникационные решения, развитие систем управления качеством. Следует сократить стоимость жизненного цикла локомотива, повысить эксплуатационный коэффициент полезного действия, повысить энергоэффективность, снизить импортозависимость.

Важным направлением является повышение энергетической эффективности подвижного состава. Необходимо обновление парка грузовых локомотивов новыми, имеющими улучшенные тягово-энергетические характеристики, плавное регулирование, системы автоведения (УСАВП) [223], в т.ч. сдвоенных поездов с одной локомотивной бригадой.

Таким образом, развитие локомотивного и локомотиворемонтного комплексов является одним из основополагающих в развитии отечественного железнодорожного транспорта, в т.ч. в области технического обслуживания и

ремонта, диагностирования и управления жизненным циклом, снижения его стоимости.

Примечание: тенденции развития локомотивного комплекса соответствуют мировым тенденциям, в т.ч. методам управления качеством [127, 169, 351, 354, 400], что закреплено в концепции постоянного улучшения качества инновационной деятельности ОАО «РЖД» [139, 144, 195, 333, 352], а также в ряде отраслевых стандартов компании [312 – 331].

Особенностью отечественного локомотивного комплекса следует считать преобладание привода (колёсно-моторных блоков) на базе тяговых электродвигателей постоянного тока. Основными электровозами, получающими питание из контактной сети постоянного тока 3 кВ, являются электровозы серий ВЛ10, ВЛ11, ВЛ15 производства Новочеркасского электровозостроительного завода (НЭВЗ) и Тбилисского электровозостроительного завода (ТЭЗ) и ныне выпускаемые 2ЭС4К и 3ЭС4К производства НЭВЗ, а также 2ЭС6 производства завода «Уральские локомotiveы» (УЛ). Основным пассажирским парком электровозов остаются электровозы производства чешской компании «Skoda» (ЧС2К, ЧС7, ЧС200 и др.) и выпускаемые в настоящее время Коломенским заводом (КЗ) совместно с НЭВЗ электровозы серии ЭП2К. Все эти электровозы имеют «классическую» схему управления с тремя ходовыми позициями и реостатными неходовыми позициями, ослаблением поля ТЭД с групповым переключателем или с линейными аппаратами.

На железных дорогах, электрифицированных переменным током с напряжением в контактной сети 25 кВ, основными локомотивами являются электровозы производства НЭВЗ устаревших серий ВЛ80к, ВЛ80т и ВЛ80с и электровозы с выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП): ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ65, ЭП1, Э5К и выпускаемые в настоящее время 2ЭС5К, 3ЭС5К и 4ЭС5К. Уральскими локомотивами (УЛ) производится электровоз переменного тока 2ЭС7.

Альтернативой локомотивам переменного и постоянного тока с приводом постоянного тока стал за рубежом и становится в РЖД асинхронный привод: грузовые электровозы производства УЛ серии 2ЭС10 (разработан совместно с Siemens) и пассажирские электровозы НЭВЗ – ЭП10 (разработан НЭВЗ совместно с

Bombardier), ЭП20 (разработан совместно с Alstom). На базе ЭП20 разработан грузовой двухсекционный локомотив 2ЭС5, который, в свою очередь, существенно переработан в части импортозамещения и унификации в серию 2ЭС5С.

Среди магистральных грузовых тепловозов в строю остаются произведенные в СССР локомотивы серий 2ТЭ10, М62, 2М62, 2ТЭ116 и пришедшие им на смену тепловозы 2ТЭ116У (производство «Лугансктепловоз») и 2ТЭ25КМ, 3ТЭ25КМ, 3ТЭ25К2М производства Брянского машиностроительного завода (БМЗ) [170] с синхронным генератором и тяговым приводом постоянного тока с поосным регулированием силы тяги. Главными пассажирскими тепловозами являются серии ТЭП70, ТЭП70У и ТЭП70БС производства КЗ.

Значительную часть парка маневровых локомотивов составляют тепловозы серии ЧМЭЗ (производство ЧКД, Чехословакия) и отечественные тепловозы ТЭМ2, ТЭМ18 всех индексов (производство БМЗ) и ТЭМ7, ТЭМ9, ТЭМ14 всех индексов производства Людиновского тепловозостроительного завода (ЛднТЗ), где также выпускаются тепловозы с гидropередачей ТГМ4, ТГМ6, ТГМ23 и др.

В таблице 1.1 приведены сводные на 2020-й год данные об основных сериях локомотивов, эксплуатируемых на отечественных железных дорогах [198] (число выпущенных локомотивов взято по литературным источникам и может отличаться от реального в определённых пределах). У старых серий число эксплуатируемых локомотивов значительно ниже, чем выпущенных из-за их постепенного списания.

Таким образом, при построении Модели следует ориентироваться на эксплуатируемые в ОАО «РЖД» локомотивы (таблица 1.1), где: в/и всех индексов; н/в – по настоящее время; d.c./d.c. – привод постоянного тока от контактной сети постоянного тока или от генератора постоянного тока; а.с./d.c. – привод постоянного тока от контактной сети переменного тока или асинхронного генератора; d.c./a.c. – асинхронный привод от сети постоянного тока; а/d.c./a.c. – асинхронный привод от сети постоянного и переменного тока; гидро – гидropередача.

Таблица 1.1 – Основные серии локомотивов, эксплуатируемые ОАО «РЖД»

Серия	Завод	Привод	Годы выпуска	Выпущено секций
ВЛ10 в/и	НЭВЗ, ТЭЗ	d.c./d.c.	1961 – 1985	5764
ВЛ11 в/и	ТЭЗ	d.c./d.c.	1975 – 1996	2565
ВЛ15 в/и	ТЭЗ, НЭВЗ	d.c./d.c.	1984 -1989	100
2ЭС4К	НЭВЗ	d.c./d.c.	2006 - 2018	150
3ЭС4К	НЭВЗ	d.c./d.c.	2014 – н/в	72
2ЭС6	УЛ	d.c./d.c.	2007 – н/в	1009
2ЭС10	УЛ	d.c./a.c.	2011 – н/в	168
ВЛ80 в/и	НЭВЗ	a.c./d.c.	1961 - 1995	4886
ВЛ85	НЭВЗ	a.c./d.c.	1983 - 1994	270
2ЭС5К	НЭВЗ	a.c./d.c.	2005 – н/в	483
3ЭС5К	НЭВЗ	a.c./d.c.	2006 – н/в	1000
4ЭС5К	НЭВЗ	a.c./d.c.	2014 – н/в	22
2ТЭ10 в/и	ЛТЗ	d.c./d.c.	1960 - 1997	8228
М62	ЛТЗ	d.c./d.c.	1964 - 1976	917
2ТЭ116	ЛТЗ	a.c./d.c.	1971 - 2007	1723
2ТЭ116У	ЛТЗ	a.c./d.c.	2007 - 2016	340
2ТЭ116УД	ЛТЗ	a.c./d.c.	2012 - 015	59
2ТЭ25КМ	БМЗ	a.c./d.c.	2014 – н/в	467
3ТЭ25К2М	БМЗ	a.c./d.c.	2017 – н/в	12
ЧС все серии	Шкода	d.c./d.c.; a.c./d.c.	1957 - 2000	3102
ЭП2К	КЗ, НЭВЗ	d.c./d.c.	2006 – н/в	413
ЭП1 в/и	НЭВЗ	d.c./d.c.	1999 – н/в	1756
ЭП10	НЭВЗ	a/d.c./a.c.	1998 – 2006	12
ЭП20	НЭВЗ	a/d.c./a.c.	2010 – н/в	72
ТЭП70	КЗ	d.c./d.c.	1973 - 2006	576
ТЭП70 в/и	КЗ	a.c./d.c.	2002 – н/в	313
ТЭМ2 в/и	БМЗ	d.c./d.c.	1960 - 2000	8984
ТГМ23	ЛднТЗ	гидро	1962 – н/в	8800
ТГМ6	ЛднТЗ	гидро	1967 – н/в	3155
ТГМ4	ЛднТЗ	гидро	1971 – н/в	6500
ЧМЭЗ	ЧКД	d.c./d.c.	1963 - 1997	7457
ТЭМ7 в/и	ЛднТЗ	a.c./d.c.	1975 – н/в	849
ТЭМ18 в/и	БМЗ	a.c./d.c.	1992 – н/в	2100
ТЭМ14	ЛднТЗ		2011 – н/в	143

Все эксплуатируемые в ОАО «РЖД» локомотивы имеют планово-предупредительную систему технического обслуживания и ремонта (ТОиР). При приёмке локомотива локомотивной бригадой осуществляется обслуживание в объёме ТО-1. Периодически по времени (36 – 96 и более часов) производится обслуживание в объёме ТО-2 на специально оборудованных пунктах технического обслуживания – ПТОЛ. Обслуживание и ремонт в объёме ТО-3 (только у тепловозов), ТР-1 (текущий ремонт), ТР-2 и ТР-3 («подъёмка») осуществляются на базе ремонтных локомотивных депо по пробегу локомотива. Средний ремонт (СР, в более ранней литературе – капитальный ремонт объёма КР-1) проводится в специально подготовленных депо или на локомотиворемонтных заводах. Капитальный ремонт (КР, ранее – КР-2) – только на локомотиворемонтных, а последнее время и локомотивостроительных заводах. Значительное время занимает обточка колёсных пар (ТО-4).

Современные вновь выпускаемые локомотивы имеют аналогичную структуру ТОиР, но с увеличенными межремонтными пробегами. Особенно важен для эксплуатации увеличенный пробег между ТО-2, что существенно влияет на полезную работу локомотива (раздел 2). Также есть тенденция наименования ремонтов по пробегу до него (тыс. км): ТР-50 (ТР-1), ТР-300 (ТР-2) и др.

Таким образом, при разработке модели ТОиР в диссертации следует ориентироваться на планово-предупредительную систему ТОиР локомотивов и их оборудования.

Зарубежный и отечественный опыт применения бортовых АСТД рассмотрен в подразделе 1.6. Депоовских АСТД – в подразделе 1.7. Показано, что нет практики создания предиктивной системы ремонта без планово-предупредительных заходов на ТОиР в ремонтные локомотивные депо. Это касается и эксплуатации в ОАО «РЖД» дизелей производства General Electric (тепловозы серий 2ТЭ116УД и 3ТЭ25К2М), электропоездов «Сапсан» и «Ласточка» разработки Siemens. В диссертации последовательно доказана необходимость сохранения планово-предупредительной системы ТОиР даже после реализации комплексного использования АСТД.

1.4 СЕРВИСНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЛОКОМОТИВОВ

С 2001 года по решению коллегии МПС России [1, 235], выполняется «Комплексная программа реорганизации и развития отечественного локомотивостроения, организации ремонта и эксплуатации тягового подвижного состава»: происходит переход к функционально-территориальному принципу (вместо функционального) управления. Локомотивные депо с 2003 года разделены на эксплуатационные и ремонтные, в результате чего задача обеспечения надёжности локомотивов выделена в отдельную вертикаль управления.

Следующим этапом реформирования отечественного локомотиворемонтного комплекса стал переход на сервисный ТОиР, что соответствует мировым тенденциям [342, 350], когда сервисные компании заинтересованы сокращать расходы этапа эксплуатации жизненного цикла тягового подвижного состава. Обеспечивается нормативный уровень безопасности движения и надёжности. Повышается ответственность заводов-изготовителей оборудования за его техническое состояние [107, 142]. Примером могут служить мировые лидеры локомотивостроения, компании General Electric Transportation, Siemens Transportation Systems, Bombardier Transportation, Alstom Transport. Эти компании наряду с производством также выполняют сервисное обслуживание в десятках стран мира по контракту жизненного цикла [1, 152, 171 – 174, 393 – 401].

В ОАО «РЖД» согласно концепции «Развитие системы сервисного обслуживания и создание единого центра ответственности за техническое состояние локомотивов» [1, 107, 235] в 2014-м году произошёл переход на сервисную систему ТОиР локомотивов, для чего на конкурсной основе заключены на 40 лет договоры на выполнение ТОиР с сервисными локомотивными компаниями «СТМ-Сервис» и «ТМХ-Сервис» («ЛокоТех-Сервис» с 2018-го) [107, 298].

Сервисный принцип ТОиР существенно поменял экономическую мотивацию локомотиворемонтного комплекса. Вместо существовавшего до этого бюджетного способа финансирования ТОиР (оплачивался объём выполненных ремонтов) осуществлён переход на оплату по полезной работе локомотива: доход сервисных компаний согласно установленным тарифам (руб. за км/час) определяется у магистральных электровозов и тепловозов их полезным пробегом с корректировкой

тарифов в зависимости от соблюдения нормативов их надёжности. У маневровых тепловозов тариф установлен по часам их эксплуатации [107]. Нормативы фиксируются в контракте жизненного цикла (по международной терминологии – это SLA: Service Level Agreement). Сервисные компании осуществляют ТОиР локомотивов, самостоятельно и совместно с ОАО «РЖД» определяют политику технического развития ТОиР. Первые семь лет сервисного ТОиР показали его высокую эффективность, несмотря на многочисленные проблемы переходного периода. Поэтому выбранная стратегия перехода на сервисный ТОиР локомотивов сохранится.

Следует отметить важный экономический аспект, который в значительной мере определяет технические тенденции развития системы ТОиР: доход сервисных компаний определяется объёмом перевозок и пробегом локомотивов, который не зависит от сервисной компании. Поэтому прибыльность сервиса полностью определяется себестоимостью ТОиР, уменьшение которого возможно как за счёт повышения эффективности системы управления, так и за счёт развития методов и систем технического обеспечения ТОиР. Важным источником эффекта сервисных компаний является сокращение числа и продолжительности неплановых ремонтов с заходом в депо для восстановления работоспособности локомотивов после их отказа. Также большие потери имеют место из-за простоя на плановых ремонтах. Во втором разделе это будет доказано на основании обработки большого объёма статистических данных.

Таким образом, переход от бюджетной организации ТОиР внутри ОАО «РЖД» к сервисному аутсорсинговому обслуживанию локомотивов стимулировал переход от экстенсивных путей развития к интенсивным, привёл к необходимости поиска научно-технических инновационных решений.

1.5 КОНТРАКТ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Следующим этапом развития системы сервисного обслуживания локомотивов стал переход на контракт жизненного цикла (КЖЦ, Life Cycle Contract) [106, 107], который также отвечает мировым тенденциям в области сервисного обслуживания сложных систем. КЖЦ заключается на большой срок (более 20 лет) и согласно закону 44-ФЗ «является соглашением о разработке, изготовлении, поставке, обслуживании, ремонте и утилизации объекта закупки на финансовых условиях согласно договору» [142, 143].

КЖЦ активно развивается в зарубежной практике (Life Cycle Contract) [224]. Это, прежде всего, партнёрство государства и частных компаний. Ярким примером может служить проект организации высокоскоростного движения под проливом Ла-Манш. Финансирование проекта осуществляет министерство транспорта Великобритании, а весь жизненный цикл сопровождают частные компании. Аналогичным примером может служить строительство железных дорог в Нидерландах. На постсоветском пространстве по КЖЦ идёт поставка тепловозов производства компании GE Transportation [172, 224, 386], которая совместно с железными дорогами США перешла на КЖЦ.

Идеология КЖЦ находит место и в отечественном локомотивостроении [169, 305, 313]. Например, ОАО «РЖД» заключило с торговым представителем АО «Трансмашхолдинг» (ТМХ) – компанией ЗАО «Рослокомотив» контракты на поставку магистральных электровозов производства НЭВЗ (г. Новочеркасск), тепловозов производства БМЗ (г. Брянск) и пассажирских локомотивов производства КЗ (г. Коломна) с обязательством обеспечения их сервисного обслуживания (КЖЦ) до конца 2046 года. Аналогичные взаимоотношения с ОАО «РЖД» имеет завод «Уральские локомотивы». Оплата сервисных услуг идёт за километры полезного пробега локомотивов со штрафными санкциями за отказы (надёжность ниже установленного уровня).

Существенное отличие КЖЦ от обычных договоров на сервисное обслуживание – это более строгие требования SLA: при КЖЦ требуется полное соответствие требованиям Техническим условиям (ТУ) по надёжности. В КЖЦ предусматриваются соответствующие штрафы. Выполнение КЖЦ требует

улучшения конструкции, качества изготовления, создания новой системы технического обслуживания и ремонта локомотивов (ТОиР).

Московскому метрополитену в 2012 – 2017 гг. на условиях контракта жизненного цикла поставлены поезда метро серии «Ока», а в настоящее время поставляются поезда серии «Москва». Каждое сервисное депо имеет собственные взаимоотношения с Московским метрополитеном. Установлены штрафы за снятие поездов с линии более допустимого в КЖЦ числа раз в месяц.

По контракту жизненного цикла с компанией Siemens осуществляется ТОиР высокоскоростных электропоездов Сапсан на базе электродепо «Металлострой».

Таким образом, новая перспективная система ТОиР должна позволять управлять надёжностью локомотивов в рамках контракта жизненного цикла. Требуется разработка модели жизненного цикла локомотивов.

Сервисное обслуживание по КЖЦ у компаний «Рослокомотив» и «ТМХ» выполняет крупнейший в стране сервисных холдинг – группа компаний «ЛокоТех», в состав которого входит компания «ЛокоТех-Сервис», осуществляющая ТОиР в объёме ТО-2, ТО-3, ТО-4, ТР-1, ТР-2, ТР-3 и в отдельных случаях СР, и компания «Желдорреммаш», осуществляющая средний (СР) и капитальный (КР) ремонты на заводах в городах: Уссурийск, Улан-Удэ, Новосибирск, Оренбург, Воронеж, Ярославль и Ростов-на-Дону. В «ЛокоТех» входит 85 сервисных локомотивных депо, находящихся на территории Дальневосточной, Забайкальской, Восточно-Сибирской, Западно-Сибирской, Октябрьской, Северной, Московской, Приволжской, Юго-Восточной и Северо-Кавказской железных дорог. В депо более 40 тыс. сотрудников обслуживают более 16 тыс. секций локомотивов.

Таким образом, разрабатываемая модель жизненного цикла и новая перспективная система ТОиР должны соответствовать особенностям построения взаимоотношений ОАО «РЖД», локомотивостроительных заводов, локомотиво-ремонтного комплекса и сервисных компаний, организующих работу сервисных локомотивных депо согласно контрактам жизненного цикла локомотивов.

1.6 КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ТРАНСПОРТЕ

Кибернетика как наука об управлении («об общих закономерностях процессов управления и передачи информации в машинах живых организмах и обществе» [198]), основанная Норбертом Винером [31, 32], определяет главным условием устойчивости любой кибернетической системы – наличие обратных связей. В настоящее время чаще употребляют термин «Автоматизированные системы управления» (АСУ), который и используется далее в тексте. Применительно к производственным системам Эдвардс Деминг определил принцип построения АСУ как цикл PDCA (Plan-Do-Check-Act) [15, 101, 177, 181]: планирование – осуществление – проверка – претворение в жизнь.

В настоящее время принято выделять три пройденных этапа развития АСУ [109, 228], соответствующие трём прошедшим промышленным революциям: внедрение на предприятиях паровых машин [38, 238], внедрение электрического привода [27, 236], внедрение электроники [218]. Современный этап развития АСУ, согласно введённой в Германии терминологии, называют «Четвёртой промышленной революцией» («Индустрия 4.0»): эпоха паровых машин (18 – 19 века), электротехники (19 – 20 века), от отдельных вычислительных машин и станков с ЧПУ (20 в.) [278, 288] до Киберфизических производственных систем (Cyber-Physical Production Systems, CPPS, 21-й в.), включающих современные цифровые технологии: мобильные устройства, «Интернет вещей» (интеллектуальные датчики), технологии определения местонахождения, интерфейсы работы с АСУ, Аутентификация инцидентов, 3D-печать, анализ больших данных (big data), дополненная реальность, облачные сервисы, блокчейн и др. [278].

Этапы развития локомотивной автоматики соответствуют этапам развития АСУ (рисунок 1.1), а АСУ железнодорожного транспорта – «Цифровая железная дорога» – является киберфизической (рисунок 1.2).

Таким образом, АСУ ТОиР следует рассматривать как киберфизическую промышленную систему ремонтного локомотивного депо, включающую в себя все элементы информационных технологий, а также взаимодействующую с АСУ верхнего, нижнего и смежного уровней, что рассмотрено в разделе 6.



Паровозы с 1825 г.
Механические и паровые
системы автоматики и
защиты
(золотники, клапаны и др.)



Электровозы: конец XIX в.
ВЛ22 – с 1938 г.
Электрические автоматические
защиты от токов к.з. и др.



Электровоз ВЛ80р, 1974 г.
Один из первых в мире
электровоз с электронной
системой управления с
логическими защитами
(БУВИП, диоды,
транзисторы, микросхемы)



Электровоз ВЛ85, 1983 г.
Первый отечественный
локомотив с автоматической
системой управления
(БУВИП + БАУ:
операционные усилители)

Электровоз ЭП1, 1998 г.
Первый отечественный
локомотив с
микропроцессорной
системой управления
(МСУ)



Электровоз ЭС5К,
2004 г.
Самый массовый
электровоз с МСУ



Электровоз ЭС5,
2012 г.
(аналог ЭП20).
Асинхронный привод



Сапсан, 2009 г.
Самый «цифровой» в
России и мире
электропоезд (ICE)
Асинхронный привод



Рисунок 1.1 – Развитие автоматики в системах управления локомотивов



Разработка и внедрение проекта интеллектуальной системы управления и автоматизации производственных процессов ОАО «РЖД» «Цифровая железная дорога» являются инновационным направлением развития железнодорожного транспорта [111, 137, 138, 359], очередным этапом развития АСУ железнодорожного транспорта – АСУЖТ [215]. Цифровые технологии меняют традиционные модели ведения бизнеса и управления техническими системами. Современный этап развития АСУ характеризуется широкой интеграцией отдельных информационных систем в единую систему управления по технологии киберфизических производственных систем CPPS и «Индустрия 4.0» (разделы 5 и 6). Основными предпосылками реализации технологии CPPS на отечественном железнодорожном транспорте являются следующие.

- 1 **АСУЖТ.** В ОАО «РЖД» развивается комплекс информационных технологий, объединённых общим названием АСУЖТ [215]. В настоящее время автоматизированы все основные функции управления железнодорожным транспортом: управление финансовой и экономической деятельностью (ЕК АСУФР на базе пакета программ SAP R/3 [196, 298]), управление трудовыми ресурсами и заработной платой (ЕК АСУТР), АСУ хозяйств, в т.ч. локомотивного (АСУТ). Создана система автоматической идентификации подвижного состава САИПС на базе RFID-меток. Отдельно следует выделить системы взаимодействия с клиентами РЖД: формирование транспортных накладных «ЭТРАН» (грузовое движение) и продажа билетов «Экспресс» (пассажирское движение). В настоящее время идёт интеграция всех перечисленных и других (сейчас их более 300) в единую АСУ.
- 2 **АСУ управления движением поездов и манёврами на станции.** Развивается диспетчерский контроль (ДК) и диспетчерская централизация (ДЦ) с дистанционным формированием маршрутов движения поездов, управление сортировочными станциями (АСУ СС) и процессами перевозок (АСОУП, ГИД «Урал», Эльбрус, ИСУЖТ и др.), включая управление тяговым подвижным составом. Развиваются технологии дистанционного управления маневровыми локомотивами, беспилотного самоходного подвижного состава, пилот-проект которого реализуется на серии ТЭМ7А. Развиваются системы маневровой автоматической локомотивной сигнализации (МАЛС). Отдельно развиваются

цифровые системы технологической радиосвязи, в т.ч. по стандарту GSM-R, DMR, IP/MPLS. Приоритетным остаётся развитие бортовых систем безопасности КЛУБ-У [239], САУТ-ЦМ и объединяющий их БЛОК [243].

- 3 **МСУ.** Важное направление цифровизации – развитие автоматизированных технологий управления приводом тягового подвижного состава с одновременным диагностированием технического состояния микропроцессорными системами управления (МСУ) и датчиками параметров оборудования, токов и напряжений, температуры, давления и др. Это направление развития получило название «Умный локомотив» («Цифровой локомотив», «Smart-локомотив»), которое является частью проекта Цифровой железной дороги и включает в себя внедрение бортовых систем диагностирования, автоведения, дистанционного управления локомотивами.
- 4 **АСТД.** Имеется тренд применения автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) [271], позволяющие не только инкапсулировать сложные математические алгоритмы определения технического состояния локомотивов, но имеют возможность передавать результаты диагностирования в АСУ ТООР.
- 5 **Бортовые АСТД.** С появлением на борту локомотива МСУ широкое применение находят бортовые АСТД. Их роль на столько велика, что опыт их применения рассмотрен отдельно в подразделе 1.7.
- 6 **Цифровая железная дорога.** Появление МСУ на борту локомотива с возможностью обмена данными с диспетчерским центром или центром управления перевозками с одной стороны и развитие АСУЖТ с другой стороны позволяют перейти к созданию киберфизических систем на железнодорожном транспорте вплоть до отказа или существенного сокращения функций диспетчера и машиниста.
- 7 **Цифровое депо.** Аналогично внедрению киберфизических технологий на железной дороге в целом развиваются эти технологии в эксплуатационных и ремонтных локомотивных депо.

Таким образом, система управления жизненным циклом локомотивов должна строиться как киберфизическая производственная система с использованием современных технологий.

1.7 ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ БОРТОВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

1.7.1 *Опыт управления жизненным циклом тепловозов General Electric*

Компанией General Electric Transportation (GE) на территории локомотивостроительного завода (г. Эри, США) в 1998 году создан и постоянно развивается Сервисный ситуационный центр дистанционного мониторинга и диагностирования тепловозов (Remote Monitoring and Diagnostics Service Center – далее по тексту «Центр»), выпускаемых на заводе [171, 172, 384, 386]. Главную работу в Центре выполняет группа диспетчеров из 4 – 6 человек в смену, контролирующая эксплуатацию более 20 тыс. секций тепловозов по поступающим с борта локомотива диагностическим данным. Задача диспетчеров – принятие решения о порядке восстановления работоспособности локомотива при поступлении с него тревожных сообщений (инцидентах). Для принятия решений используется центральный сервер, принимающий, обрабатывающий и хранящий информацию с локомотивов. На сервере также хранятся типовые протоколы действий, формируемые автоматически. Система постоянно развивается группой программистов и технологов по мере накопления опыта диагностирования и восстановления работоспособности [386].

У каждого диспетчера имеется собственное рабочее место, на которое поступает очередная информация об инциденте (нестандартной ситуации). Специализации диспетчеров нет. Кроме индивидуальных рабочих мест есть несколько экранов общего пользования, на которые выводится вспомогательная информация, вплоть до прогнозов погоды.

Следует отметить, что локомотивы, подлежащие мониторингу, являются достаточно однотипными общей линии Evolution с типовыми дизель-генераторными установками (ДГУ) GEVO12 [385], что упрощает их мониторинг. Выпускаемые в Казахстане тепловозы для национальной железнодорожной компании «Казахстан темир жолы» (КТЖ) серии ТЭ33А аналогичны другим тепловозам производства GE [224, 384]. Особенности создания ситуационного центра мониторинга для отечественных железных дорог описан в подраздел 1.3: несколько заводов производителей, магистральные и маневровые тепловозы,

электровозы постоянного и переменного тока, отсутствие унификации различных серий даже одного завода-производителя: возможно создание нескольких центров.

Управление локомотивами GE осуществляется через микропроцессорную систему Locotrol (рисунок 1.3), позволяющую управлять распределенной силой тяги и торможением поездов по радиоканалу [384, 391, 393]. Установлена на более 8500-х локомотивах. Также на локомотивах GE установлена микропроцессорная система управления (MCU) Brightstar (GE Brightstar Microprocessor Control System) [384], которая управляет и диагностирует все основные (критически важные) узлы и оборудование локомотива. Система повышает производительность локомотива и снижает затраты на техническое обслуживание и топливо, используя самодиагностику для улучшения устранения неполадок, сокращения объема технического обслуживания и сокращения отказов на дорогах. Система имеет возможность расширения аппаратно-программной функциональности. Информация о техническом состоянии локомотива, его маршруте следования (с использованием GPS), параметрах движения, параметрах работы дизеля (включая наличие топлива) и другого оборудования автоматически поступает через систему Bright Star в диспетчерский центр (рисунок 1.4).



Рисунок 1.3 – Бортовая система мониторинга состояния локомотивов General Electric



Рисунок 1.4 – Схема сбора информации с тепловозов компании General Electric

Всего контролируется около 250 сигналов с периодичностью 100 мс. Передача информации в центр осуществляется один раз в секунду. На локомотиве диагностируется техническое состояние МСУ и силового электронного привода, дизель-генераторной установки (ДГУ), включая систему охлаждения, тяговый привод, включая электродвигатели (ТЭД). Экипажная часть локомотива не диагностируется.

Для Центра на базе платформы Predix разработано специальное программное обеспечение GE Transportation's RailConnect 360 Remote Monitoring and Diagnostics Suite (RM и D), позволяющее управлять и оптимизировать использование локомотивов, их производительность и техническое обслуживание по технологии жизненного цикла.

Все новые локомотивы GE оснащаются описанными системами управления и позволяют дистанционно сопровождать их жизненный цикл. Информация о наличии неисправностей передаётся в виде кодов, число которых достигает 10 тысяч: обработка информации о техническом состоянии локомотива осуществляется на борту, после чего формируется код состояния. Это важно

отметить, потому что есть альтернативные решения: передавать исходную информацию в полном объеме в Центр для дальнейшей обработки на сервере. Второй вариант обработки данных упрощает процесс развития системы мониторинга и диагностирования, однако существенно увеличивает трафик, загрузку радиоканала. Вариант GE существенно сокращает трафик радиоканала, но предполагает наличие возможности дистанционно перепрограммировать МСУ.

При поступлении с локомотива кода инцидента (это не обязательно отказ: любая нестандартная ситуация должна быть отработана) на экране у самого свободного из диспетчеров появляется соответствующее сообщение. АСУ выводит на экран статистику: сколько раз такое сообщение было и что при этом оказалось. Сообщения выводятся в порядке уменьшения числа событий. По каждому варианту действий есть протокол действий (документированные процедуры, в терминологии наших депо – технологические карты). Диспетчер на основании всей совокупности информации должен принять волевое решение о дальнейшем порядке действий и отправить его на линию. Рекомендации могут содержать несколько действий: проверить сам датчик, проверить провода, проверить наличие контакта, запустить на бортовом компьютере программу самодиагностирования с нужным кодом, заменить подозреваемый узел на исправный.

При необходимости (например, выявлении новой ситуации) исходная информация с локомотива считывается с помощью переносного компьютера или flash-накопителя на станции или в депо. Далее информация подробно анализируется, сравнивается с результатами осмотра тепловоза и восстановления его работоспособности. В результате дорабатывается программное обеспечение бортовой МСУ, формируются новые протоколы действий, дорабатывается программное обеспечение диспетчерского центра. Таким образом, технологическое и программное обеспечение центра постоянно развивается.

В результате функционирования Центра осуществляется управление работой ремонтных подразделений, складом и логистикой в целом. Анализируются экономические показатели, оптимизируется вся деятельность. Центром мониторинга GE контролируются не только текущие проблемы с техническим состоянием локомотива, но и прогнозируется остаточный ресурс оборудования. По дисбалансу температуры газов на выходе из цилиндров прогнозируется работа

цилиндров и форсунок. По тренду давления масла – неисправность масляной системы. Контролируется наличие утечки воды, состояние топливной системы, топливной системы, воздушных компрессоров, турбокомпрессоров, тяговых электродвигателей (ТЭД). Разрабатывается технология диагностирования якорей ТЭД. При необходимости устанавливаются дополнительные датчики.

Система мониторинга компании GE оказалась высокоэффективной. Удельный эффект на один локомотив составил \$17000. Эффект достигнут за счёт интеграции ТОиР, уменьшения потерь, сокращения отказов и вызванных ими задержек поездов. Число вынужденных ТОиР сокращены на 50 %, время диагностирования – на 25 %, время простоя на ТОиР – на 23 %.

Опыт взаимодействия с технологическими подходами GE к управлению жизненным циклом локомотива известен и ОАО «РЖД». В депо Иваново эксплуатируются тепловозы 2ТЭ116УД с дизелями производства GE, специалисты которой осуществляют гарантийное обслуживание дизеля.

Следует отметить две принципиальные особенности работы GE: невозможно нарушить режимы эксплуатации дизеля: специально установленный компьютер (внешне напоминает Notebook) контролирует работу дизеля и не допускает опасных режимов, принимая меры вплоть до выключения дизеля и слива воды; действует очень строгий режим планово-предупредительного обслуживания дизеля: внеплановые работы касаются только дополнительных работ и не исключают планово-предупредительные, в т.ч. по замене узлов.

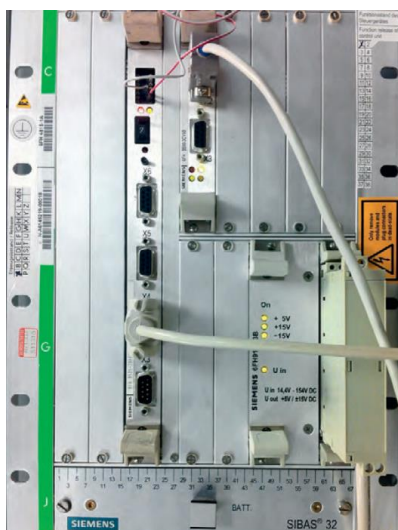
Таким образом, опыт мониторинга компании GE можно рассматривать как эталон подхода к управлению техническим состоянием локомотивов и будет учтён при разработке модели управления жизненным циклом локомотивов с учётом национальных особенностей [298].

1.7.2 Опыт мониторинга компании Siemens

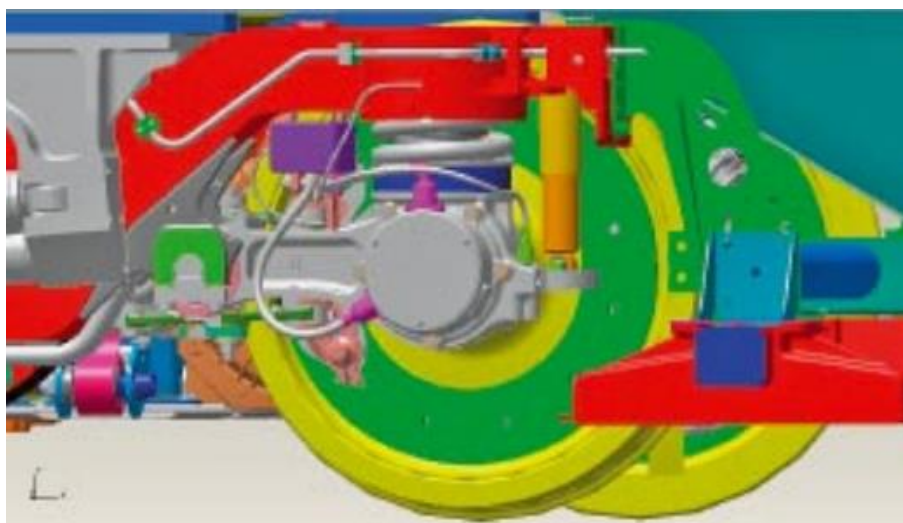
Опыт мониторинга компании GE можно считать общим трендом, примером тенденции в обслуживании тягового подвижного состава. Подтверждением можно считать опыт компании Siemens AG по обслуживанию скоростных электропоездов.

Высокоскоростные поезда ICE (Intercity-Express) разработаны компанией Siemens [394, 397] совместно с компанией Bombardier [381] для немецких железных дорог (Deutsche Bahn) [382]. ICE постоянно совершенствуется. Последняя версия известна как Siemens Velaro с конструкционной скоростью 350 км/ч. Российский высокоскоростной поезд «Сапсан» является адаптированной к российским условиям версией этого поезда - Velaro RUS. Поезда Velaro являются одними из лучших в мире и самыми популярными в Европе, где они эксплуатируются в основном под брендом Eurostar.

ICE является одной из самых сложных тяговых единиц, при этом имея самый высокий в мире коэффициент технической готовности (например, Сапсан единственный вид тяги в РФ, не имеющий запасных вагонов). Для обеспечения таких параметров ICE имеет одну из самых развитых систем бортовой диагностики [397, 401]. Число датчиков на вагон доходило до 1500, однако на определённом этапе сами датчики стали основным источником неисправностей. Датчики установлены во всех основных узлах локомотива, в т.ч. в экипажной части (рисунок 1.5). Информация со всех датчиков собирается в каждом вагоне его микропроцессорной системой управления SIBAS [138].



а – МСУ SIBAS 32



б – датчики буксового узла

Рисунок 1.5 – Комплексное диагностирование ICE компании Siemens

Информация по оптоволокну передаётся в головной вагон в бортовой компьютер. Информация машинисту выводится только в критических ситуациях или по запросу машиниста. Бортовая система сбора информации SIBAS компании Siemens при участии компании Bombardier доведена до уровня стандарта Международного союза железных дорог (UIC) как поездная коммуникационная сеть TCN (Train Communication Network).

С поезда информация передаётся в центр мониторинга компании Siemens (с Сапсана эта информации также передавалась до запрета со стороны ОАО «РЖД»), где формируется план ТОиР для очередного захода в депо, который осуществляет компания Siemens по контракту жизненного цикла, в т.ч. и электропоездов Сапсан (рисунок 1.6). Технология ремонта – крупно-агрегатная. В депо в разобранном виде находится «запасной» электропоезд: тележки прицепных и тяговых вагонов, преобразователи на IGBT-транзисторах, микропроцессорное и электрооборудование и др. Восстановление исправности занимает минимум времени.



а – депо Siemens на станции Металлострой



б – депо Deutsche Bahn

Рисунок 1.6 – Обслуживание электропоездов ICE

Следует отметить, что ICE – одна из самых дорогих тяговых подвижных единиц и его ТОиР также является очень дорогим, не всегда подходящим для грузовых локомотивов. Например, в компании «ТМХ-Сервис» совместно с немецкими консультантами была попытка реализовать аналогичный крупно агрегатный ремонт электровозов серии 2ЭС5К и 3ЭС5К в сервисном локомотивном депо «Братское» (проект «Locomotion»). Несмотря на достигнутый рекорд сокращения времени простоя локомотива в депо на ремонте объёма ТР-3, проект оказался нерентабельным и был закрыт.

1.7.3 Европейская система управления железнодорожным движением

Проект «Европейская система управления железнодорожным движением» (The European Rail Traffic Management System – ERTMS) является крупным промышленным проектом, разработанным восемью членами UNIFE - Alstom Transport, A'D Praha, Bombardier Transportation, CAF, Hitachi Rail STS, Mermec, Siemens Mobility и Thales [366, 398]. ERTMS имеет два основных компонента ETCS и GSM-R. Стандарт информационного взаимодействия с тяговым подвижным составом GSM-R основан на стандартах GSM с использованием частот, специально зарезервированных для железнодорожного приложения с определенными конкретными и передовыми функциями. Европейская система управления поездами (ETCS) является автоматической системой защиты поездов для замены существующих национальных стандартов безопасности движения поездов. ERTMS в целом нацелена на замену различных национальных европейских систем управления поездами. Развертывание ERTMS создаёт бесшовную европейскую железнодорожную систему и повышает её конкурентоспособность.

В настоящее время в Европейском союзе существует более 20 систем управления поездами. При работе на большом полигоне ТПС приходится оснащать двумя и более системами. Например, поезд Париж – Брюссель – Кельн – Амстердам должен оснащаться 7-ю системами безопасности и управления поездом. ERTMS должна постепенно их заменить, являясь при этом самой производительной системой управления поездами в мире и принося значительную экономию эксплуатационных расходов, повышая безопасность, надежность, пропускную способность и соблюдение графика движения поездов. ERTMS признана за пределами Европы в ряде стран: Китай, Индия, Тайвань, Корея, Саудовская Аравия, Казахстан и др. В НИИАС совместно с Ansaldo STS ведётся разработка системы ITARUS-ATC, адаптированной для российских систем СЦБ.

Таким образом, с точки зрения бортового диагностирования и управления ТОиР ERTMS может стать основной системой для осуществления трафика диагностической информации от тягового подвижного состава в центр управления и ситуационные центры управления техническим состоянием локомотивов, реализация которых становится стандартом де факто.

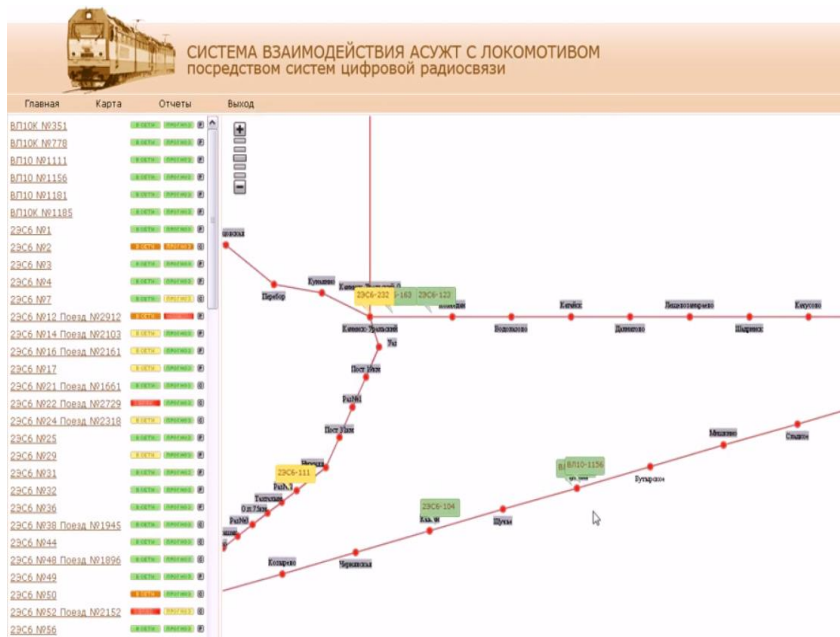
1.7.4 Отечественный опыт использования бортовых диагностических данных

Опыт использования диагностических данных бортовых микропроцессорных систем управления есть и у отечественных производителей локомотивов [227]. Наиболее известной является система взаимодействия с локомотивом посредством технологической радиосвязи СВЛТР разработки компанией ТрансИнфоПроект [345] под руководством НПО «САУТ» [243] и «АВП Технологии» [7].

Источником диагностической информации на борту локомотива (в настоящее время – это электровозы серий 2ЭС6 и 2ЭС10 производства «Уральские локомотивы») являются микропроцессорные системы управления (МСУ) этих локомотивов, опрашивающие датчики и формирующие коды неисправностей аналогично тепловозам производства GE. Информация передаётся в бортовую систему безопасности БЛОК, состоящую из оборудования КЛУБ-У и САУТ-ЦМ/485, в которой формируется информация о дислокации и скорости движения поезда (по данным спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС), о номере и массе поезда, показании напольного светофора, допустимой скорости и др. (по данным КЛУБ-У).

Пакет данных с борта локомотива по радиоканалу и Интернет попадает в диспетчерский центр, расположенный на базе депо «Свердловск-Сортировочный» (Екатеринбург-Сортировочный). Также доступ к информации возможен по паролю через Интернет. На рисунке 1.7 приведены примеры экранных форм СВЛТР. Главной является геоинформационная система с отражением дислокации локомотивов с выделением цветом наличия проблем (1.7а). При выборе локомотива выводится сводная информационная форма (1.7б) и диагностическая (1.7.в).

В описанной выше части СВЛТР аналогична разработкам компании GE (подраздел 1.1), однако в отечественной разработке нет системы поддержки принятия решений о необходимых действиях по восстановлению работоспособности локомотива: решения принимаются оператором самостоятельно. При этом СВЛТР является самой функциональной отечественной системой мониторинга технического состояния локомотивов. Предусмотрено использование системы для сбора данных с бортовых измерителей расхода электроэнергии типа СИМ. Развитие системы в части организации ТОиР практически не происходит, кроме диагностики и ТОиР самих систем БЛОК.



а – дислокация локомотивов

2ЭС10 №11А (№11А, №11Б)		
Наименование	Значение	Дата
Станция отправления	Шалы-3	21.12.2012 11:30:00
Станция проследования	Кишерт	21.12.2012 14:30:37
Перегон	Кишерт - Кунгур-3	21.12.2012 14:30:37
Координата	1536 км 9 пк	21.12.2012 14:30:37
Скорость	0 км/ч	21.12.2012 14:31:04
Допустимая скорость	20 км/ч	21.12.2012 14:37:15
АПС	красно-желтый	21.12.2012 14:26:16
Диагностика	Предупреждение, без ограничений характеристик локомотива	
Прогноз		
Расход электроэнергии с начала поездки	700 кВт·ч	21.12.2012 14:26:10
Рекуперация с начала поездки	800 кВт·ч	21.12.2012 14:14:40
Номер поезда	2319	21.12.2012 14:29:00
Вес поезда, т	6316	21.12.2012 14:29:00
Режим ведения поезда	Советчик	

б - информация о локомотиве

Локомотив 2ЭС6 №1: 21.12.2012
Мотор-компрессор (МК)

Код	Текст сообщения	Дата начала	Дата окончания	Состояние	Дислокация
228	Обратное вращение. Блокировка компрессора	21.12.2012 6:22:28	21.12.2012 6:23:12	В голове поезда	ЕКАТЕРИНБУРГ-Т
200	Отключение ПЧ ТК или ТК. Выключить/включить «Компрессоры» с задержкой в 5 секунд	21.12.2012 14:52:27	21.12.2012 15:21:34	Простой на станционных путях после прибытия с поездом.	ЕКАТЕРИНБУРГ-С
200	Отключение ПЧ ТК или ТК. Выключить/включить «Компрессоры» с задержкой в 5 секунд	21.12.2012 15:23:35	21.12.2012 16:28:32	Простой на станционных путях после прибытия с поездом.	ЕКАТЕРИНБУРГ-С

в – расшифровка сообщения

Рисунок 1.7 – Примеры экранных форм СВЛТР

Новочеркасским электровозостроительным заводом (НЭВЗ) разработана своя система мониторинга электровозов, находящихся на гарантии. Сбор информации идёт через МСУ типа МСУД и МПСУ с передачей по каналу GSM (при установке в локомотиве SIM-карты) информации в центр гарантийного обслуживания в г. Новочеркасске. В отличие от GE и Уральских локомотивов информация не кодирована: передаются исходные данные для дальнейшей расшифровки с помощью специального программного обеспечения.

Во ВНИКТИ (г. Коломна) на базе МСУ-ТЭ пассажирских тепловозов производства Брянского машиностроительного завода (БМЗ) и МСУ-ТП грузовых тепловозов Коломенского завода (КЗ) создана собственная система мониторинга «Осциллограф». Для этого на локомотиве установлена дополнительная система АСК как контролирующая расход топлива, так и собирающая диагностические данные, которые по каналу GSM передаются на сервер ВНИКТИ, на базе которого осуществляется расшифровка и анализ данных. Непосредственная связь с производственной базой ТОиР отсутствует, как и у систем НЭВЗ и СВЛТР.

В группе компаний ЛокоТех разработана собственная уникальная система дистанционного диагностирования АРМ «Умный локомотив» (программное обеспечение написано компанией «Кlover Групп») [161]. Уникальность заключается в анализе информации не только разных типов (тепловозы, электровозы) и серий локомотивов, но даже разных производителей: НЭВЗ, БМЗ, КЗ, входящих в Трансмашхолдинг. Для этого на стационарный сервер системы передаются диагностические исходные файлы, считываемые с локомотива как автоматически, так и с помощью flash-накопителей группами диагностики сервисных локомотивных депо. Такой подход (в отличие от подхода GE) обусловлен двумя основными причинами: отсутствие (или недостаточное) кодирование неисправностей в программном обеспечении МСУ и отсутствие возможности дистанционно перепрограммировать МСУ при появлении новых диагностических алгоритмов. Расшифрованные данные АРМ «Умный локомотив» в отличие от всех остальных отечественных разработок непосредственно используются при ТОиР локомотивов производства Трансмашхолдинг, находящихся на сервисном обслуживании в ЛокоТех-Сервис. АРМ производит диагностирование по ранее разработанным алгоритмам, производившемся в ручном режиме группами диагностики, по которым в ЛокоТех были подготовлены алгоритмы и переданы для написания программы. На экране проблемные места выделяются цветом (рисунок 1.8). Если диагност подтверждает наличие инцидента, то данные автоматически передаются в АСУ ТОиР «Сетевой график», где фиксируются как замечания по техническому состоянию локомотива в электронном аналоге журнала учёта ремонтов локомотива формы ТУ-28 (рисунок 1.9).

Назначение исполнителей на ремонтные работы									
Записать назначение исполнителей									
Показывать работы: ☒ Все ☐ Цикловые ☐ Сверхцикловые ☐ Только без исполнителей Участок:									
Шаблоны исполнителей Загрузить исполнителей из ремонта Назначить исполнителей на ремонт									
Этап / Группа / Работа	№ наряда	Текущее состояние	Нор...	Кол.	Раз...	Дата начала...	Исполнители	Разряд исполнителей	Участок
ТО-3 2ТЗ116 №0842А Тюмень 25.05.2017 3:32:00									
Цикловые работы									
Не заполнена группа работ			12.72						
По заводу									
Приборы безопасности локомотива									
Автоматическую локомотивную оптимизацию с автоподом осмотреть, отремонтировать	376983	Нет исполнителя		1	5.00				Сторонние организации
Дизель и дизельное оборудование локомотива									
Аппаратуру топливную до ремонта проверить	376989	Нет исполнителя	0.55	1	6.00				Участок рем...
Тормозное и пневматическое оборудование локомотива									
Тормозное и вспомогательное пневматическое оборудование тепловоза до ремонта проверить	376990	Назначена	0.16	1	7.00	26.05.20...	Березин М.И.		Участок по ремонту ...
По циклу									
Дизель и дизельное оборудование локомотива									
Аппаратуру топливную проверить, отремонтировать	376991	Нет исполнителя	2.13	1	5.00	26.05.20...			Участок рем...
Замеры колесного вала "на масло" проводить	377001	Нет исполнителя	0.41	1	5.00	26.05.20...			Лаборатория...
Тормозное и пневматическое оборудование локомотива									
Тормозное и вспомогательное пневматическое оборудование тепловоза осмотреть, отремонтировать	376991	Назначена	0.67	1	6.00	26.05.20...	Березин М.И.		Участок по ремонту ...
Расстояние и положение наконечников пасосных труб от головок рельсов и бандажей колесных пар измерить, отрегулировать	376992	Назначена	0.19	1	5.00	26.05.20...	Березин М.И.		Участок по ремонту ...
Электрооборудование силовой цепи, вспомогательных цепей и цепей управления локомотива									

Рисунок 1.10 – Назначение нарядов в АСУ «Сетевой график»

По совокупности выписанных мастером нарядов автоматически формируется сетевой график (рисунок 1.11) по которому можно наглядно с любого рабочего места (даже извне депо при наличии Интернет и пароля) контролировать ход ТОиР в каждом из 85 сервисных локомотивных депо группы компаний «ЛокоТех».

По каждой сверхцикловой работе необходимо заполнить электронную форму экспресс-анализа причин возникновения отказа (рисунок 1.12), позволяющую в дальнейшем производить анализ причин возникновения отказов, а точнее – сверхцикловых работ. Форма составлена по технологии 5W2H.

В диссертации при практической реализации разработанной Модели в сервисном локомотивном депо «Братское» будет реализована автоматическая связь автоматизированных систем технического диагностирования с электронным журналом замечаний АСУ «Сетевой график» группы компаний ЛокоТех. Будет создан уникальный отечественный комплекс, получивший название «Цифровое ремонтное локомотивное депо».

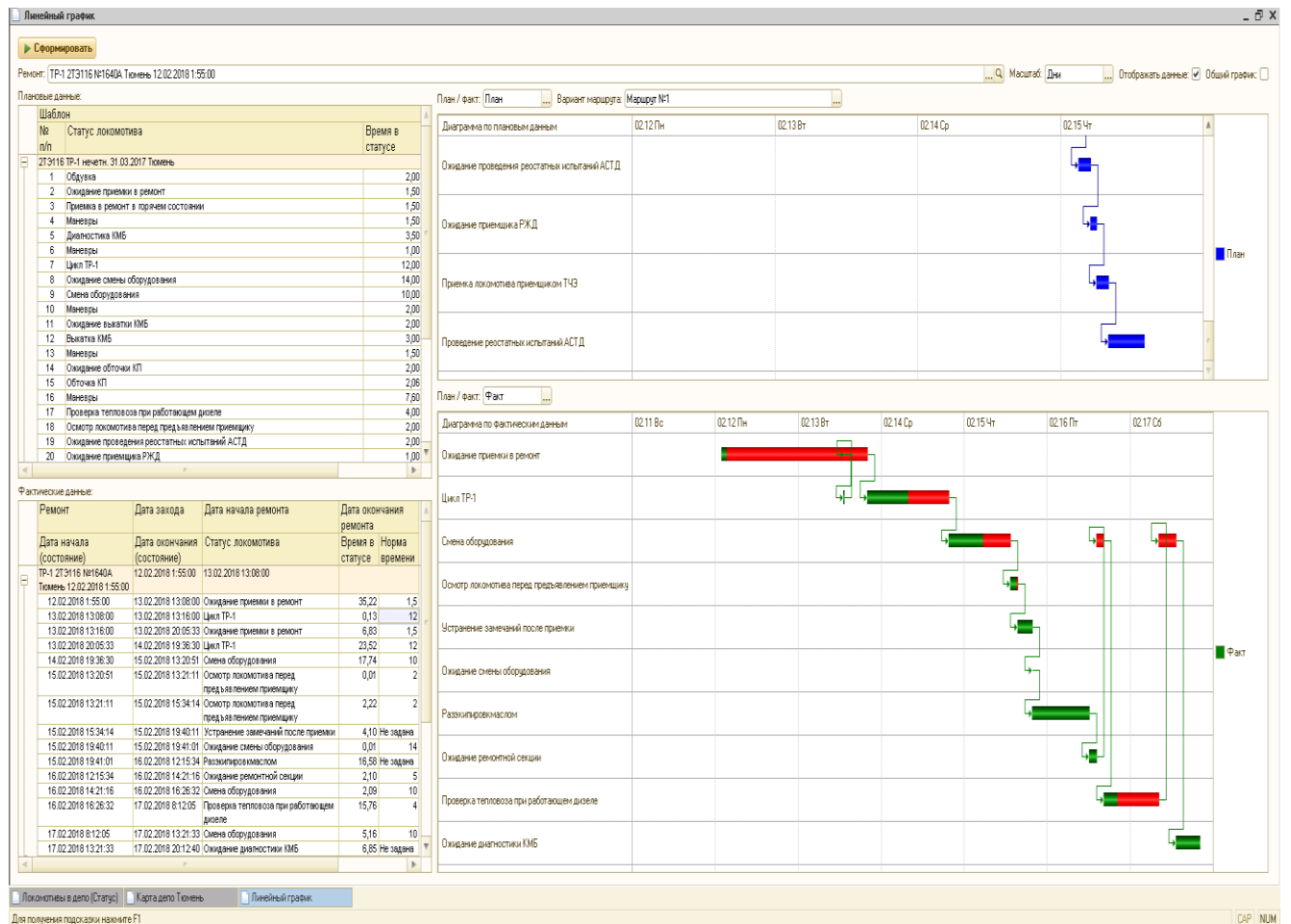


Рисунок 1.11 – Сетевой график ремонта в АСУ «Сетевой график»

Дата	Серия	Номер	Секция	Замечание	Цех
				Работа	Материалы руб.
				Труд	Разряд
Классификатор оборудования		Четыре уровня оборудования из классификатора			
1. Виновность 1	Из классификатора		Текстовый комментарий		
1. Виновность 2	Зависит от предыдущего пункта				
2. Тип отказа	Из классификатора		Текстовый комментарий		
3. Причина	Из классификатора		Текстовый комментарий		
4. Описание	Текстовое описание отказа				
Меры	Текстовое описание принятых мер				
ОТНЕСЕНО:	Дата	Сторона	Из классификатора	Сумма руб.	Примечание, текст
Приложить файл	Приложенные файлы:				
Автоматически	Заголовок	Ввод мастером	Разбор группы качества		

Рисунок 1.12 – Окно экспресс-анализа причины возникновения отказа

Аналогичную ранее рассмотренным примерам бортовую систему диагностирования имеют электропоезда «Москва» (81-765/766/767) производства ОАО «Метровагонмаш», эксплуатируемые в Московском и ряде других метрополитенов. ТОиР составов «Москва» осуществляется сервисной компанией «Метровагонмаш-Сервис» по контракту жизненного цикла [264, 358].

«Метровагонмаш-Сервис» реализует проект автоматизации управления ТОиР с использованием данных бортовой диагностики, передаваемым в деповскую стационарную систему. Проект реализуется в депо Новогиреево, где обслуживаются 248 вагонов Калининской линии московского метро. Налажено стопроцентное считывание диагностических данных, при этом по каждому составу их около 4000. Выявляется необходимость внепланового ремонта. Для предыдущих серий принято решение дооборудовать их Wi-Fi системами для передачи диагностических данных в стационарный компьютер в режиме online.

Рабочее место ведущего инженера группы технической поддержки эксплуатации «Метровагонмаш-Сервиса» расположено в едином диспетчерском центре Московского метрополитена. В случае обнаружения отказа или предотказного состояния вместе с руководителем смены диспетчерского центра принимается решение о дальнейшем порядке действий.

Интересно, что, в случае возникновения инцидента, в диспетчерском центре на экран выводится не только объективная информация бортовой АСТД, но и изображение пульта машиниста (рисунок 1.13). Одновременно есть возможность разговаривать с машинистом. Эта уникальная для отечественного железнодорожного транспорта технология позволяет свести до минимума число случаев снятия состава с линии из-за его неисправности. С одной стороны, созданы наилучшие условия для устранения неисправности, с другой – сведён до минимума субъективный фактор принятия решения о наличии неисправности машинистом. Следует отметить, что снятие состава с линии согласно КЖЦ обходится сервисной компании в 500 тыс.руб. Кроме диспетчерского центра для принятия решения о снятии поезда с линии или устранения инцидента (восстановление работоспособности или обучение машиниста правильным действиям) информация передаётся в сервисное электродепо для подготовки к ТОиР. В настоящее время ведутся работы по автоматизации этого процесса.



Рисунок 1.13 – Пульт машиниста электропоезда «Москва»

Для автоматизированного использования переданных в сервисное метродепо диагностических данных в процессе ТОиР в сервисной компании внедряется ERP система на базе пакета программ 1С, технологическую основу которой составляет АСУ «Сетевой график» группы компаний «ЛокоТех». Внедрение АСУ позволит создать комплексное киберфизическое цифровое ремонтное депо.

Следует отметить ещё одну важную особенность системы мониторинга метрополитена – высокая социальная цена отказа, т.к. остановка движения метро приводит к коллапсу пассажиропотока на линии. Поэтому необходимость исключения случаев остановки поездов, с одной стороны, и возможность постоянного взаимодействия с электропоездом в силу ограниченности пространства, с другой, позволяют реализовать описанную технологию.

Выше рассмотренные бортовые системы диагностирования строятся на базе штатных микропроцессорных систем управления локомотивом. Наряду с этими системами, накоплен опыт использования специализированных систем диагностирования. Самый массовый из них – это системы учёта топлива, первой из которых стал аппаратно-программный комплекс (АПК) «Борт» производства НИИТКД (подробно его диагностические возможности рассмотрены в разделе 3). Аналогично АПК «Борт» созданы системы АСК ВИС, РПДА-Т, и даже система АСК, штатно входящая в состав отечественных тепловозов. Главное назначение всех этих систем – учёт дизельного топлива, проблемы с которым есть в ОАО «РЖД». Однако оказалось, что при наличии соответствующих датчиков на дизеле и в электрических цепях, можно производить диагностирование дизель-генераторной установки (ДГУ). При наличии системы передачи данных появляется возможность дистанционного диагностирования самого дорогого и ненадёжного узла тепловоза

– ДГУ, причём и на сериях локомотивов без МСУ. Такой опыт накоплен на БАМ, где эксплуатируются тепловозы серии 2ТЭ10МК после капитального ремонта.

Аналогично системам учёта топлива в качестве бортовой системы диагностирования можно использовать автоматизированные системы автоведения поезда УСАВП производства АВП Технологии [7, 222]. Системы предназначены для сокращения затрат электроэнергии на тягу поездов, для чего их и устанавливают на локомотивы. Одновременно, аналогично АПК «Борт», появляется возможность диагностирования электрических цепей электровозов, в т.ч. старых серий без МСУ. Например, в депо Карасук по данным УСАВП диагностируется техническое состояние электровозов переменного тока серии ВЛ80С.

Таким образом, современные отечественные локомотивы имеют бортовые автоматизированные системы технического диагностирования (АСТД) на базе микропроцессорных систем управления (МСУ) [271]. Активно идут работы по использованию диагностических данных АСТД в процессе ТОиР, которые попадают на сервер ремонтного предприятия как в режиме online (предпочтительный вариант), так и при ручном считывании с помощью Notebook или flash-накопителя.

Имеются научно-практические разработки в области использования данных АСТД в процессе ТОиР, в т.ч. в трудах следующих специалистов в области диагностирования: И. К. Лакин [153, 154, 172], В. В. Грачёв [88], А. А. Комяков [141], В. А. Смирнов [308, 309], А. А. Аболмасов [1], И. И. Лакин [152], В. А. Мельников [180], И. В. Пустовой [235], И. Ю. Хромов [356]. В работах авторов рассмотрены отдельные аспекты общей задачи: диагностирование электровозов, тепловозов и электропоездов, мониторинг режимов эксплуатации локомотивов, в т.ч. при наличии нарушений, математическая обработка данных, корректировка объёма ТОиР по данным систем диагностирования.

Таким образом, на современных отечественных локомотивах и модернизированных старых имеется возможность использования данных бортовых систем технического диагностирования при организации и проведении ТОиР. Имеется опыт диагностирования с дальнейшим использованием данных при ТОиР, который следует учесть в диссертации при разработке перспективной модели ТОиР.

1.7.5 Центры управления тяговыми ресурсами ОАО «РЖД»

На полигонах ОАО «РЖД» созданы Центры управления тяговыми ресурсами (ЦУТР), работа которых регламентирована распоряжением ОАО «РЖД» (№ 1591р от 19.07.2013). Распоряжением № 609р от 07.03.2014 определён порядок взаимодействия дежурного персонала по эксплуатационному локомотивному депо, управления движением и руководителей территориальных дирекций тяги, и региональных дирекций управления движением по организации работы с локомотивами, переданными на сервисное обслуживание. Распоряжением № 2р от 09.01.2013 определён типовой регламент оперативного управления локомотивами при взаимодействии диспетчерского аппарата ЦУТР и региональных дирекций управления движением, дирекций тяги, дирекций по ремонту тягового подвижного состава. Утверждены технология управления тяговыми ресурсами на Восточном полигоне (распоряжение ОАО «РЖД» от 21.03.2013 № 688р), методика оперативного сменно-суточного планирования парка локомотивов грузового движения (утверждена в ЦД 29.12.2012 и рядом других документов). В ЦУТР используется система «Единая интеллектуальная система управления и автоматизации производственных процессов на железнодорожном транспорте» (ИСУЖТ). Головной разработчик системы – НИИАС.

В ЦУТР реализуются следующие функции управления ТОиР:

- 1 трёхлетнее, годовое, квартальное прогнозное планирование ТОиР осуществляемое по статистке пробегов локомотивов;
- 2 трёхсуточное и суточное планирование ТОиР локомотивов по фактическому пробегу локомотивов;
- 3 постановка отказавшего локомотива на неплановое ТОиР;
- 4 мониторинг хода ТОиР;
- 5 согласование дополнительных сверхцикловых работ при их обнаружении в процессе ТОиР или при постановке на ремонт;
- 6 планирование выдачи локомотива на линию после ТОиР.

Эффективность работы ЦУТР в части управления ТОиР оценивается по следующим ключевым показателям качества их работы:

- 1 увеличение процента локомотивов, поставленных на ремонт в установленный срок (%);
- 2 увеличение суточного пробега локомотивов; измеряется как увеличение среднесуточного пробега за истекший квартал (месяц) времени (км и %) к базовому периоду (аналогичный период предыдущего года);
- 3 число выявленных случаев непроизводительного использования локомотивов (малый среднесуточный пробег); измеряется в числе случаев за период;
- 4 повышение достоверности информации о пробегах локомотивов; измеряется в числе выявленных случаев недостоверной информации (шт.);
- 5 сокращение перепробега локомотивов; измеряется как уменьшение процента локомотивов, поставленных на ремонт с перепробегом (%) и как общий перепробег локомотивов (тыс.км.);
- 6 сокращение времени восстановления локомотива после отказа; измеряется как сокращение времени восстановления локомотивов (часы) от момента наступления отказа до выдачи локомотива в эксплуатацию;
- 7 сокращение времени простоя локомотива в депо на ТОиР; измеряется как сокращение времени простоя локомотивов (часы);
- 8 повышение сходимости прогнозов с фактом постановки локомотивов на ремонт; измеряется как увеличение процента сходимости данных (%).

Таким образом, созданные в ОАО «РЖД» центры управления тяговыми ресурсами создают предпосылки для объединения автоматизированных систем управления (АСУ) движением поездов, диагностических бортовых систем локомотивов, АСУ ТОиР в единую киберфизическую производственную систему.

Примечание: ЦУТР подчиняются департаменту организации перевозок, что субъективно затрудняет построение единой информационной системы.

1.8 ДЕПОВСКИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

В предыдущем разделе показано, что мировым трендом является максимальное использование данных бортовых АСТД на базе МСУ локомотива. При этом остаются деповские АСТД. Определить соотношение бортовых и деповских АСТД – одна из целей настоящей работы.

Наиболее полный отечественный опыт деповского диагностирования накоплен в НИИ технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта (НИИТКД, г. Омск, первый руководитель и создатель института – к.т.н. Анатолий Нойович Головаш) [43, 191]. Институт разрабатывает и выпускает системы технического диагностирования (СТД) для вагонного хозяйства (вагоноборочный участок, колёсно-роликовый участок, контрольный пункт автосцепки, контрольный пункт автотормозов, пункт технического обслуживания (ПТО), участок ремонта тележек и др.), для электропоездов метрополитена (автоматное отделение, автосцепное отделение, аппаратное отделение, цех малого периодического ремонта, цех ремонта колёсных пар, цех ремонта тележек, цех ремонта электрических машин, испытательная станции и др.), для электропоездов ОАО «РЖД» (автотормозное отделение, колёсный цех, отделение ремонта экипажной части, ПТО, цех малого периодического ремонта, электроаппаратный цех, электромашинный цех и испытательная станция) и локомотивного хозяйства (автотормозное отделение, колёсный цех, отделение ремонта экипажной части, пункты технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ), реостатные испытания тепловозов, топливное отделение, цех малого периодического ремонта, электроаппаратный цех, электромашинный цех, испытательные станции).

Все виды деповских систем диагностирования можно разбить на несколько видов [12, 191, 199, 208 – 214]. Первый тип – переносные мобильные (рисунок 1.14): позволяют произвести диагностирование непосредственно на локомотиве. Результаты диагностирования выводятся на экран прибора для дальнейшей записи в блокнот, сохраняются в памяти прибора для дальнейшего перенесения в компьютер или передаются в стационарный компьютер по каналу Wi-Fi (предпочтительный вариант). Как правило остаются неавтоматизированными

идентификация оборудования (тип и уникальный номер), номер локомотива и личные данные диагноста.



а – прибор для диагностики электрических машин и аппаратов «Доктор-60»



б – микропроцессорное устройство для проверки статического напора воздуха в системе охлаждения ТЭД

Рисунок 1.14 – Примеры переносных мобильных устройств диагностирования

Второй тип переносных микропроцессорных устройств диагностирования приведён на рисунке 1.15. Эти системы обладают большей функциональностью, но и более громоздкие. Могут использоваться как на локомотиве, так и на стенде.



а – система контроля и диагностики «Доктор-030ZM»



б – измеритель параметров иммитранса «ИММЕТР»

Рисунок 1.15 – Примеры переносных микропроцессорных устройств диагностирования

Важная группа стендов – это стационарные испытательные, наладочные и диагностические стенды отдельных видов оборудования (рисунок 1.16). Стенды позволяют обеспечить исправное функционирование оборудования от планового обслуживания до очередного планового за счёт его качественной наладки и испытания на стенде.



а – зарядное устройство



б – стенд испытания и наладки электрических аппаратов



**в – испытательная станция
вспомогательных машин**



**г – источник собственных нужд
для прокрутки ТЭД**



д – автоматизированный комплекс для проверки, испытания и настройки топливной аппаратуры дизельных двигателей)

Рисунок 1.16 – Примеры стационарных систем диагностирования

В НИИТКД разработаны диагностические стенды и оснастка к ним для большинства видов оборудования электровозов, тепловозов, электропоездов и вагонов метро [191]. Аналогичные разработки имеются на Омском заводе транспортной электроники [200] и НПО «ОМИКС» [199]. Научный руководитель компании – к.т.н. Молчанов Виктор Васильевич – предложил оригинальный подход к разработке измерительной части систем диагностирования на базе универсальных микропроцессорных измерительных приборов одной из ведущих компаний по разработке и производству электронных контрольно-измерительных приборов Fluke Corporation (США) [383]. Приборы Fluke позволяют не только измерять практически все виды физических величин, но и передавать результаты. Такой подход компании как снижает стоимость разработки систем диагностирования, так и упрощает их метрологическое сопровождение.



а – типовая измерительная часть на базе покупного измерительного прибора компании Fluke Corporation



б – мобильная переносная диагностика серии «ОКО»

Рисунок 1.17 – Диагностические системы НПО ОМИКС

НПО «ОМИКС» предложил оригинальный способ передачи данных с систем диагностирования через мобильный телефон, который не только снижает необходимый радиус передачи данных, но и позволяет ввести с экрана телефона номер оборудования: как вручную, так и с помощью NFC-меток. Подходы ОМИКС с максимальным использованием стандартной аппаратуры продолжают традиции первой компьютерной АСТД, разработанной в 1984 году специалистами МИИТ совместно со специалистами Красноярской ж.д. для диагностирования

электронного оборудования электровозов серии ВЛ80Р (позже – ВЛ85), позволившего в 5 раз поднять надёжность первых локомотивов с электронной системой управления (блоками управления выпрямительно-инверторными преобразователями – БУВИП), фактически определив дальнейшее развитие отечественных локомотивов как имеющих электронную систему управления [44]. АСТД строилась на базе ЭВМ «Электроника ДЗ-28 и стандартных измерительных приборов (цифровых вольтметра, частотомера и коммутатора) и нестандартного блока тестовых воздействий. Диагностирование производилось как на локомотиве, так и на стенде. Проведённая по итогам внедрения системы сетевая школа позволила распространить опыт первопроходцев: АСТД БУВИП стала прототипом для построения всех последующих АСТД на базе ЭВМ (компьютера) или микропроцессорных блоков: «Доктор», «ОКО», «Кипарис» «Прогноз» и др.

Общее число диагностических устройств и стендов, оснастки и технологического оборудования депо, зарегистрированное в реестре ОАО «РЖД» и разрешённое к применению, превышает 500 наименований [237]. Однако все разработки обладают общими проблемами, которые необходимо решать:

- 1 комплексное оснащение ремонтных локомотивных депо ограничено рентабельностью. В разделе 4 показано, что решение задачи оснащения депо диагностическими системами требуют технико-экономического обоснования;
- 2 в настоящее время в ОАО «РЖД» нет единой политики в области оснащения ремонтных сервисных локомотивных депо средствами диагностирования;
- 3 развитие систем бортового диагностирования приводит к ограничению потребности в деповских системах диагностирования. В идеале бортовые АСТД должны полностью заменить деповские, но этого в ближайшее время не произойдёт: необходимо найти оптимальное сочетание типов АСТД;
- 4 в системах диагностирования, как правило, не решена задача автоматической идентификации типа и уникального номера диагностируемого оборудования и данных об исполнителе. Задача требует своего решения;
- 5 не разработана технология проведения ТОиР при использовании в нём систем диагностирования, в т.ч. бортовых.

1.9 ОПЫТ ДЦВ КРАСНОЯРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Уникальный опыт накоплен Дорожным центром внедрения Красноярской железной дороги (ДЦВ Красноярской ж.д.) под управлением к.т.н. Семченко Виктора Васильевича обслуживания электронных систем управления отечественных электровозов переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) [152] и приводом на базе тяговых электродвигателей постоянного тока.

ДЦВ Красноярской ж.д. (всего создано 16 ДЦВ) [202] наряду с выполнением централизованных проектов, ДЦВ, в силу предыдущей специализации В.В.Семченко [301, 302] в области ТООР электроники электровозов серий ВЛ80Р, ВЛ85 и ЭП1, стал обслуживать электронное силовое оборудование и МСУ электровозов переменного тока с ВИП. Высоко профессиональные специалисты обладают достаточной компетенцией для обеспечения заданного уровня надёжности, в т.ч. за счёт модернизация электровозов ВЛ80Р и ВЛ85 (рисунок 1.18).

Основу парка локомотивов Восточного полигона ОАО «РЖД» составляют электровозы переменного тока с ВИП: серии ВЛ80Р (1973 – 1986 годы выпуска), ВЛ85 (1983 – 1994), ВЛ65 (1992 – 1999), ЭП1 (1998 – 2007), ЭП1М (с 2006), 2/3/4ЭС5К – «Ермак» (с 2004 г.).

До ДЦВ Красноярской ж.д. на электровозах происходили сквозные пробой плеч ВИП, отсутствовали вторые исправные полукомплекты МСУ. Отказы приводили к пожарам. Благодаря предложенной В. В. Семченко технологической модели [301, 302] «Комплексная система управления надёжностью электронного оборудования локомотивов» (рисунок 1.19) удалось добиться высокой надёжности электроники локомотивов Восточного полигона – на других полигонах проблемы с надёжностью электроники остаются.

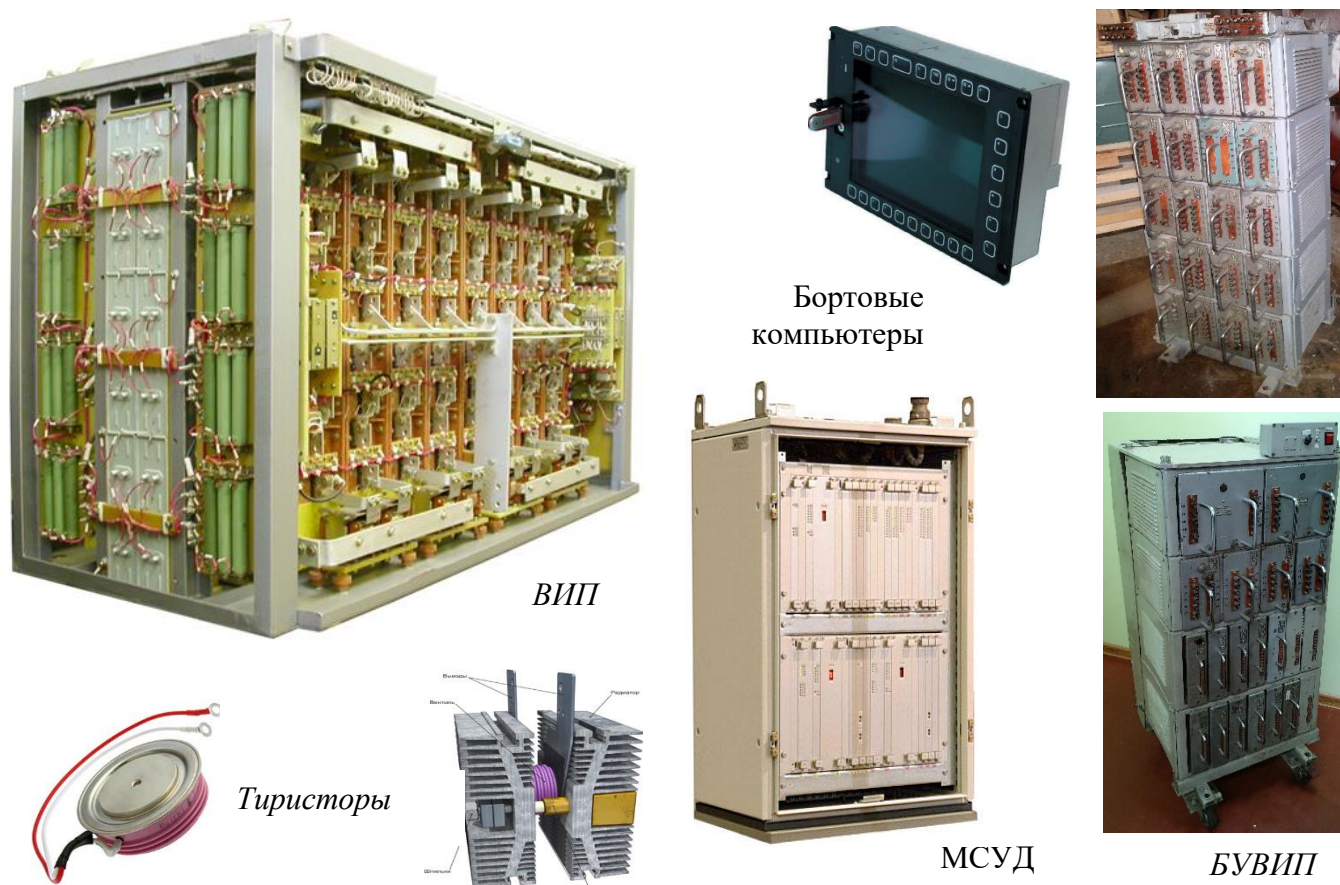


Рисунок 1.18 – Силовое и микропроцессорное оборудование электровозов с ВИП

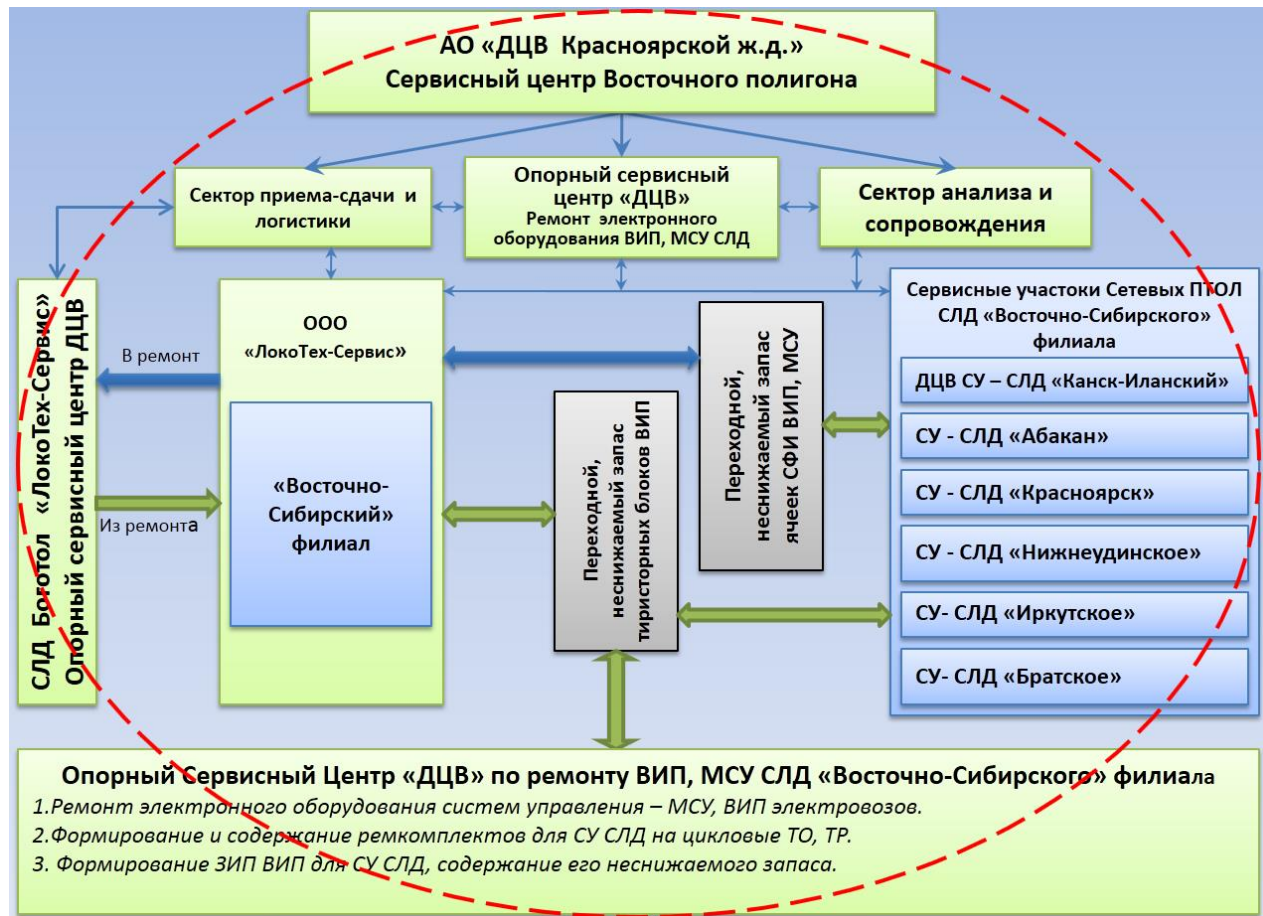


Рисунок 1.19 – Технологическая модель ТОиР ДЦВ Красноярской ж.д.

В депо Боготол расположен Производственный центр ДЦВ Красноярской ж.д., на котором прошедшие обучение на заводах-изготовителях высококвалифицированные специалисты на специализированном оборудовании (рисунки 1.20 и 1.21) диагностируют и обслуживают, ремонтируют и формируют ремонтные комплекты узлов электронного оборудования. На пунктах технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ) по крупно-агрегатному принципу неисправные узлы заменяются на исправные из перехода. Производственный центр имеет систему участков для ТОиР ВИП и МСУ. Нормативно-технологическая документация ДЦВ разработана самостоятельно.

Сам ТОиР на локомотиве круглосуточно выполняют обособленные подразделения ДЦВ на восьми сетевых ПТОЛ Восточного полигона.

Производственный центр взаимодействует со всеми производителями электронного оборудования: ПАО «Электровыпрямитель», ИРИС, ЛЭС, АВП Технология, НИИТКД, Полёт и др.

Следует отдельно отметить, что средняя стоимость ремонта оборудования локомотивов в ДЦВ самая низкая по сети дорог. А стоимость ремонта кассет МСУ примерно в 2 – 3 раза ниже, чем на других полигонах и составляет около 8 тыс. руб. при стоимости покупки новой кассеты до 60 тыс. руб.

Основанием для проведения работ на ПТОЛ являются внешний осмотр электроники, замечания машиниста в бортовом журнале формы ТУ-152 [278], показания встроенной системы технического диагностирования ВИП, записи в бортовом компьютере по данным МСУД.

Технологическая модель ДЦВ Красноярской ж.д. полностью исключила опасные сквозные пробой плеч ВИП (рисунок 1.22), исключила отказы по вине МСУД исключило отказы перевозочного процесса по вине МСУД за счёт исправности двух полукомплектов, новые модули для которых больше не закупаются за счёт их циркуляции. Подтверждённый эффект в год превышает 107 млн руб.



а - Разборка и сборка ВИП



б - Мойка и сушка тиристоров



в - Комплектация тиристорных блоков



г - Склад готовой продукции

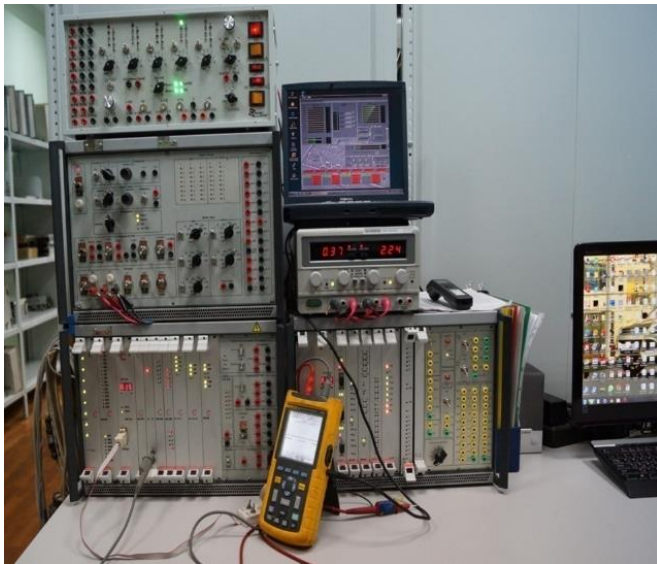
**д - АСТД
для испытания и подбора
тиристоров**



**е – Нагрузочная станция
испытания ВИП**



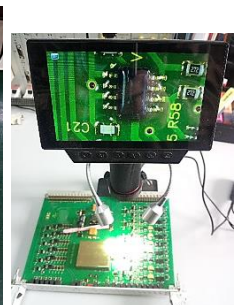
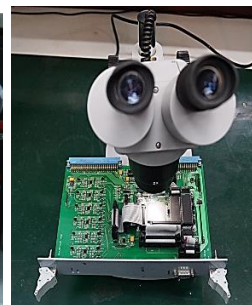
Рисунок 1.20 – Комплекс участков ТОиР ВИП ДЦВ Красноярской ж.д.



а - АСТД МСУД



б – Отремонтированные модули МСУД



в – Покупное оборудования для ТОиР МСУД

Рисунок 1.21 – АСТД для ТОиР МСУД в ДЦВ Красноярской ж.д.

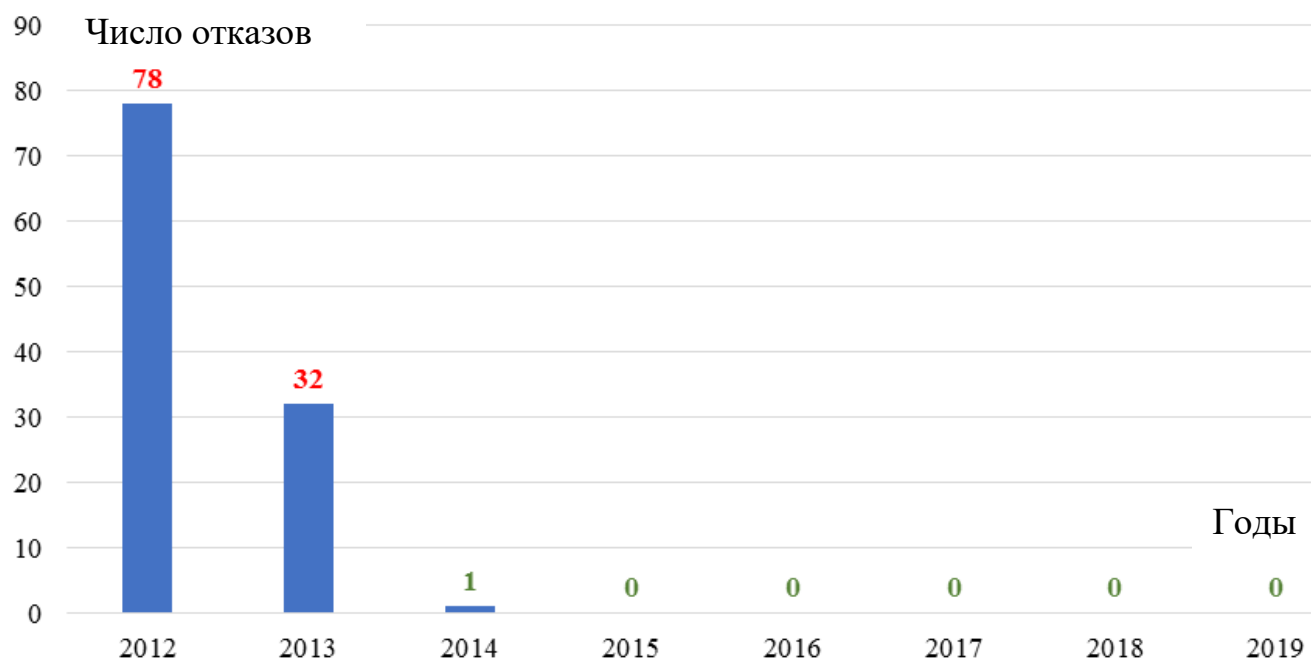


Рисунок 1.22 – Динамика отказов ВИП после внедрения модели ТОиР ДЦВ

Таким образом, разработанная в ДЦВ Красноярской ж.д. под руководством к.т.н. В. В. Семченко модель ТОиР электронных и микропроцессорных систем электровозов переменного тока реализовала комплексное использование бортовой и деповской систем технического диагностирования. Опыт ДЦВ Красноярской ж.д. следует учесть при построении модели управления жизненным циклом локомотивов.

1.10 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СИТСЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ НА НАДЁЖНОСТЬ ЛОКОМОТИВОВ

1.10.1 Отечественная история обслуживания локомотивов

В предыдущих разделах доказано, что локомотивы во всём мире имеют планово-предупредительную систему (ППС) технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Система ТОиР в отечественном локомотивном хозяйстве насчитывает более 180 лет. Основы ТОиР были взяты ещё от почтовой службы России «Ямская гоньба» (XIII – XIX века), установленной ещё при Золотой Орде [28]. Первым критерием необходимости ТОиР была смена лошадей и ямщиков в силу ограниченных их физических способностей преодолевать путь за один раз, который составлял 40 – 50 вёрст (43 – 53 км). Именно к системе почтовых дворов привязывался отдых участников путешествия и работы по техническому

обслуживанию и ремонту экипажной части и тягловой силы (в современной терминологии). Поэтому логичным было принятое решение при проектировании коммерческой Николаевской железной дороги (Санкт-Петербург – Москва, 1851) строить локомотивные депо у ямских станций. Соответственно было построено 9 «круглых зданий для хранения локомотивной машины» (сохранившиеся представляют собой объекты культурного наследия, а на станции Тверь сохранилось действующее депо!) [38, 192]. Эти депо имели собственные приписные паровозы, обслуживавшие соответственно 8 тяговых плеч. На станциях 2-го и 3-го класса были построены 25 упрощенных депо (паровозные сараи), на всех станциях были предусмотрены пункты экипировки водой и углём – прообразы современных пунктов технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ). После первого опыта ТОиР локомотивов по принципу ямских станций стала складываться собственная система ТОиР, увеличивался межремонтный пробег, соответственно увеличивались расстояния между депо и ПТОЛ, появилась специализация видов ремонта, цикличность выполнения ТОиР. Уже не нужные здания бывших депо приспособлялись для других нужд (на Октябрьской ж.д. до сих пор можно увидеть перепрофилированные первые локомотивные депо).

Таким образом, первый опыт ТОиР локомотивов был заимствован у почтовой службы России (ямской гоньбы). Первые правила ТОиР развивались интуитивно по результатам практической деятельности.

Примечание: интересно, что кроме технологии ТОиР у ямщиков были заимствованы и многие термины. До сих пор у поезда нет начала и конца – есть голова и хвост. Поезд не едет назад – его осаживают. А ремонтные пути (канавы) до сих пор называют стойлами. Оборот локомотивов произошёл от оборота лошадей. Да и слова путь, станция, дорога гораздо старше железных дорог.

В 1839 году уже после строительства первой железной дороги в России (Петербург – Царское Село – Павловск, 1837) П. П. Мельников и Н. О. Крафт были командированы на 15 месяцев в Соединенные Штаты Америки, где была заложена первая отечественная железнодорожная школа [206]. Но опыт больше касался устройства верхнего строения пути, мостов и других инженерных сооружений (идея

ширины колеи 1524 мм (60") также была рекомендована в США.). Позже Павел Петрович Мельников увлекался научными основами вагоностроения.

Первые регламенты ТОиР паровозов в качестве диагностики использовали в основном механические испытания образцов на разрушение (поэтому современные методы диагностирования называют «неразрушающие методы контроля»). Вторым видом диагностики стало испытание воздушных и паровых систем, настройка клапанов защиты по давлению. Взрывы паровых машин привели к введению в 1843 году постановлением Правительства России в «Устав о промышленности фабричной и заводской» требования о соблюдении приложенных «правил предосторожности при обращении с паровыми котлами» [148]. Обязанности по освидетельствованию паровых котлов возложили на губернских механиков. Таким образом, первая система диагностирования в локомотивном хозяйстве была призвана обеспечить безопасность эксплуатации паровозов.

С появлением электровозов и тепловозов роль систем диагностирования существенно возрастает. Таким образом, широкое применение средств диагностирования в локомотивном хозяйстве началось в 30-е годы 20-го века с появлением электровозной тяги.

Таким образом, широкое применение средств диагностирования в системе ТОиР связано с появлением тепловозов и электровозов.

1.10.2 Математические методы управления при обслуживании

Отдельно система ТОиР рассмотрена в ГОСТ 18322-78 [51], где целью её создания указаны «поддержание и восстановление (качества либо эксплуатационных характеристик) объектов» по определённым «концепции технического обслуживания и ремонта» и «правилам технического обслуживания (ремонта)». Оговаривается, что, согласно регламентам, ТОиР должен быть плановым: неплановый ТОиР считается отступлением от Регламента. Более того, плановый ТОиР рекомендуется осуществлять периодически, в т.ч. сезонно.

Задача статистического управления качеством продукции возникла и решалась с 19 века. Задача управления надёжностью систем и оборудования выделилась в отдельное научное направление в середине 20-го века [177]. В настоящее время основные понятия надёжности и методы их расчёта доведены до

уровня государственных и международных стандартов [56 - 88]. Важно отметить, что с самого начала наряду с собственно надёжностью рассматривались и понятия, связанные с ремонтом, восстановлением работоспособности: ремонтпригодность, восстанавливаемость, время (продолжительность) ремонта, время восстановления и др. А главное, вводится понятие «система технического обслуживания и ремонта», сразу разделяя их на плановые и неплановые.

Научное обоснование периодичности и объёма работ системы ТОиР является предметом постоянного рассмотрения в промышленности в целом [115, 220, 303]. Наиболее развитым обоснование системы ТОиР можно считать в гражданской авиации [362], где основным риском является угроза жизни пассажирам. На железнодорожном транспорте задачи по оптимизации ТОиР по показателям надёжности были заложены Исаевым Игорем Петровичем [234] в 50-е – 70-е годы 20-го века [41, 126, 240, 334]. Дальнейшее развитие теоретические основы ТОиР нашли в трудах А. В. Горского и А. А. Воробьёва [35, 36, 45 – 49]. В трудах этих авторов и их учеников предлагается метод оптимизации межремонтного пробега по целевой функции сокращения затрат на ТОиР. Такой подход имеет право на существование при условии сохранения или улучшения показателей надёжности локомотива, т.к. именно это (по определению системы ТОиР в стандарте) является целевой функцией оптимизации.

Главным показателем надёжности можно считать интенсивность отказов λ (раздел 2) [25, 26, 34]. Обычно интенсивность отказов $\lambda_{ту}$ задаётся в технических условиях на изделие, в т.ч. на оборудование локомотивов. В теории надёжности на жизненном цикле изделия (в т.ч. локомотивов) в зависимости от функции изменения интенсивности отказов λ во времени выделяют три основных этапа эксплуатации изделий (рисунок 1.23):

- приработочный этап – характеризуется высоким значением интенсивности из-за отказов по вине низкого качества производства, материалов и даже конструкции: $\lambda_1 \gg \lambda_{ту}$;
- этап нормальной эксплуатации – характеризуется примерно постоянным значением интенсивности отказов, примерно равным установленному значению: $\lambda_2 \approx \lambda_{ту} \approx const$;

- этап интенсивного старения – характеризуется возрастанием интенсивности отказов: $\lambda_3 \gg \lambda_{\text{ТУ}}$.

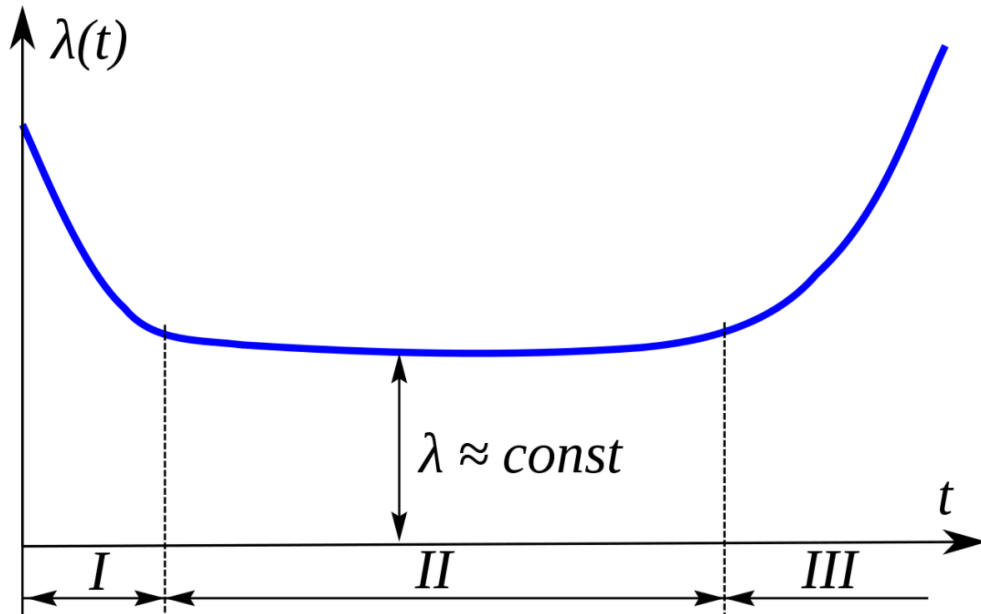


Рисунок 1.23 – Изменение интенсивности отказов на жизненном цикле изделия

Примечание: в теории надёжности изменение интенсивности отказов рассматривается во времени. В теории локомотивной тяги принято вместо времени (часы) рассматривать пробег локомотива (км, тыс. км и млн км).

Первый этап эксплуатации (приработочный) как правило – это этап гарантийного обслуживания. В научных кругах обсуждается возможность исключения этого этапа за счёт повышения качества производства, но в результате растёт стоимость изделия. В мировой практике исключения приработочного этапа и, как следствие, гарантийного периода нет.

Второй этап – это нормальный этап эксплуатации, который согласно стандарту предполагает проведение технического обслуживания (ТО). Применительно к локомотиву – это дозаправка песком, маслом, топливом (у тепловозов), смена тормозных колодок и щёток тяговых электродвигателей, очистка поверхностей оборудования и др. Но со временем наступает третий этап повышения интенсивности отказов: необходимо провести текущий ремонт (ТР) для восстановления работоспособности оборудования. Таким образом, ТО и ТР (ТОиР) позволяют продлить этап нормальной эксплуатации ($\lambda_2 \approx \lambda_{\text{ТУ}} \approx \text{const}$).

Таким образом, период нормальной эксплуатации жизненного цикла локомотива характеризуется постоянством интенсивности отказов оборудования

локомотивов на уровне паспортных данных и технических условий ($\lambda_2 \approx \lambda_{\text{ТУ}} \approx \text{const}$) с поддержанием надёжности через систему ТОиР.

У каждого оборудования локомотивов (дизель, электрические машины, электрические аппараты, механическое оборудование и экипажная часть, силовые и управляющие электрические цепи, силовая электроника, микропроцессорные системы и др.) имеется собственная продолжительность второго этапа Δt . Проведение ТО и ТР каждого вида оборудования требует своего времени захода в депо на ТОиР, что невозможно обеспечить. Таким образом, периодичность захода локомотивов на ТОиР носит характер компромисса.

Следует учесть, что время T_3 или пробег L_3 наступления этапа интенсивного старения ($\lambda_3 \gg \lambda_{\text{ТУ}}$), к наступлению которого локомотив должен быть поставлен на ТОиР в депо, носит случайный характер и подчиняется одному из законов распределения случайной величины. Самый популярный из них – нормальный закон (рисунок 1.24, таблица 1.2), характеризуемый математическим ожиданием M и среднеквадратичным отклонением σ . Функция распределения $f(l)$ для нормального закона также показана на рисунке 1.24. При этом вероятность P , что событие наступит в интервале от значений пробега локомотива определяется интегралом:

$$P = \int_{x_1}^{x_2} f(l) dl, \quad (2.24)$$

причём:

$$P = \int_{+\infty}^{-\infty} f(l) dl = 1. \quad (2.25)$$

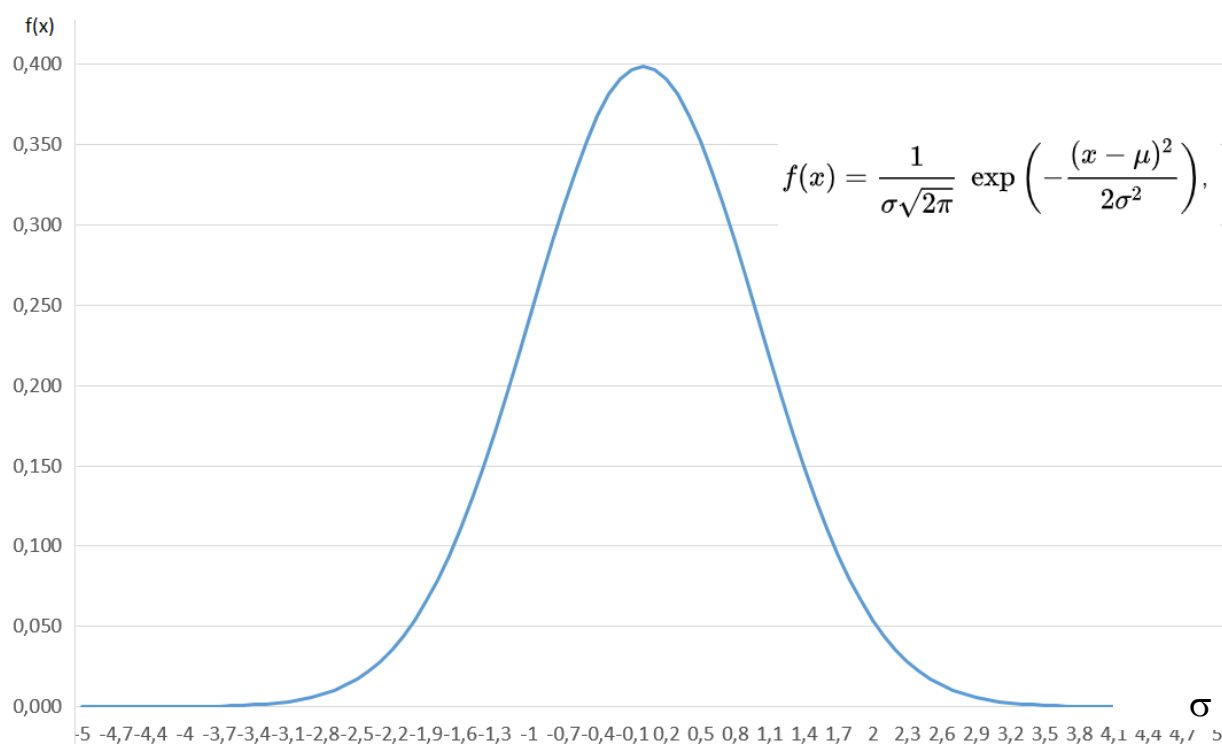


Рисунок 1.24 – Нормальное распределение случайной величины

Таблица 1.2 – Нормальное распределение и вероятность попадания в диапазон от $-\infty$ до x (в долях среднеквадратичного отклонения σ)

x , доли σ	$f(x)$	P	x , доли σ	$f(x)$	P
-5	0,0000015	0,0000001	0,5	0,3520653	0,691315
-4	0,0001338	0,000032	1	0,2419707	0,841143
-3	0,0044318	0,001361	1,5	0,1295176	0,933031
-2,5	0,0175283	0,006246	2	0,0539910	0,977160
-2	0,0539910	0,022840	2,5	0,0175283	0,993754
-1,5	0,1295176	0,066969	3	0,0044318	0,998639
-1	0,2419707	0,158857	4	0,0001338	0,999968
-0,5	0,3520653	0,308684	5	0,0000015	0,9999988
0	0,3989423	0,500000			

Оптимизации системы ТОиР посвящено достаточно большое число диссертаций, в которых, как правило, по заданной целевой функции (стоимости, продолжительности и периодичности ТОиР, надёжности локомотива и др.) решается задача поиска оптимума (экстремума целевой функции). Решение задачи оптимизации ТОиР по нескольким из перечисленных показателей практически полезного решения не имеет: на практике по-прежнему система ТОиР строится не по научно-обоснованным принципам, а исходя из существующего опыта эксплуатации локомотивов и их технического обслуживания и ремонта [273]. При

вероятностно-статистическом подходе к управлению ТОиР очевидно, что даже минимальные межремонтные пробеги (раздел 2) не гарантируют отсутствие отказов. Таким образом, всегда необходим компромисс между полезной работой локомотивов, их надёжностью, временем простоя на ТОиР и его стоимостью.

Таким образом, при планово-предупредительной системе технического обслуживания и ремонта всегда будут виды оборудования с избыточным ТОиР по причине проведения ТОиР по критическому оборудованию.

Следует отметить ещё одну проблему оптимизации ТОиР, которая стала особенно очевидной при разделении функций и ответственности за надёжность локомотивов между эксплуатацией, локомотивостроительными заводами, сервисным ТОиР и локомотиворемонтными заводами. Система ТОиР (периодичность, объём, производимые измерения и диагностирование, квалификация персонала и их число) задаётся заводом изготовителем в руководстве пользователя, изменение которой меняет ответственных за возможные отказы, несоблюдение параметров жизненного цикла локомотива. Ответственность за неудачные эксперименты затрудняет совершенствование системы по принципу цикла PDCA [15, 177]. Попытки сервисных компаний сокращения затрат на ТОиР и капитальный ремонт приводят к росту числа отказов, снижению надёжности локомотивов. Попытки ОАО «РЖД» повысить интенсивность эксплуатации локомотивов приводят как к появлению нарушений режимов эксплуатации, так и снижению ресурса оборудования локомотива. Попытки повысить эффективность ТОиР приводят к росту стоимости жизненного цикла локомотивов. Таким образом, задача управления жизненным циклом локомотивов не имеет простых решений.

Известный японский статистик Генити Тагути [158] с середины 20-го века изучал методы совершенствования промышленных процессов и продукции, применения математической статистики, в т.ч. при планировании эксперимента и контроле качества. В США методы Г. Тагути называли «Инжиниринг качества», основа которых понятие «функция потерь»: одновременное снижение расходов и повышение качества (рисунок 1.25). Экстремум суммы двух параболических графиков является оптимумом затрат на изготовление надёжного изделия и ТОиР жизненного цикла изделия.

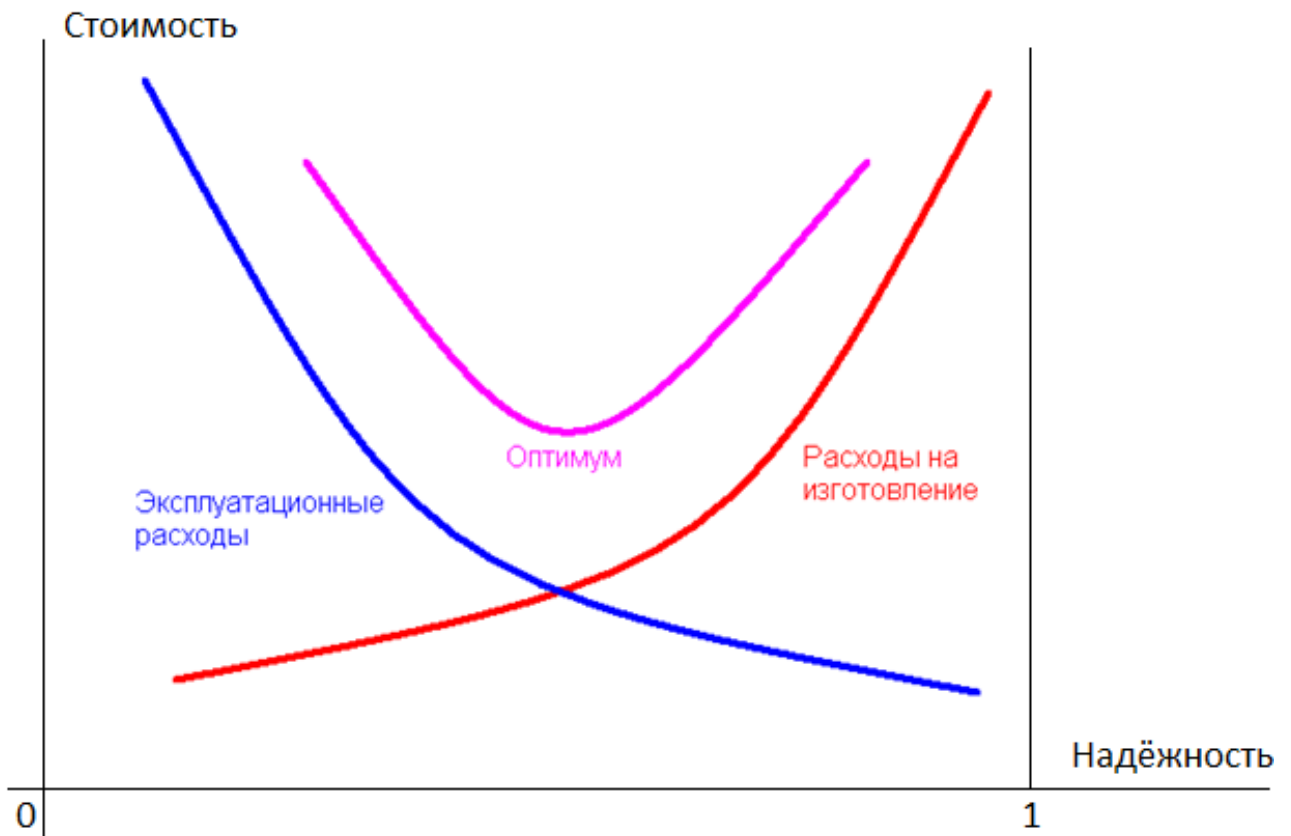


Рисунок 1.25 – Кривая оптимума затрат Г. Тагути

Построение кривой оптимума по рисунку 1.25 крайне затруднительно. Тем не менее, на кафедре «Электрическая тяга» МИИТ под руководством И. П. Исаева был выполнен такой расчёт для электровозов серии ВЛ60К Горьковской ж.д. Оптимум оказался при надёжности локомотива 20 отказов на 1 млн км пробега.

Таким образом, планово-предупредительная система ТОиР является основным способом поддержания надёжности и тяговых характеристик локомотивов на этапе эксплуатации его жизненного цикла. Системы диагностирования при этом должны снижать стоимость жизненного цикла локомотива на этапе его эксплуатации.

1.10.3 Роль систем диагностирования в организации обслуживания

Далее система ТОиР с использованием средств технического диагностирования рассмотрена с позиций теории и практики методического подхода Lean Production («Бережливое производство») [102, 399, 400], где выделяется 8 основных видов потерь. Для жизненного цикла локомотива на этапе его эксплуатации основными потерями являются следующие.

- 1 **Перепроизводство.** Приведённые в разделе 2 статистические доказательства показали, что парк локомотивов выше теоретически достаточного почти в два раза. Даже с учётом того, что потери могут быть второго рода (невозможно устранить сразу), потери этого вида существенны. В разделе 4 будет доказано, что именно устранение этого вида потерь даёт максимальный экономический эффект, при этом доказана роль автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД).
- 2 **Излишние запасы.** Применительно к локомотивному хозяйству – это как необходимость содержать резервный локомотивный парк, так и содержание резервного оборудования и узлов на складе. Диагностика с определением остаточного ресурса и применением математического аппарата теории очередей – основные методы борьбы с лишними запасами.
- 3 **Дефекты.** Низкая надёжность локомотивов требует содержание избыточного парка (раздел 1). Роль АСТД в устранении этого вида потерь является решающей, что будет показано в разделе 4 на примере станций реостатных испытаний, вибродиагностирования и др.
- 4 **Действия, не создающие ценности.** В этом смысле весь ТОиР не создаёт ценности, т.к. не осуществляет перевозки грузов и пассажиров. Но это в целом потери второго рода, от которых отказаться нельзя. А вот устранение лишних действий внутри системы ТОиР – большой резерв экономии. АСТД, как будет показано в разделах 3 и 4, существенная.
- 5 **Ожидание** ТОиР, ожидание работы, ожидание свободного перегона – всё это потери. Все виды ожидания приводят к существенным потерям, но в устранении этих потерь роль АСТД минимальна.
- 6 **Излишние передвижения** – это пересылки локомотива как из-за неравномерности перевозок в чётном и нечётном направлениях, так и в

локомотивное депо для внепланового ремонта после отказа. Внутри ТОиР – это изменение технологии ТОиР. В разделе 6 предложена универсальная ремонтная позиция, максимально сокращающая излишние передвижения, существенно влияющие на перепростой локомотивов в ремонтных депо.

- 7 **Транспортировка.** В основном эти потери проявляются при поставке запасных частей и материалов для ТОиР. В диссертации И. В. Пустового [235] доказано, что существующая система снабжения и логистики нерациональна: необходимо создание системы буферных региональных складов с использованием современного математического аппарата теории очередей, в основе которого статистические данные о математическом ожидании и среднеквадратичном отклонении как периодичности возникновения необходимости в запасной детали, так и времени её доставки, а также допустимая вероятность отсутствия необходимой детали.
- 8 **Интеллектуальные потери.** В японской Toyota Production System [399] выделяется 7 видов потерь. При освоении системы в США в Lean Production предложен восьмой вид потерь – нереализованный творческий потенциал сотрудников. Этот вид потерь существенен при организации управления жизненным циклом отечественных локомотивов: низкая зарплата специалистов, отсутствие правильно выстроенной системы мотивации, сокращение инженерно-технического персонала – эти и другие факторы приводят к большим интеллектуальным потерям.

Таким образом, организация системы ТОиР носит в основном характер накопленного десятилетиями опыта и нормируется эксплуатационными и ремонтными документами, входящими в состав технической документации каждого локомотива. Поэтому при построении перспективной модели ТОиР необходимо учесть методы Toyota Production Systems, Lean Production, Quality Management System и других систем, позволяющих повысить эффективность управления жизненным циклом локомотивов. Системы диагностирования повышают достоверность данных об остаточном ресурсе оборудования локомотивов.

1.11 ОБОСНОВАННЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам анализа опыта, накопленного зарубежными и отечественными компаниями организации ТОиР локомотивов на всём их жизненном цикле в диссертации, обосновано решение следующих задач.

- 1 Определение места систем технического диагностирования в системе технического обслуживания и ремонта локомотивов методом вероятностно-статистического анализа параметров эксплуатации, технического обслуживания и ремонта (ТОиР) локомотивов [278]. Описание решения задачи приведено во втором разделе.
- 2 Определение функциональности и принципа аппаратно-программного построения систем технического диагностирования локомотивов с позиций теории познания, информатики, автоматизированных систем управления, цифровизации и др., а также с точки зрения повышения эффективности ТОиР. Описание решения задачи приведено в третьем разделе.
- 3 Технико-экономическое обоснование модели управления жизненным циклом локомотивов [298] с использованием современных методов технического диагностирования с целью определения целесообразности применения автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД). Решение задачи приведено в четвёртом разделе [271].
- 4 Разработка системы поддержки принятия решений в системе ТОиР с АСТД с прогнозированием времени выдачи локомотива с ремонта с использованием вероятностно-статистического имитационного моделирования. Описание решения задачи приведено в пятом разделе.
- 5 Разработка единой функциональной модели управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования [298]. Описание решения задачи приведено в шестом разделе.
- 6 Разработка методики практической реализации предложенной модели управления жизненным циклом (раздел 7).
- 7 Практическая проверка эффективности модели. Решение задачи описано в разделе 7.

1.12 ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 1

- 1 Поставленные в Долгосрочной программе развития ОАО «РЖД» до 2025 года задачи предполагают интенсивный путь развития транспорта.
- 2 Инновационное развитие локомотивного и локомотиворемонтного комплексов является одним из основополагающих в развитии отечественного железнодорожного транспорта, в т.ч. в области сервисного технического обслуживания и ремонта (ТОиР), диагностирования и управления жизненным циклом, снижения его стоимости.
- 3 Отечественный и зарубежный локомотиворемонтные комплексы переходят на сервисное обслуживание и контракт жизненного цикла с целью существенного повышения надёжности локомотивов, сокращения простоев на ТОиР, сокращения стоимости их жизненного цикла.
- 4 Дальнейший этап автоматизации управления движением поездов предполагает создание киберфизических производственных систем (CPPS), объединяющий все до этого самостоятельно развивавшиеся направления (АСУЖТ, СЦБ, МСУ локомотивов, АСУ ТОиР и т.д.) в единую автоматизированную систему управления «Цифровая железная дорога», в которую входят и АСУ локомотивного и локомотиворемонтного комплексов. Внедрение автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) – неотъемлемая часть этой киберфизической системы.
- 5 В локомотиворемонтном комплексе есть тренд использования данных бортовых автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) при планировании порядка проведения и объема ремонта. При этом остаётся потребность в депокских системах диагностирования. Необходимо распределить функциональность АСТД.
- 6 Необходимо разработать методы организации ТОиР локомотивов, которые обеспечат их надёжную работу при установленном уровне затрат на ТОиР, при этом учесть накопленный отечественный и зарубежный опыт.
- 7 Поставленная цель разработки модели управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования является актуальной.

2 СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЛОКОМОТИВОВ

2.1 АНАЛИЗ ПОЛЕЗНОЙ РАБОТЫ ЛОКОМОТИВОВ

2.1.1 Методика анализа эффективности эксплуатации

Для анализа резервов повышения использования локомотивов выполнен анализ потерь времени при эксплуатации и обслуживании локомотивов по предлагаемому алгоритму (рисунок 2.1) [265, 272, 279, 286, 294, 295].

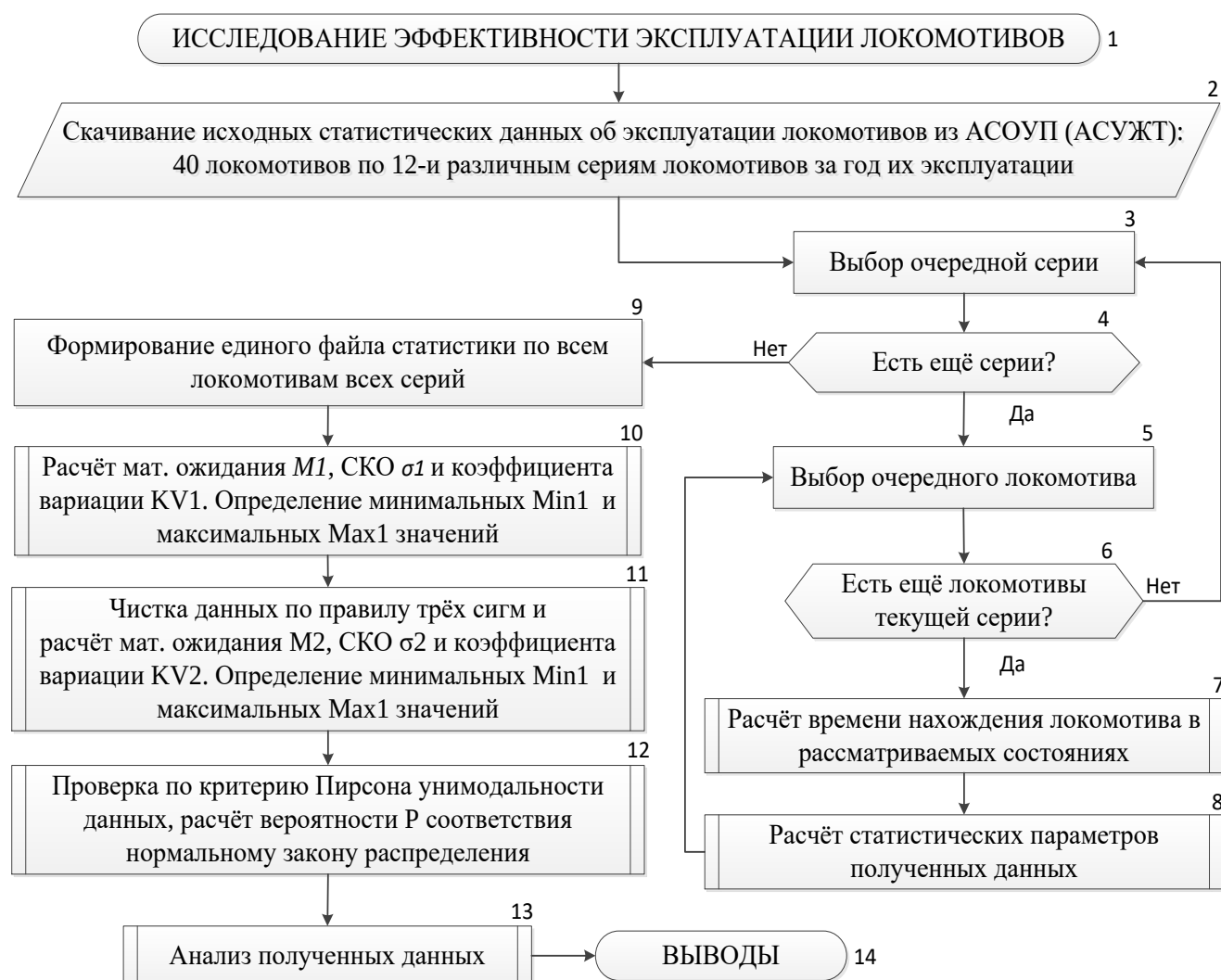


Рисунок 2.1 – Алгоритм анализа эффективности эксплуатации локомотивов

Вначале исследования [296] (блок 2) исходные данные об эксплуатации локомотивов были скачаны в Excel-таблицы из информационной системы ОАО «РЖД» «Автоматизированная система оперативного управления поездами» (АСОУП) [6, 215, 273, 288, 296]. Исходные данные имеют структуру согласно таблице 2.1. Рассмотренные серии локомотив приведены в таблице 2.2: электровозы

переменного тока – 5 серий, электровозы постоянного тока – 3 грузовые тепловозы – 4 серии [5, 205, 273]. Рассмотрены 12 основных эксплуатируемых в ОАО «РЖД» серий локомотивов, по каждой из которых взято по 40 случайным образом выбранных локомотива (выборка более 30 считается «большой») за 400 – 500 дней их эксплуатации (полный годовой цикл): с марта 2017 по июль 2018 года. Общее число исходных данных превышает 4,8 млн событий (10 – 14 тыс. событий АСОУП по 40 локомотивам по 12 сериям) [265, 279, 286, 294, 295].

Таблица 2.1 – Информации о локомотивах в АСОУП [271]

ТПС	Серия	№	Секция	Дата и время операции	Код состояния	Состояние	Тип состояния	Время, мин
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	20.03.2017 20:46	102	ПРОСТ.ПРИБ	Исправное	74
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	20.03.2017 22:00	1	ГОЛ.П	Исправное	17
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	20.03.2017 22:17	1	ГОЛ.П	Исправное	50
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	20.03.2017 23:07	1	ГОЛ.П	Исправное	123
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	21.03.2017 1:10	1	ГОЛ.П	Исправное	2
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	21.03.2017 1:12	1	ГОЛ.П	Исправное	2
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	21.03.2017 1:14	1	ГОЛ.П	Исправное	1
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	21.03.2017 1:15	102	ПРОСТ.ПРИБ	Исправное	34
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	21.03.2017 1:49	113	СДАЧА БРГ.	Исправное	14
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	21.03.2017 2:03	112	АВТ.ЗАХ.ТЧ	Исправное	16
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	21.03.2017 2:19	105	ОЖ.РАБОТЫ	Исправное	239
2ЭС5К №129/150	2ЭС5К	150	А	21.03.2017 6:18	114	ПРИЕМ БРГ.	Исправное	107

Затем (блоки 3 – 8) последовательно по каждому локомотиву каждой серии выполнена обработка исходных данных с помощью специально написанной программы [260, 265, 271, 279, 286, 294, 295] на встроенном в Excel языке программирования VBA (Visual Basic for Applications) [373]: вычислено общее время нахождения локомотива в различных состояниях, характеризующих эффективность тяги поездов и затраты времени на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) (таблица 2.3).

В результате обработки данных по каждому локомотиву получены следующие данные: общее время в эксплуатации и в ремонте (в минутах и %), нахождение в каждом состоянии (в минутах и %), фрагмент которой приведён в таблице 2.4 (блок 9) [273, 271].

Таблица 2.2 – Обоснование выбора серий локомотивов для анализа [273]

№ п/п	Серия	Тип ТПС	Обоснование выбора
Электровозы переменного тока			
1	ВЛ80С	8 осей, 2 секции	Самый массовый электровоз переменного тока. Выпуск: 1961 – 1995. 4921 шт.
2	ВЛ80Р	8 осей, 2 секции	Первый электровоз с ВИП. Выпуск: 1974 – 1986. 373 шт.
3	ВЛ85	12 осей, 2 секции	Первый электровоз с ВИП и АСУ. Один из самых мощных. Выпуск: 1983 – 1994. 373 шт.
4	2ЭС5К	8 осей, 2 секции	Современный электровоз с МСУ. Выпуск: с 2004. 345 шт.
5	3ЭС5К	12 осей, 3 секции	Современный электровоз с МСУ. Выпуск: с 2006. 895 шт.
Электровозы постоянного тока			
6	ВЛ10	8 осей, 2 секции	Самый массовый электровоз постоянного тока. Выпуск: 1961 – 1977. 1902 шт. (модификации – до 1985. 982 шт.).
7	2ЭС4К	8 осей, 2 секции	Современный электровоз с МСУ. Выпуск: с 2006. 148 шт.
8	3ЭС4К	12 осей, 3 секции	Современный электровоз с МСУ. Выпуск: с 2014. 55 шт.
Тепловозы			
9	2ТЭ10МК	12 осей, 2 секции	Представитель самого массового тепловоза типа ТЭ10. После капитального ремонта оснащён МСУ. Основной локомотив на БАМ. Выпуск ТЭ10: 1958-2007. 19 тыс. секций
10	3ТЭ10МК	12 осей, 3 секции	смотри 2ТЭ10МК
11	2ТЭ116У	12 осей, 2 секции	Практически современный тепловоз с МСУ. Выпуск: 2007 - 2015. 472 шт.
12	2ТЭ25КМ	12 осей, 2 секции	Современный тепловоз с МСУ. Выпуск: с 2014. 321 шт.

На рисунке 2.2 показаны примеры гистограмм распределения времени нахождения локомотивов в различных состояниях. Статистическая обработка данных (таблица 2.4) выполнена специально написанной автором программы [79].

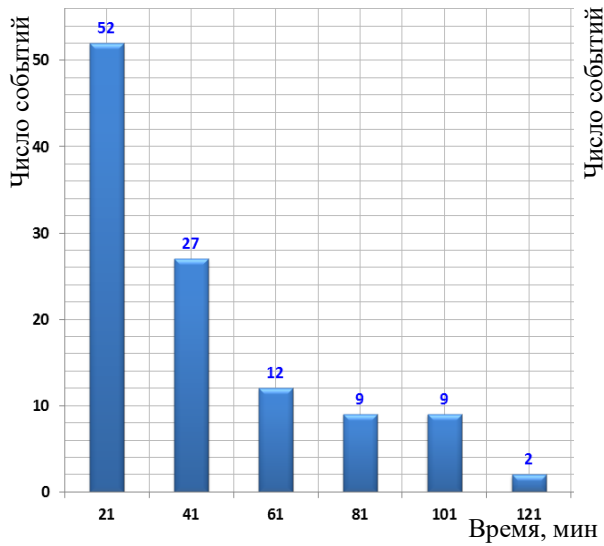
При этом использованы статистические методы, закреплённые на уровне национальных стандартов [78 – 80]. По каждому рассмотренному состоянию локомотива в эксплуатации (таблица 2.3) $i \in [1, 15]$ локомотивов каждой серии $j \in [1, 12]$ для выборки M_{ijk} ($k \in [1, 40]$) рассчитаны математические ожидания M_{1ij} , среднеквадратичные отклонения σ_{ij} и коэффициент вариации K_{vij} (блок 10) с использованием известных формул [25, 26, 34, 113, 186]:

Таблица 2.3 – Рассмотренные коды состояний локомотивов [271]

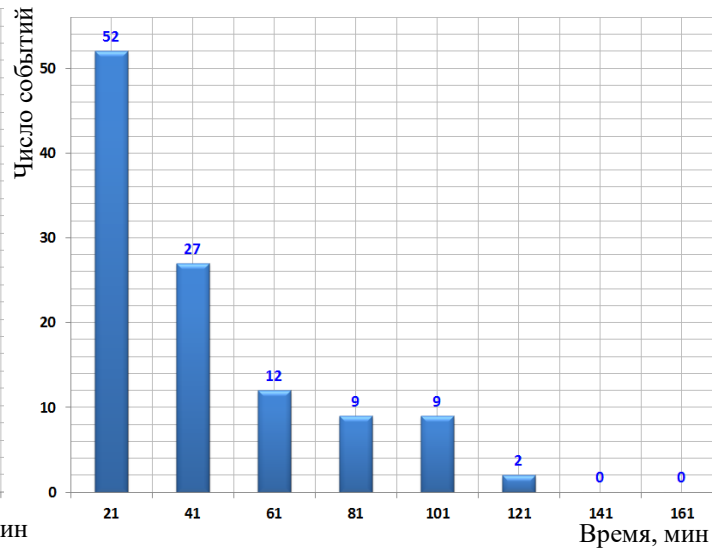
Название состояния	Расшифровка названия	Тип состояния	Обоснование
ГОЛ.П	Тяга в голове поезда	Исправное	Основное состояние, в котором локомотив должен находиться как можно дольше при эксплуатации
ОЖ. РАБОТЫ	Ожидание работы	Исправное	Основной вид потерь при эксплуатации локомотива
ТО-2	Обслуживание на ПТОЛ	ТОиР	Самый массовый вид ТОиР
ОЖ.ТО2	Ожидание ТО-2	Исправное	Один из основных видов потерь при ТОиР
ТР-1	Обслуживание в объёме ТР-1	ТОиР	Планово-предупреди-тельный ремонт
ТР-2	Обслуживание в объёме ТР-2	ТОиР	Планово-предупреди-тельный ремонт
ТР-3	Обслуживание в объёме ТР-3	ТОиР	Планово-предупредительный ремонт
ТО-4	Обточка колёсных пар в депо	ТОиР	Производиться по состоянию бандажей
ТР+ТО4	Обточка и ТР	ТОиР	Совмещённые два вида обслуживания
ОЖ.ПЕР.РЕМ	Ожидание ремонта	ТОиР	Важно для экономии времени локомотива
НЕПЛ.РЕМ.	Неплановый ремонт (НР)	НР	Потери из-за низкой надёжности локомотивов
ОЖ.НЕП.РЕМ	Ожидание НР	НР	Вид потерь, которые можно сократить

Таблица 2.4 – Фрагмент таблицы обработанных данных по серии 3ЭС5К

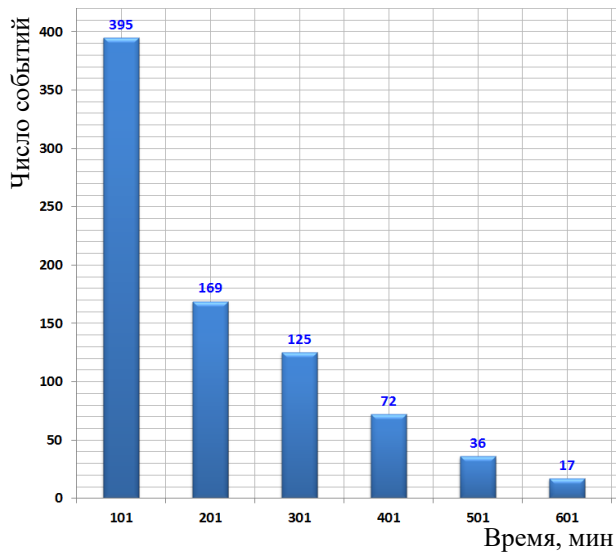
№ п/п	Локомотив	Время наблюдения, сутки	Средне суточный пробег, км	Процент времени на обслуживании	ГОЛ.П, %	ОЖ. РАБОТЫ, %
1	3ЭС5К №1	487	510	20,17 %	58,55 %	3,84 %
2	3ЭС5К №20	487	552	18,00 %	63,31 %	3,07 %
3	3ЭС5К №33	487	415	15,71 %	8,92 %	4,71 %
4	3ЭС5К №55	487	544	18,34 %	61,88 %	2,55 %
5	3ЭС5К №77	494	466	13,57 %	29,17 %	5,16 %
6	3ЭС5К №88	487	529	18,55 %	61,94 %	2,57 %
7	3ЭС5К №100	487	603	10,34 %	70,32 %	2,50 %
8	3ЭС5К №144	487	620	10,10 %	69,46 %	2,54 %
9	3ЭС5К №177	487	590	10,04 %	69,77 %	2,89 %
10	3ЭС5К №200	487	611	7,73 %	71,92 %	2,81 %
11	3ЭС5К №222	488	535	18,80 %	61,47 %	2,87 %



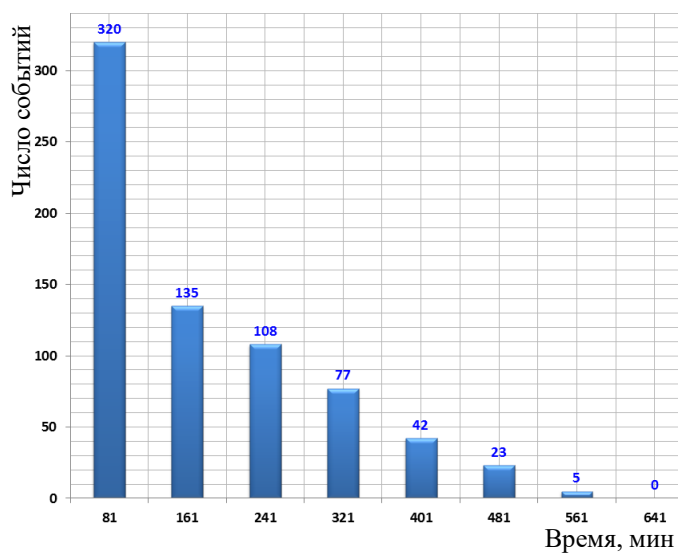
а - ТО-2 ВЛ80Р-1777



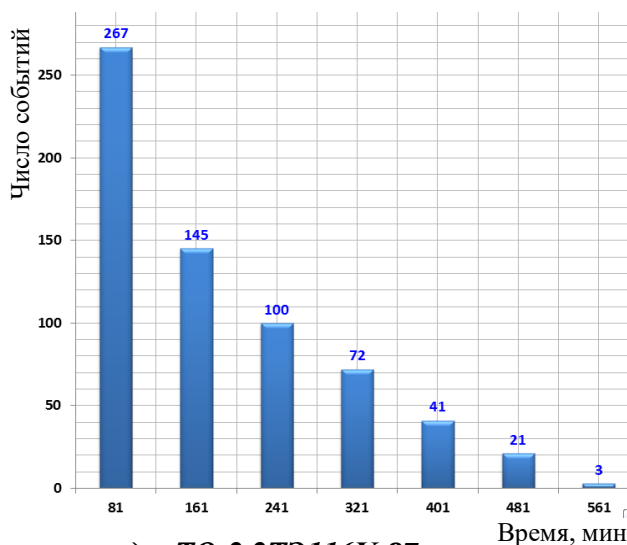
б – Ожидание ТО-2 ВЛ80Р-1777



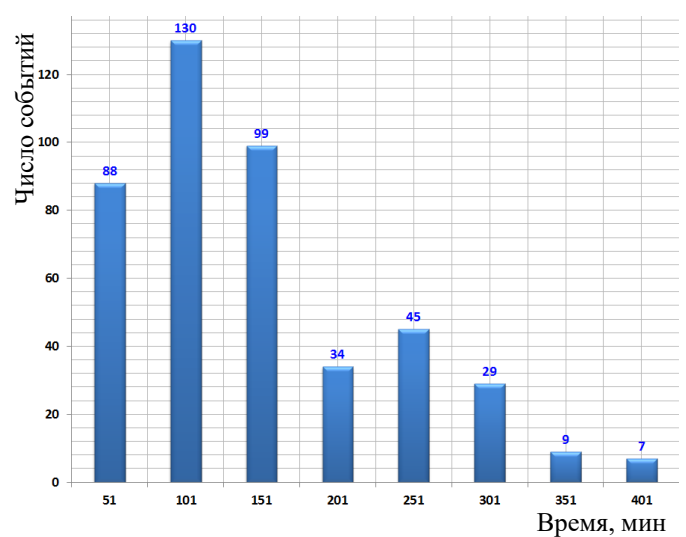
в – Ожидание работы 2ЭС4К-138



г – Ожидание ТО-2 2ЭС4К-138



д – ТО-2 2ТЭ116У-87



е – ТО-2 3ТЭ10МК-1389

Рисунок 2.2 – Примеры гистограмм распределения времени нахождения локомотивов в различных состояниях по данным за год [296]

$$M_{1ij} = \frac{1}{40} \sum_{k=1}^{40} M_{1ijk}, \quad (2.1)$$

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{1}{39} \sum_{k=1}^{40} (M_{1ijk} - M_{1ij})^2}, \quad (2.2)$$

$$K_{vij} = \sigma_{ij} / M_{1ij}. \quad (2.3)$$

За время наблюдения отдельные экземпляры локомотивов имели длительный простой в неисправном парке по причине нахождения в запасе или другим. Поэтому, после расчёта математического ожидания и СКО проведена дополнительная фильтрация данных по «правилу трёх сигм»:

$$M_{1ij} - 3 \cdot \sigma_{ij} \leq M_{1ijk} \leq M_{1ij} + 3 \cdot \sigma_{ij}. \quad (2.4)$$

Исходная выборка локомотивов $K_1 = 40$ уменьшилась до $K_{2ij} \in \{38, 40\}$ или $K_{2ij} = 0$ (если рассматриваемого типа ТООР не было). Соответственно, для выборки K_{2ij} выполнен повторный расчёт M_{2ij} , СКО σ_{2ij} и K_{v2ij} по формулам 1 – 3 (блок 11). Затем выполнен расчёт χ^2_{ij} согласно критерию согласия Пирсона или Колмогорова-Смирнова (блок 12). Оптимальный диапазон разбиения для построения гистограммы оказался $\Delta_n = 7$ ($n \in \{1, 7\}$) [265, 279, 286, 294, 295]:

$$\chi^2_{ij} = \sum_{n=1}^7 \frac{(N_{ijn} - N_{теорijn})^2}{N_{теорijn}}, \quad (2.5)$$

где: N_{ijn} – фактическое число попаданий в диапазон n ;

$N_{теорijn}$ – теоретическое ожидаемое число попаданий в диапазон n :

$$N_{теорijn} = K_2 \cdot P_n, \quad (2.6)$$

где: P_n – теоретическая вероятность попадания в диапазон n , которая вычислялась как площадь криволинейной трапеции через сумму площадей $m = 1000$ прямоугольников, на которые разбивался каждый диапазон Δ_n :

$$P_n = \Delta_n \cdot \sum_{n=1}^{1000} \frac{1}{\sigma_{2ij} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_n - M_2)^2}{2\sigma_{2ij}^2}\right). \quad (2.7)$$

По полученному значению χ^2 по таблице критериев Пирсона выбрана вероятность P соответствия нормальному закону распределения случайной величины для оценки достоверности полученных результатов: выборку можно считать унимодальной и пригодной для анализа при $P > 0,3$.

Критерий Пирсона имеет существенный для исследования недостаток – его зависимость от объёма выборки. Пример: пусть в первой выборке у очередного диапазона i имеется 10 попаданий при теоретическом 12 (20 % отличие), у второй и третьей – тоже 20 % отклонение, но при другом числе наблюдений: 100 и 120, 1000 и 1200. Внешне эти распределения будут выглядеть одинаково, а χ^2 будет существенно отличаться:

$$\text{выборка 1: } (10 - 12)^2 / 12 = 0.333; \quad (2.8)$$

$$\text{выборка 2: } (100 - 120)^2 / 120 = 3,333; \quad (2.9)$$

$$\text{выборка 3: } (1000 - 1200)^2 / 1200 = 33,333. \quad (2.10)$$

Такое свойство критерия Пирсона абсолютно справедливо для «чистых» процессов, строго подчиняющихся закону больших чисел [25, 26]. При рассмотрении процессов ТООР исходные данные всегда зашумлены [1, 152]. Например, на время простоя на ремонте могут влиять внеплановые работы, нарушая экспоненциальность времени простоя. Но при этом сами внеплановые работы также подчиняются определённой закономерности, поэтому отклонение времени простоя от экспоненты будет иметь фиксированный процент, что при 100 наблюдениях, что при 1000. При этом показатель χ^2 будет разным. Именно поэтому при рассмотрении зашумлённой информации более предпочтительным является критерий Колмогорова-Смирнова [25, 26], при котором для выборки N из всех разниц Δ_i между фактической интенсивностью попадания $f_{\phi i}$ и теоретической f_{mi} выбирают максимальную (использован подход сравнения двух выборок):

$$\Delta_{\max} = \text{Max}(f_{\phi i} - f_{mi}), \quad (2.11)$$

где: $f_{\phi i} = N_i / N$;

$$f_{mi} = N_{mi} / N_m;$$

N_i – число фактических попаданий в диапазон i ;

N – размер эмпирической выборки;

N_{mi} – число теоретических попаданий в диапазон i ;

N_m – размер контрольной выборки ($N_m = N$).

Далее по максимальному отклонению $\Delta_{\max}$ вычисляется фактический показатель D_ϕ , для расчёта которого имеются несколько формул [25, 26]. Для

решаемой задачи и объема выборки $N > 20$ выбрана формула критерия Колмогорова для нормального закона распределения случайной величины:

$$D_\phi = \Delta_{\max} \cdot (N^{0,5} - 0,01 + 0,85 / N^{0,5}). \quad (2.12)$$

Далее, по таблице критерия Колмогорова-Смирнова находится вероятность соответствия нормальному закону распределения случайной величины P по критерию минимального отклонения теоретического параметра из таблицы D_m от рассчитанного D_ϕ [374]:

$$P \cong \text{Min} (D_{mi} - D_\phi). \quad (2.13)$$

Дополнительно выполнен анализ взаимосвязи показателей работы локомотивов с использованием коэффициента корреляции $r_{ij} \in [-1, +1]$ параметров групп i и j рассмотренных серий локомотивов:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^{12} (M_{ik} - M_i)(M_{jk} - M_j)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{12} (M_{ik} - M_i)^2 \sum_{n=1}^{12} (M_{jk} - M_j)^2}}, \quad (2.14)$$

где: M_i и M_j – математические ожидания параметров i и j ;

M_{ik} и M_{jk} – значения параметров i и j по локомотиву $k \in [1, 12]$.

Таким образом, при анализе эффективности эксплуатации отечественных локомотивов применены известные хорошо апробированные вероятностно-статистические методы исследования.

Далее приведены результаты исследований, выполненных по предлагаемой методике: по полезной работе локомотива в голове поезда, нахождении на техническом обслуживании и ремонте.

2.1.2 Тяга в голове поезда (полезная работа локомотива)

Согласно кодировке состояний локомотива системы АСОУП [6] локомотив может находиться более чем в ста различных состояниях: эксплуатационных исправных (тяга поезда, ожидание работы, перемещение, приёмка и др.) и неисправных (ожидание ТОиР, ТОиР, перемещение в ТОиР и др.) [265, 279, 286, 294, 295].

Полезную работу локомотив совершает только в состоянии с кодом 1 - тяга поезда в голове поезда («ГОЛ.П»). Остальные состояния по сути являются вспомогательными: ожидание работы, приёмка локомотива, обслуживание, экипировка – всё это плановые или внеплановые потери рабочего времени локомотива (согласно Lean Production – потери первого и второго рода) [265, 279, 286, 294, 295].

Для оценки надёжной работы локомотивов в ОАО «РЖД» принят коэффициент технической готовности $K_{ТГ}$, вычисляемый как отношение времени эксплуатации к общему времени локомотива. Но $K_{ТГ}$ не учитывает эффективность самой эксплуатации локомотива, поэтому предлагается ввести понятие «Коэффициент (процент) полезной работы» $K_{АП}$ [296].

$$K_{АП} = T_{тяга} / \Sigma T_i \quad (2.15)$$

или

$$K_{АП} = 100 \% \cdot T_{тяга} / \Sigma T_i, \quad (2.16)$$

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

ΣT_i – общее время жизненного цикла локомотива за рассматриваемый период.

В таблице 2.5 приведены результаты расчёта процента нахождения локомотивов рассматриваемых серий в состоянии тяги в голове поезда [296].

Таблица 2.5 – Коэффициент полезной работы локомотивов $K_{АП}$ [296, 273]

Серия	K2	$K_{АП}$	σ	Kv	Min2	Max2	χ^2	P
ВЛ80С	40	53,2 %	14,2	0,3	18,1 %	73,2 %	8,7	0,05
ВЛ80Р	39	64,9 %	5,4	0,1	53,5 %	73,1 %	7,4	0,1
ВЛ85	39	71,4 %	3,6	0,1	60,7 %	76,2 %	19,9	0
2ЭС5К	40	44,3 %	12,8	0,3	16,3 %	71,0 %	3,3	0,5
3ЭС5К	39	66,2 %	8,1	0,1	29,2 %	76,2 %	290,3	0
ВЛ10	40	40,4 %	13,2	0,3	7,6 %	52,2 %	42,5	0
2ЭС4К	40	32,8 %	11,2	0,3	4,7 %	50,5 %	8,1	0,05
3ЭС4К	40	50,6 %	6,9	0,1	33,7 %	57,8 %	23,1	0
2ТЭ10МК	40	34,4 %	12,3	0,4	14,3 %	56,8 %	8,0	0,05
3ТЭ10МК	40	37,4 %	13,0	0,3	4,8 %	55,5 %	13,5	0,001
2ТЭ116У	40	40,5 %	10,9	0,3	14,8 %	57,5 %	11,8	0,01
2ТЭ25КМ	40	40,9 %	7,0	0,2	24,2 %	49,5 %	14,5	0,001
По всем сериям		48,1 %				76,2 %		

По данным таблицы 2.5 установлено следующее [265, 273, 279, 286, 294, 295].

- 1 В среднем полезная работа локомотива составляет менее 50% общего времени его жизненного цикла. Самый низкий процент у тепловозов – в среднем $K_{АП} = 38,3 \%$, но по отдельным тепловозам достигал за год $K_{АП} = 57,5 \%$. Самый высокий – у электровозов переменного тока: в среднем $K_{АП} = 60 \%$, при этом по отдельным электровозам достигал $K_{АП} = 76,2 \%$. Таким образом, согласно практически достигнутым результатам, полезную работу локомотивов можно поднять на 20 – 25 % за счёт лучшей организации перевозочного процесса.
- 2 Полученные данные нельзя считать унимодальными, причиной чему являются различные условия эксплуатации локомотивов в течение года. Относительно унимодальными являются данные по локомотивам серии 2ЭС5К ($P = 0,5$), занятых в местной и вывозной работе.
- 3 Самой эффективной является эксплуатация локомотивов серии ВЛ85 ($K_{АП} = 71,4 \%$ при максимальном $K_{АП} = 76,2 \%$).
- 4 Сравнение лучших показателей эффективности эксплуатации локомотивов со средними показывает, что резерв повышения эффективности эксплуатации локомотивов $\Delta K_{АП}$ составляет в среднем $\Delta K_{АП} = 14,4 \%$. Даже повышение эффективности эксплуатации локомотивов на $\Delta K_{АП} = 10 \%$ позволит высвободить не менее 1,5 тыс. локомотивов.

5 С ростом процента полезной работы уменьшается среднеквадратичное отклонение параметра с коэффициентом корреляции $r = -0,42$. Это подтверждает, что упорядочивание перевозочного процесса повышает эффективность тяги. Но при этом связь между процентом полезной работы и соответствием нормальному закону отсутствует: $r = -0,07$.

Таким образом, первый существенный резерв повышения эффективности эксплуатации локомотивов заключается в улучшении организации перевозочного процесса и увеличении времени нахождения в состоянии «Тяга поезда» до 70 % [296, 273].

$$\Delta K_{\text{АП}} = 20 \%. \quad (2.17)$$

Второй показатель, характеризующий эффективность эксплуатации локомотивов – это среднесуточный пробег, результаты анализа которого приведены в таблице 2.6 [296].

Таблица 2.6 – Среднесуточный пробег локомотивов [395]

Серия	K2	Средне- суточный пробег, км	σ	Kv	Min2	Max2	χ^2	P
ВЛ80С	40	452	126	0,28	204	735	3,1	0,5
ВЛ80Р	39	569	40	0,07	473	631	4,7	0,3
ВЛ85	40	603	33	0,05	509	643	22,1	0
2ЭС5К	40	379	116	0,31	114	594	19,0	0
3ЭС5К	39	578	44	0,08	466	643	7,2	0,1
ВЛ10	40	306	99	0,32	63	385	45,0	0
2ЭС4К	40	238	81	0,34	40	373	10,8	0,02
3ЭС4К	40	391	96	0,25	190	485	50,4	0
2ТЭ10МК	40	276	105	0,38	124	465	17,6	0,001
3ТЭ10МК	40	293	56	0,19	154	370	6,6	0,1
2ТЭ116У	40	329	93	0,28	116	460	9,6	0,02
2ТЭ25КМ	40	340	63	0,18	191	449	16,8	0,001

Данные по пробегам аналогичны данным по проценту тяги в голове поезда [296]. Это подтверждается и коэффициентом корреляции между этими двумя параметрами, который практически равен 100 %: $r = 0,993$. При этом соответствие нормальному закону выше. Но параметр «В голове поезда» является более удобным, т.к. позволяет сравнивать эффективность тяги по различным сериям

локомотивов различных полигонов вне зависимости от установившегося среднесуточного пробега.

Таким образом, важным информативным показателем оценки эффективности эксплуатации локомотивов является процент нахождения локомотива в состоянии «В голове поезда». Показатель «Среднесуточный пробег» не универсален т.к. существенно зависит от серии локомотива и полигона его эксплуатации [296, 273].

Важный вид эксплуатационных потерь происходит в состоянии «Ожидание работы». В этом состоянии локомотив исправен, полностью готов к работе, но не участвует в движении. Из таблицы 2.7 видно, что время ожидания тяги может превышать 10 % и составлять до 40 % от полезной работы [296].

Таблица 2.7 – Процент времени в состоянии «Ожидание работы» [296, 273]

Серия	Ож. работы	σ	Kv	Min	Max	Тяга	Доля ожидания работы от тяги
ВЛ80С	4,6%	1,46	0,32	1,6 %	8,9 %	53,2 %	8,6 %
ВЛ80Р	2,7%	1,04	0,38	1,3 %	4,9 %	64,9 %	4,2 %
ВЛ85	1,8%	0,45	0,25	1,2 %	3,2 %	71,4 %	2,5 %
2ЭС5К	6,5%	3,20	0,49	1,7 %	13,9 %	44,3 %	14,7 %
3ЭС5К	2,9%	0,69	0,24	1,9 %	5,2 %	66,2 %	4,4 %
ВЛ10	9,4%	3,16	0,34	2,0 %	16,4 %	40,4 %	23,3 %
2ЭС4К	13,2%	6,06	0,46	3,4 %	26,8 %	32,8 %	40,2 %
3ЭС4К	9,1%	2,99	0,33	5,1 %	15,4 %	50,6 %	18,0 %
2ТЭ10МК	9,7%	5,55	0,57	1,5 %	27,8 %	34,4 %	28,2 %
3ТЭ10МК	6,1%	2,39	0,39	3,6 %	14,2 %	37,4 %	16,3 %
2ТЭ116У	7,2%	2,93	0,41	2,9 %	13,7 %	40,5 %	17,8 %
2ТЭ25КМ	10,9%	3,78	0,35	5,4 %	20,0 %	40,9 %	26,7 %

Таким образом, повысить эффективность эксплуатации локомотивов за счёт сокращения простоя в ожидании работы возможно [296, 273]:

- по электровозам переменного тока: на 2 %;
- по электровозам постоянного тока: на 3 %;
- по тепловозам: на 10 %.

По полученным в результате расчёта результатам можно предполагать возможность увеличения времени полезной работы $\Delta K_{\text{АПОЖРАБ}}$ [296, 273]:

$$\Delta K_{\text{АПОЖРАБ}} = 10 \% \cdot 0,5 = 5 \%. \quad (2.18)$$

2.1.3 Техническое обслуживание и ремонт

Как статистически доказано, коэффициент эффективности эксплуатации $K_{АП}$ можно повысить на 20 % улучшением управления процессами перевозок. Далее рассмотрен следующий резерв – повышение эффективности технического обслуживания и ремонта локомотивов (ТОиР). В качестве самого общего показателя взят процент нахождения локомотивов во всех состояниях, связанных с ТОиР (таблица 2.8) [265, 294, 295, 273].

Таблица 2.8 – Доля ТОиР в общем бюджете локомотива [296, 273]

Серия	K2	ТОиР	σ	K_v	Min	Max	χ^2	P
ВЛ80С	38	10,4%	3,74	0,36	4,1%	20,1%	4,7	0,3
ВЛ80Р	39	10,8%	2,07	0,19	6,6%	14,6%	1,7	0,7
ВЛ85	39	10,4%	1,94	0,19	6,0%	14,4%	2,2	0,7
2ЭС5К	39	10,5%	4,59	0,44	2,9%	20,4%	6,7	0,1
3ЭС5К	40	9,8%	3,86	0,39	4,7%	18,5%	10,8	0,02
ВЛ10	39	12,9%	6,63	0,51	2,5%	30,8%	14,7	0,001
2ЭС4К	40	16,7%	6,87	0,41	5,1%	37,1%	5,4	0,2
3ЭС4К	39	11,8%	5,16	0,44	5,8%	26,5%	10,8	0,02
2ТЭ10МК	40	20,4%	7,29	0,36	5,4%	36,8%	2,3	0,5
3ТЭ10МК	40	25,3%	9,46	0,37	10,2%	51,9%	6,0	0,1
2ТЭ116У	39	18,5%	6,42	0,35	8,2%	33,6%	2,1	0,7
2ТЭ25КМ	39	14,9%	4,22	0,28	6,7%	23,9%	7,8	0,05

Таким образом [265, 273, 279, 286, 294, 295, 296] следуют следующие выводы.

- 1 Соответствие нормальному закону (унимодалность) достаточно высокое у электровозов переменного тока старых серий: ВЛ80 и ВЛ85. Также низкий коэффициент вариации. У новых серий 2ЭС5К и 3ЭС5К продолжается отладка технологических процессов ТОиР, из-за чего процесс мультимодален. У тепловозов и электровозов постоянного тока унимодалность практически отсутствует, что связано с наличием неплановых ремонтов и сверхцикловых работ. Об этом же свидетельствует высокий коэффициент вариации. Примечание: далее вероятность нормальному закону не приводится.
- 2 Процент времени на ТОиР существенно превышает ожидаемые в перспективе 5 % [133, 329] и составляет от 11,6 до 37,1 процентов [273].

- 3 Наименьший простой на ТОиР имеют электровозы переменного тока: 10,5 %. Это свидетельствует как о надёжности этих локомотивов, так и об отлаженности за последние десятилетия технологии их ТОиР [273].
- 4 Имеются претенденты по отдельным локомотивам, когда среднегодовой простой на ТОиР (по данным за 400 дней) был меньше целевых 5 % – это электровозы серий ВЛ80С (4,1 %), 3ЭС5К (4,7 %) и ВЛ10 (2,5 %). Есть примеры, когда простой близок к 5 %: 2ЭС4К (5,1 %), 3ЭС4К (5,8 %), 2ТЭ10МК (5,4 %). Таким образом, сокращение простоя по электровозам переменного тока до 5 % следует считать теоретически достижимым [273].
- 5 Простой на ТОиР существенно влияет на среднесуточный пробег локомотивов и процент нахождения в тяге ($r = -0,87$) [273].
- 6 У тепловозов новых серий простой на ТОиР существенно ниже, чем у тепловозов старых серий: 2ТЭ116У – 18,5 %, 2ТЭ25КМ – 14,9 %. При этом простой остаётся недопустимо высоким [273].
- 7 Расчёты показали, что существенную долю в проценте простоя на ТОиР составляет ожидание ТОиР. В таблице 2.9 приведен процент простоя в ожидании различных видов ремонта и общий процент простоя в состоянии ожидания ремонта (третий столбец справа) и составляет от 5 % до 19,6 %! При этом в общем времени, затраченном на ТОиР, ожидание ТОиР составляет в среднем (даже без учёта 2ТЭ25КМ) 58 % от времени в состоянии «Неисправен». Таким образом, непроизводительные потери при ТОиР только за счёт снижения простоя в ожидании обслуживания можно сократить вдвое. Это тем более важно, что здесь нужны не столько капитальные затраты, сколько наведение логистического порядка. Примечание: в АСОУП [6] имеется единое состояние «Ожидание планового ТОиР» [273, 296].

Таким образом, важным направлением повышения эффективности эксплуатации локомотивов является сокращение времени простоя в ожидании ТОиР. При этом по имеющимся статистическим данным видно, что практически время ожидания можно сократить в 2 – 3 раза, сократив общее время ТОиР на 15 – 25% и повысив, тем самым, коэффициент полезной работы на $\Delta K_{АП}$ [273, 296]:

$$\Delta K_{АП} = 10 \% \cdot 0,2 = 2 \% . \quad (2.19)$$

Таблица 2.9 – Доля времени ожидания ТОиР [273]

Серия	Доли (%) времени в общем бюджете локомотива					Доля ожидания от ТОиР
	Ожидание планового ТОиР	Ожидание ТО-2	Ожидание НР	ВСЕГО ожидание	Все виды ТОиР	
ВЛ80С	1,5 %	1,2 %	1,0 %	3,7 %	10,4 %	36,1 %
ВЛ80Р	1,5 %	1,5 %	1,5 %	4,4 %	10,8 %	40,9 %
ВЛ85	0,8 %	1,6 %	1,1 %	3,6 %	10,4 %	34,4 %
2ЭС5К	3,3 %	1,3 %	0,9 %	5,5 %	10,5 %	52,5 %
3ЭС5К	2,1 %	1,2 %	0,8 %	4,1 %	9,8 %	41,9 %
ВЛ10	1,2 %	1,1 %	0,4 %	2,7 %	12,9 %	20,6 %
2ЭС4К	3,5 %	1,9 %	0,9 %	6,3 %	16,7 %	37,6 %
3ЭС4К	1,9 %	0,7 %	0,8 %	3,4 %	11,8 %	28,6 %
2ТЭ10МК	2,8 %	1,4 %	2,3 %	6,5 %	20,4 %	32,1 %
3ТЭ10МК	3,5 %	1,8 %	3,2 %	8,4 %	25,3 %	33,4 %
2ТЭ116У	3,3 %	0,9 %	2,9 %	7,1 %	18,5 %	38,3 %
2ТЭ25КМ	4,0 %	0,9 %	1,1 %	6,0 %	14,9 %	40,5 %

В таблицах 2.10 и 2.11 [273, 296] приведены результаты анализа влияния различных видов ТОиР на долю ТОиР в $K_{АП}$: ТОиР составляет в среднем 5,2 % потерь $K_{АП}$, что достаточно немного (всего теряется 50 % полезного времени локомотива – подраздел 2.1.2). Но вместе с ожиданием ТОиР потери составляют 14,4 %, что уже существенно. При этом основную долю (85,2 %) в собственно ТОиР составляют обслуживания в объёме ТО-2 (27,5 %), ТР-1 (35,9 %) и НР (21,8 %). Из статистики работы локомотивов за год видно, что есть локомотивы, у которых эти показатели существенно ниже. Поэтому можно прогнозировать возможность [273, 296] двойного сокращения времени простоя локомотивов на ТОиР $\Delta K_{АП}$:

$$\Delta K_{АП} = 5,2 \% \cdot 0,5 = 2,6 \% . \quad (2.20)$$

В теории управления предприятием Lean Production действия, не создающие ценность, делятся на потери первого и второго рода [102, 399]: которые трудно исключить и которые можно исключить. Потери, связанные с ТОиР относятся к потерям первого рода. При этом интересно отметить, что почти все виды потерь относятся и к системе ТОиР: перепроизводство, ожидание, ненужная транспортировка, лишние этапы обработки, лишние запасы, ненужные перемещения, дефектная продукция и интеллектуальные потери.

Таблица 2.10 – Влияние видов ТОиР на время обслуживания без учёта времени ожидания и прочих простоев [273, 296]

Серии	Доля ТОиР в бюджете времени, %	Доля различных видов ТОиР в общем бюджете ТОиР без учёта ожидания, %				
		ТО-2	ТР-1	ТР-2	ТР-3	НР
ВЛ80С	4,1 %	29,4 %	45,8 %	3,9 %	5,2 %	15,7 %
ВЛ80Р	4,8 %	30,6 %	35,2 %	5,3 %	4,6 %	24,2 %
ВЛ85	6,1 %	26,5 %	37,4 %	7,1 %	10,3 %	18,7 %
2ЭС5К	2,9 %	45,3 %	28,3 %	3,4 %	7,9 %	15,1 %
3ЭС5К	3,3 %	35,9 %	34,6 %	5,9 %	11,6 %	12,1 %
ВЛ10	7,6 %	13,8 %	74,0 %	3,0 %	2,9 %	6,3 %
2ЭС4К	5,2 %	37,0 %	37,0 %	1,3 %	9,0 %	15,5 %
3ЭС4К	4,5 %	14,5 %	44,8 %	8,1 %	15,3 %	17,3 %
2ТЭ10МК	7,3 %	19,4 %	31,6 %	6,7 %	6,2 %	36,2 %
3ТЭ10МК	10,3 %	17,4 %	22,3 %	9,9 %	1,4 %	49,0 %
2ТЭ116У	4,4 %	21,1 %	15,7 %	14,1 %	13,1 %	36,1 %
2ТЭ25КМ	2,4 %	39,1 %	24,5 %	21,5 %	0,0 %	14,9 %
Среднее	5,2 %	27,5 %	35,9 %	7,5 %	7,3 %	21,8 %

Таблица 2.11 – Влияние видов ТОиР на время обслуживания с учётом времени ожидания и прочих простоев с учётом времени ожидания и прочих простоев [273, 296]

Серии	Доля ТОиР в общем бюджете локомотива, %	Доля видов ремонтов в доле ТОиР от общего бюджета времени, %			
		ТО-2	ТР	НР	Прочее
ВЛ80С	10,4 %	24,2 %	36,2 %	16,1 %	23,5 %
ВЛ80Р	10,8 %	28,4 %	33,7 %	24,5 %	13,4 %
ВЛ85	10,4 %	29,3 %	40,2 %	22,0 %	8,6 %
2ЭС5К	10,5 %	24,8 %	42,1 %	13,0 %	20,0 %
3ЭС5К	9,8 %	24,4 %	38,8 %	12,8 %	24,1 %
ВЛ10	12,9 %	24,6 %	56,7 %	6,9 %	11,9 %
2ЭС4К	16,7 %	27,8 %	35,7 %	10,1 %	26,4 %
3ЭС4К	11,8 %	15,4 %	42,5 %	13,2 %	28,9 %
2ТЭ10МК	20,4 %	14,6 %	29,9 %	24,2 %	31,4 %
3ТЭ10МК	25,3 %	13,0 %	30,2 %	35,7 %	21,2 %
2ТЭ116У	18,5 %	11,1 %	30,0 %	25,8 %	33,1 %
2ТЭ25КМ	14,9 %	14,7 %	35,1 %	9,9 %	40,3 %
Среднее	14,4 %	20,8 %	37,1 %	17,4 %	24,7 %

2.1.4 Результаты анализа полезной работы

- 1 Общую эффективность эксплуатации локомотивов можно оценить через коэффициент (процент) полезной работы [273, 296], определяемый как отношение времени нахождения локомотива в состоянии «В голове поезда» к общему времени эксплуатации: $K_{АП} = T_{тяга} / \Sigma T_i$ или $K_{АП} = 100 \% \cdot T_{тяга} / \Sigma T_i$. Нахождение во всех остальных состояниях следует считать потерями первого (можно устранить) и второго (устранить сложно) рода согласно теории Lean Production.
- 2 Полезная работа локомотивов в среднем составляет $K_{АП} = 48 \%$ (рисунок 2.3). При этом есть прецеденты (Best Practice), когда все локомотивы серии имеют $K_{АП} > 70 \%$ (ВЛ85). Отдельные локомотивы достигали в среднем за год $K_{АП} > 75 \%$ (ВЛ85-233: 76,2 %, ВЛ85-268: 75,7 %, ВЛ85-140: 75,3 %, 3ЭС5К-777: 76,2 % и др.). Таким образом, за счёт совершенствования технологии перевозочного процесса и сокращения потерь времени в эксплуатации полезную работу локомотивов можно поднять на $\Delta K_{АПЭ} = 10 \%$, что приведёт к сокращению потребного парка на 2 тыс. секций [273, 296].

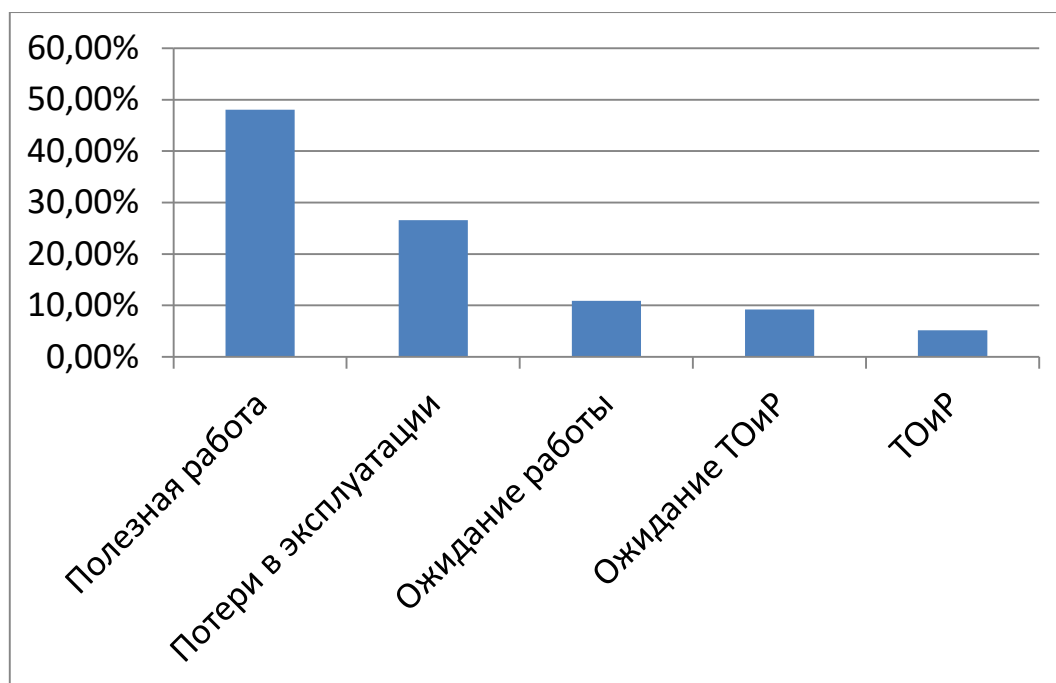


Рисунок 2.3 – Распределение среднего бюджета времени локомотивов [395, 388]

- 3 Потери на ТОиР в сумме составляют 14,4 %, из них ожидание ТОиР: 9,2 %. Сокращение времени простоя в ожидании в два раза позволит повысить коэффициент полезной работы $\Delta K_{АПОЖ} = 5 \%$ [273, 296].

- 4 Простой локомотивов на ТОиР составляет 5,2 %, сокращение которого на 20 % позволит повысить коэффициент полезной работы $\Delta K_{\text{АТОиР}} = 1,1 \%$. При этом следует учесть, что ТОиР составляет основу стоимости жизненного цикла локомотивов на этапе их эксплуатации, что повышает роль повышения эффективности ТОиР [273, 296].
- 5 Сокращение времени простоя локомотива на ТОиР возможно за счёт следующего [271, 273, 296]:
 - 5.1. Увеличение межремонтных пробегов за счёт совершенствования конструкции локомотивов, что возможно на этапе разработки жизненного цикла локомотива. Это, в свою очередь, неизбежно приведёт к увеличению стоимости локомотива, что считается недопустимым в ОАО «РЖД». Переход от «бюджетных» локомотивов к высоконадёжным с большим ресурсом – задача, требующая своего самостоятельного оптимизационного решения.
 - 5.2. Внедрение крупно-агрегатных методов ремонта. Именно по этому пути идёт компания Siemens. Однако опыт ТМХ-Сервис показал, что крупно агрегатный способ ремонта может быть нерентабельным из-за больших начальных затрат на создание переходного запаса.
 - 5.3. Внедрение бортовых систем технического диагностирования на базе микропроцессорных систем управления и соответствующих датчиков для частичного перехода на ремонт по техническому состоянию (один из самых популярных мировых трендов) [273, 296].
 - 5.4. Внедрение депокских переносных и стационарных автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) для дальнейшего внедрения системы ремонта по фактическому техническому состоянию (проблемы этого направления рассмотрены в разделе 4) [273, 296].
 - 5.5. Цифровизация процессов управления сервисным локомотивным депо и жизненным циклом локомотивов с целью создания прозрачной технологии ТОиР. Создание АСУ и киберфизических систем на базе АСУ – мировой тренд, рассматриваемый как четвёртая промышленная революция [271, 273, 296].

2.2 АНАЛИЗ НАДЁЖНОСТИ ЛОКОМОТИВОВ

2.2.1 Надёжность локомотивов согласно национальным стандартам

Основные определения и показатели надёжности определяются государственными стандартами [57-72, 75, 82], где надёжность определена как способность выполнять предусмотренные техническими требованиями функции в течение определенной наработки или периода эксплуатации при установленных в нормативной и (или) технической документации условиях применения, технического содержания, хранения и транспортирования. Техническое состояние локомотива может быть исправным/неисправным, работоспособным/неработоспособным или частично работоспособным/неработоспособным. При этом отказ трактуется как «событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния» [298].

Производитель при выпуске оборудования и локомотивов в целом проводит анализ, моделирование, испытания, подконтрольную эксплуатацию и другие мероприятия, в процессе которых определяет согласно стандарту основные нормируемые показатели надёжности: коэффициент технической готовности (КТГ – в долях единицы или процентах), наработка на отказ (в часах или км), интенсивность отказов (количество отказов на 1 млн км и др.), долговечность (срок службы не менее лет, тыс. часов), сохраняемость и многие другие [75, 298].

Например, у выпрямительно-инверторных преобразователей типа ВИП-4000М [229] электровозов переменного тока «Ермак» (Э5К, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К) производства НЭВЗ (г. Новочеркасск) [193, 380] в технических условиях (ТУ) установлены следующие показатели надёжности, которые обеспечиваются при соблюдении режимов эксплуатации ВИП [56, 75, 298]:

- средняя наработка на отказ: не менее 66 тыс. ч. (3,3 млн км);
- 95 % ресурс: не менее 80 тыс. часов;
- 95 % срок службы: не менее 20 лет;
- среднее время восстановления: не более 2,5 ч.

Примечание: при установленном сроке службы «более» 20 лет, есть ограничение срока службы силовых тиристоров «не более» 100 тыс. часов. Интенсивность отказов можно вычислить как $\lambda = 1/3,3 = 0,3$ отказа на млн км. У

электровозов серии 2ЭС5К имеется 4 ВИП (по 2 в каждой секции). Следовательно, по вине ВИП у 2ЭС5К интенсивность отказов ВИП составляет $0,33 \cdot 4 = 1,2$ отказа на 1 млн км (а у локомотива в целом интенсивность отказов определяется как сумма интенсивностей отказов всех видов оборудования). Фактическую надёжность ВИП по данным за месяц их эксплуатации можно определить по формуле [298]:

$$\lambda = n / (N \cdot L), \quad (2.21)$$

где: n – число отказов ВИП за заданный период времени;

N – общее число рассматриваемых ВИП;

L – средний пробег одного локомотива в млн км.

Пример [298]. Если 1000 электровозов серии 2ЭС5К имели среднесуточный пробег 700 км, то в сумме локомотивы проехали за месяц $1000 \cdot 700 \cdot 30 / 1000000 = 21$ млн км, а работа ВИП составила $21 \cdot 4 = 84$ млн км. Если за это время произошло 17 отказов ВИП, то

$$\lambda = 17 / 84 = 0,202 \text{ отказа/млн км} < 0,3 \text{ (в пределах допуска, норма).}$$

Тот же результат можно получить по-другому: средний пробег ВИП за месяц $L = 700 \cdot 30 = 21$ тыс.км. Число ВИП $N = 1000 \cdot 4 = 4000$. Тогда:

$$\lambda = 17 / (4000 \cdot 21000 / 1000000) = 0,202 \text{ отказа/млн км.}$$

Примечание: в качестве N следует брать не 4000 ВИП, а $N = (4000 + 4000 - 17) / 2 = 3991,5$ ВИП. Тогда $\lambda = 0,203$. Т.к. ошибка составит менее 0,21 %, то можно воспользоваться предложенной упрощенной формулой.

С июля 2014 года техническое обслуживание и ремонт локомотивов переданы сервисным компаниям ООО «СТМ-Сервис» и ООО «ТМХ-Сервис» («ЛокоТех-Сервис») [211], согласно договорам с которыми [107] основным показателем надёжности является КТГ, снижение которого ниже установленного норматива в виде коэффициента влияет на ставку (руб./км). В настоящее время ОАО «РЖД» переходит на приобретение и обслуживание локомотивов по контракту жизненного цикла (КЖЦ) [106], в которых требования к надёжности локомотивов нормируется через коэффициент готовности к эксплуатации (КГЭ), в целом аналогичный коэффициент технической готовности (КТГ). В обоих видах сервисного обслуживания фактический общий подлежащей оплате пробег локомотивов

умножается на понижающий коэффициент (не может быть больше 1), определяемый как отношение фактического КТГ или КГЭ к плановому [298].

Главное достоинство КТГ и КГЭ – простота использования: рассчитывается как отношение времени работоспособного состояния к общему времени. Но КТГ относится к локомотиву в целом: в показателях надёжности оборудования этого норматива нет – возникает проблема с разнесением ответственности за низкий КТГ по видам оборудования, показатели надёжности которых ниже установленных. Например, пусть были отказы КМБ и ВИП, в результате чего КТГ стал ниже допустимого: $0,9 < 0,95$. Но если одного из этих отказов не было, то КТГ мог бы быть в допуске. Вопрос: какую из двух групп отказов считать приведшем к недопустимому снижению КТГ? Ответа на этот вопрос нет, хотя он важен для отнесения за исполнителями ответственности и штрафов за низкую надёжность: КЖЦ предусматривает возмещение потерь в следствие просрочки доставки грузов и пассажиров, нарушения безопасности, загрязнения окружающей среды и др. У разных видов оборудования могут быть разные производители: у КМБ НБ-514 – сам НЭВЗ, у ВИП – ПАО «Электровыпрямитель», у МСУД – «ЛЭС» и др. КТГ и КГЭ не позволяют по их значениям предъявлять претензии производителям [298].

2.2.2 Категории отказов локомотивов

На отечественном железнодорожном транспорте дополнительно к общепринятым показателям стандартов [57, 58] и по надёжности железнодорожной техники [74] введены дополнительные показатели, которые, согласно общепромышленному стандарту [57], можно считать «последствиями отказа» или «видом отказа». В ОАО «РЖД» утверждено Положение [16, 221], которое в зависимости от последствий отказов технических средств вводит следующую их классификацию [298]:

- 1-я категория: отказы, приведшие к задержке поезда на 1 час и более, либо приведшие к транспортным происшествиям или событиям, связанным с нарушением правил безопасности движения;
- 2-я категория: отказы, приведшие к задержке пассажирского поезда продолжительностью от 6 минут до 1 часа, грузового поезда продолжительностью от 15 минут до 1 часа;

- 3-я категория – все отказы, не вошедшие в категории 1 и 2.

В КЖЦ [298] предусмотрена уплата сервисной компанией штрафов за отказы 1-й, 2-й категорий, штраф увеличивается при повторе: штраф за четвёртый и последующие отказы в три раза больше начального. Предусмотрены штрафы за отказы третьей категории как превышение числа отказов к нормированному в ТУ (в примере с ВИП в ТУ таких норм нет). При этом отказы считаются как число отказов на 1 млн км (по сути – это интенсивность отказов). Есть проблема в установлении соответствия между показателями, установленными в общепромышленном стандарте, и используемыми в КАСАНТ [33, 221] и КЖЦ [106, 107].

Рассмотрим пример [298]. Пусть на электровозе переменного тока серии 2ЭС5К произошёл отказ одного ВИП. В результате сбора аварийной электрической схемы мощность электровоза упала на 25 % (в каждой из 2-х секций по 2 ВИП). Если локомотив следовал с тяжеловесным поездом и впереди был руководящий подъём, то поезд остановится на подъёме – придётся вызывать вспомогательный локомотив, что приведёт к отказу 1-й категории. Если состав не был критичной массы или на его пути не было руководящих подъёмов, то будет только опоздание – отказ 2-й категории. Возможна ситуация, когда удастся довести поезд без опозданий, а отказ ВИП устранить на плановом ТОиР – это будет отказ 3-й категории. Таким образом, один и тот же отказ может привести к разным последствиям и попасть в любую из трёх категорий. Из примера очевидно, что производитель оборудования локомотива, определяя «классические» показатели надёжности своих изделий, не в состоянии заранее определить, сколько какой категории будет отказов. В примере с ВИП производитель может гарантировать число их отказов у одного электровоза серии 2ЭС5К не более $0,3 \cdot 4 = 1,2$ отказа на млн км, но какой категории они будут – рассчитать не может. Преодолеть эту проблему можно в процессе эксплуатации локомотивов на конкретном полигоне [298].

2.2.3 Прогнозирование категории отказа

Отказ ВИП будет первой категории, если в момент его возникновения локомотив был тяжеловесный и следовал по участку с руководящими (критическими) подъёмами [298]. Можно проанализировать статистику

эксплуатации локомотивов на конкретном полигоне (например, по данным ГИД УРАЛ или ИСУЖТ [5, 6, 33, 111] и рассчитать вероятность возникновения отказа первой категории P_1 . Аналогично можно рассчитать вероятность отказа второй категории P_2 . Тогда вероятность отказов третьей категории можно определить как $P_3 = 1 - P_1 - P_2$. После этого ожидаемое число отказов n по категориям n_1, n_2, n_3 можно прогнозировать как

$$\begin{aligned} n_1 &= n \cdot P_1; \\ n_2 &= n \cdot P_2; \\ n_3 &= n \cdot P_3 = n - n_1 - n_2; \end{aligned} \quad (2.22)$$

где общее число отказов n за период определяется как из статистики отказов [5, 16, 33, 221], так и рассчитать теоретически как произведение интенсивности отказов и пробега: $n = \lambda \cdot L$. В приведённом ранее примере $n = 0,3 \cdot 84 = 25,2$ отказа. Если вероятность отказа первой категории составит $P_1 = 0,2$, второй категории $P_2 = 0,3$, то ожидаемое (нормируемое) число отказов (среднее) по категориям будет:

$$\begin{aligned} n_1 &= 25,2 \cdot 0,2 = 5,04 \text{ отказа}; \\ n_2 &= 25,2 \cdot 0,3 = 7,56 \text{ отказа}; \\ n_3 &= 25,2 \cdot 0,5 = 25,2 - 5,04 - 7,56 = 12,6 \text{ отказа}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Таким образом, зная особенности эксплуатации локомотивов на конкретном полигоне и паспортные параметры оборудования, можно рассчитать ожидаемое число отказов за период по категориям. Но остаётся вопрос: на сколько производитель несёт ответственность за категоричность отказа – ведь она определяется только условиями эксплуатации. Например, если все поезда будут тяжеловесными и всегда в их маршруте будут руководящие подьёмы, то все отказы будут 1-й категории и производитель на это не влияет [295, 298].

Таким образом, принятые показатели надёжности локомотивов (количество отказов на 1 млн км, КТГ, КГЭ, категории отказов) не достаточны при факторном анализе причин низкой надёжности по видам оборудования. Не информативен показатель «Количество неплановых заходов на ремонт», т.к. не учитывается продолжительность и стоимость ремонтов. В «ЛокоТех» предложен альтернативный метод, когда по данным АСУ ТООР регистрируются цикловые и сверхцикловые работы ТООР, по которым можно судить о стоимости и эффективности жизненного цикла локомотива [298].

2.2.4 Статистика отказов оборудования локомотивов

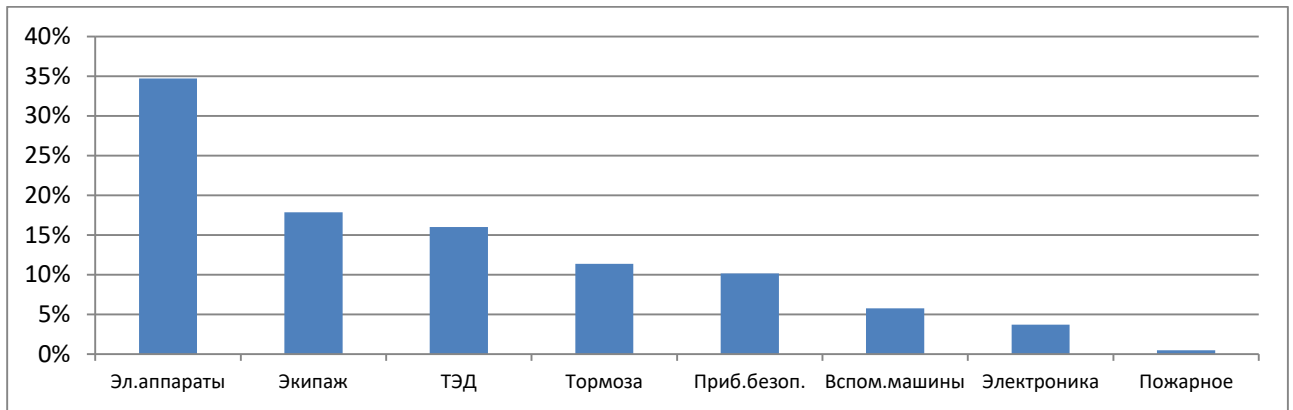
На рисунке 2.4. приведены сравнительные данные по надёжности различных видов оборудования локомотивов. У тепловозов главным источником неисправностей как по количеству, так и по стоимости является дизель и дизельное оборудование (43 %). Высокий процент отказов и неплановых ремонтов даёт электрооборудование как у электровозов, так и тепловозов (57 % и 29 %), однако при этом по стоимости они не являются определяющими. Тяговые (тяговые двигатели и главный генератор) и вспомогательные электрические машины хоть и составляют в сумме менее 20 %, но существенно влияют на стоимость ремонта. Существенную долю составляет электроника (5 % – 8 %), экипажная часть и механическое оборудование (4 % – 8 %), приборы безопасности (1 % - 2 %).

В группе компаний «ЛокоТех» идёт внедрение автоматизированной системы управления технологическими процессами АСУ ТОиР «Сетевой график», в которой в качестве показателя надёжности локомотивов и их оборудования взяты сверхцикловые работы, выполняемые во время плановых и неплановых заходов локомотивов на сервисное обслуживание [1 – 4, 152, 165, 235]. Этот показатель позволяет оценить ущерб от неплановых ремонтов.

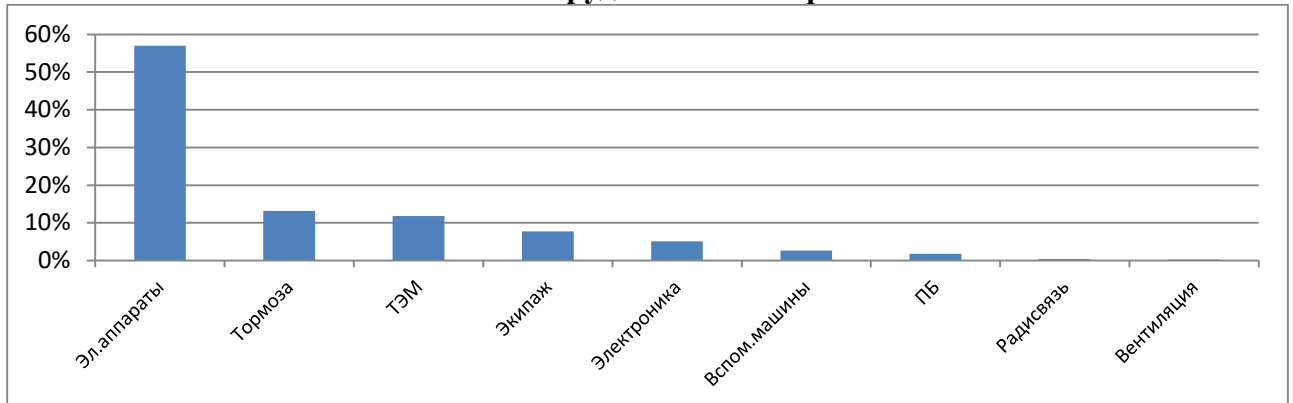
По данным о сверхцикловых работах за год (с июня 2017 по август 2018 года) сервисного локомотивного депо «Тюмень» выполнен анализ 48 тыс. сверхцикловых работ аналогично методике по п. 2.2.1.

Из гистограммы по рисунку 2.5 видно, что по числу и стоимости сверхцикловых работ на ремонты объёма ТО-3 и ТР-1 приходится больше устранения отказов, чем на неплановые заходы. Это подтверждает правильность подхода ЛокоТех учитывать надёжность локомотивов по сверхцикловым работам. При этом видно, что межцикловые ремонты по своей стоимости составляют менее 8 % при числе 22 %. В целом число работ и их стоимость коррелируют с коэффициентом $r = 0,89$. Остальные значимые результаты приведены на рисунках 2.6 и 2.7.

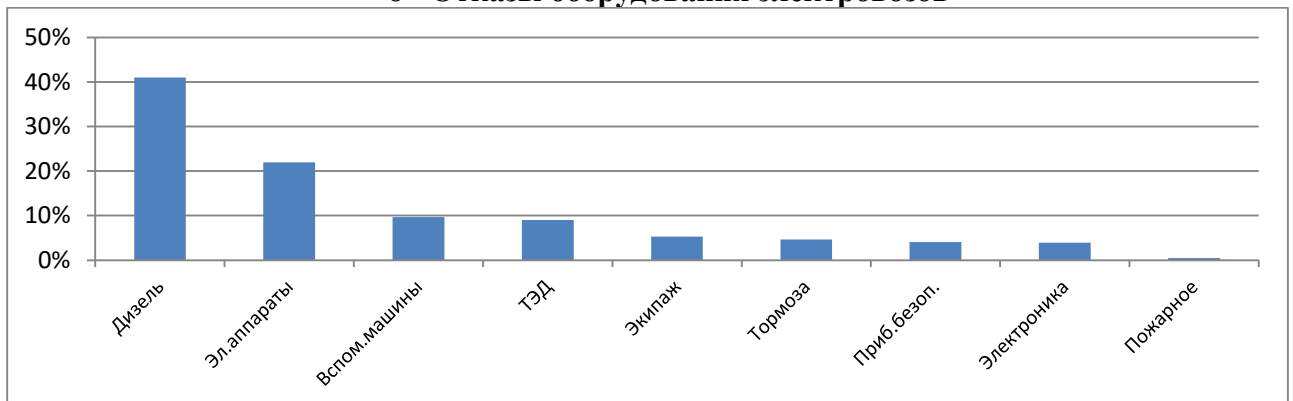
Таким образом, существующая система ТОиР не обеспечивает ожидаемый уровень надёжности оборудования.



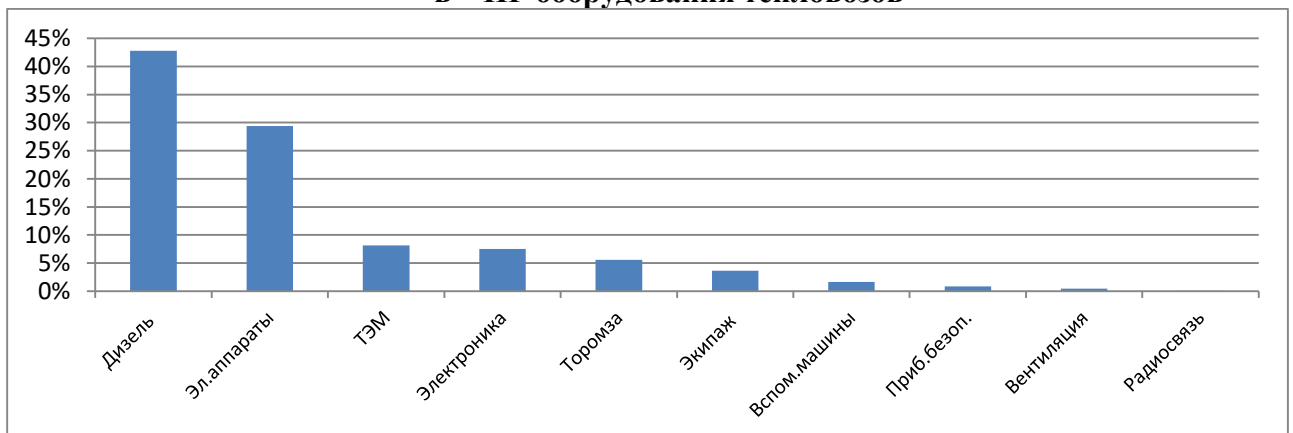
а – НР оборудования электровозов



б - Отказы оборудования электровозов



в – НР оборудования тепловозов



г - Отказы оборудования тепловозов

Рисунок 2.4 – Сравнение надёжности оборудования локомотивов

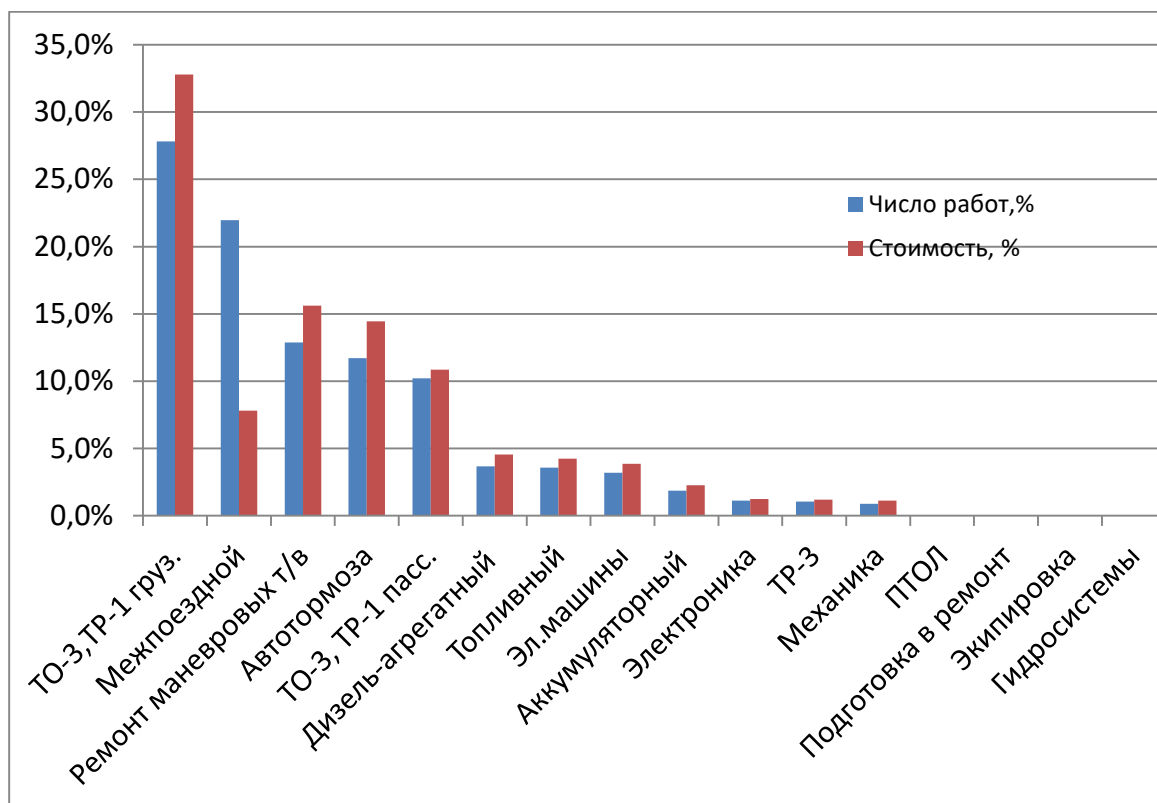


Рисунок 2.5 – Сравнение числа и стоимости ремонта оборудования локомотивов по цехам и участкам

На рисунке 2.6 приведено сравнение числа сверхцикловых работ по данным «ЛокоТех» и отказов по данным РЖД. На рисунке 2.7 – соотношение числа работ и трудозатрат.

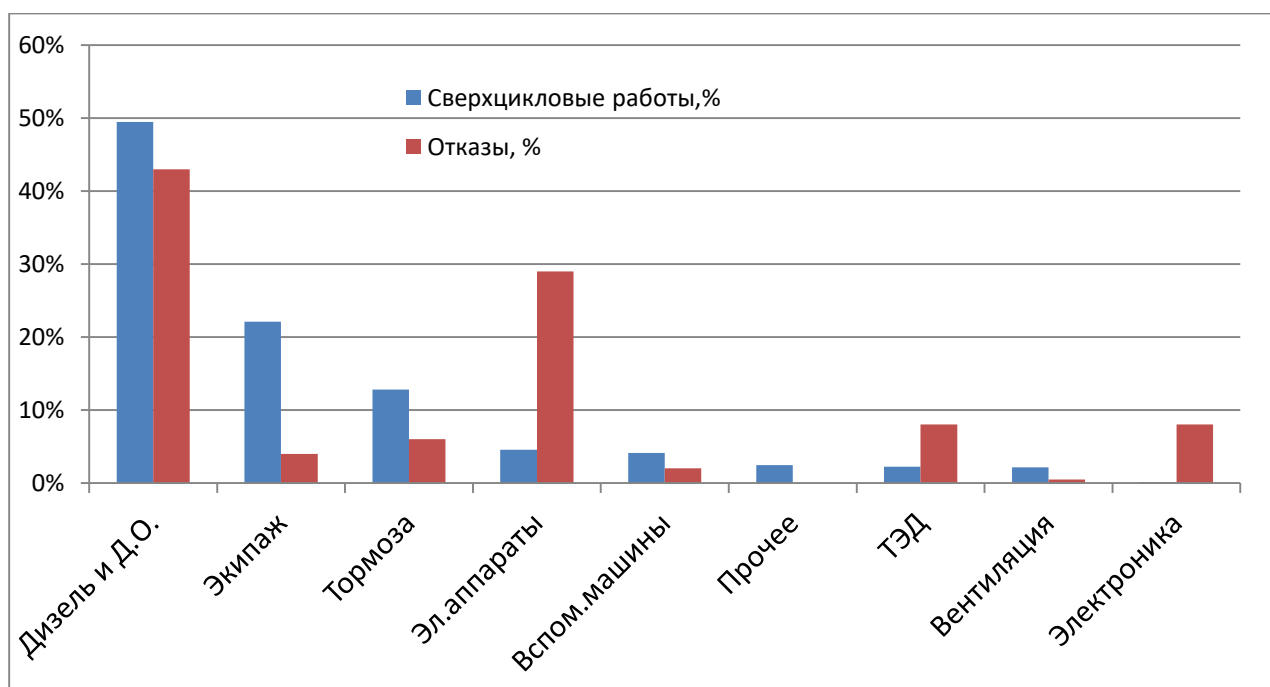


Рисунок 2.6 – Сравнение сверхцикловых работ и отказов по видам оборудования локомотивов

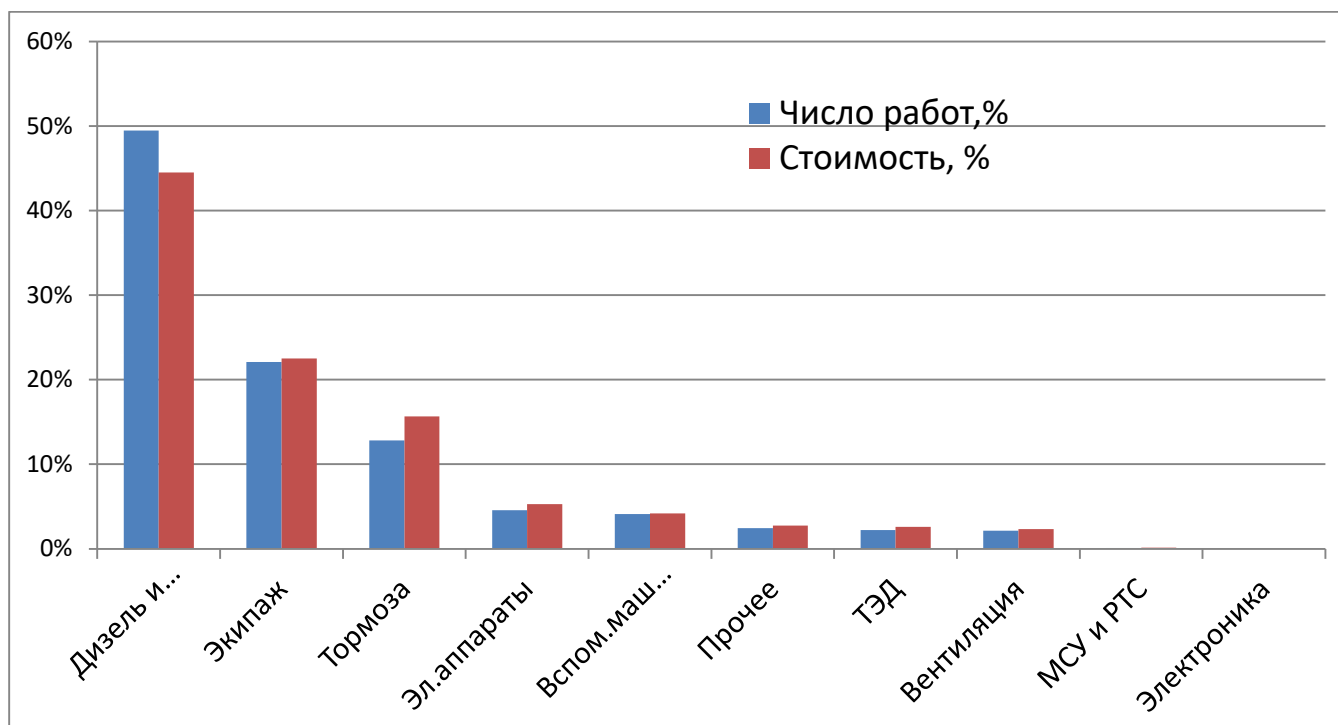


Рисунок 2.7 – Соотношение числа работ и трудозатрат

Таким образом, для управления жизненным циклом локомотива и его стоимостью целесообразно анализировать сверхцикловые работы, их стоимость и продолжительность [298].

2.2.5 Результаты анализа надёжности локомотивов

Система управления надёжностью локомотивов нуждается в своём дальнейшем развитии, в т.ч. с учётом использования современных автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) [271]. Диагностирование технического состояния тепловозов важно для дизеля и дизельного оборудования. У всех типов локомотивов – для электрооборудования, тяговых и вспомогательных электрических машин, электроники, тормозного и электропневматического оборудования. Также следует обратить внимание на приборы безопасности и радиосвязь.

В группе компаний «ЛокоТех» в рамках разработки АСУ ТОиР «АСУ Сетевой график» предложен альтернативный способ управления надёжностью по затратам времени и финансов на выполнение цикловых и сверхцикловых работ, возникающих по причине низкой надёжности оборудования. Применение средств диагностирования способствует выявлению скрытых предотказных состояний, что позволяет устранить их на плановых ТОиР через сверхцикловые работы.

2.3 УЧЁТ РАБОТЫ ЛОКОМОТИВОВ

Существенное влияние на надёжность оборудования локомотивов оказывают режимы эксплуатации локомотивов. Высокая динамическая нагрузка от пути, диапазон температур от -60°C до $+50^{\circ}\text{C}$, климатические воздействия и другие условия предъявляют повышенные требования к надёжности оборудования при жизненном цикле локомотива в эксплуатации 30 – 40 лет. В ОАО «РЖД» действует система планово-предупредительных ремонтов [8, 115, 136, 225, 278]: техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) локомотивов выполняется периодически по времени работы оборудования или пробегу локомотива в определённом объёме ТО-2, ТО-3, ТР-1, ТР-2, ТР-3 и др.

Полезная работа, приводящая к износу оборудования локомотивов, оценивается в километрах пробега магистральных и часах работы маневровых локомотивов. Имеется мировой опыт, когда полезную работу оценивают в кВт·час выработанной дизелем или израсходованной на тягу электроэнергии [1]. Также можно оценить работу в тонно-километровой нагрузке: этот параметр удобен в силу простоты его вычисления. Согласно ряду исследований, при работе локомотива на одном и том же участке тонно-километровая работа имеет высокий коэффициент корреляции с пробегом [1, 152, 235]. Эта нулевая гипотеза проверена по данным о работе за год 12 серий по 40 локомотивов каждой (подраздел 2.2). В данных АСОУП указывается масса поезда и пробег. Таким образом, можно посчитать коэффициент корреляции между пробегом локомотивов и их тонно-километровой работой.

По каждой серии локомотива по каждому локомотиву с использованием специально написанной программы VBA рассчитаны коэффициенты корреляции между пробегом и тонно-километровой работой (таблицы 2.12 и 2.13), которые для дальнейшего анализа сведены воедино (таблица 2.14). Окончательные результаты расчёта приведены в таблице 2.14.

Из полученных данных видно, что по большинству серий коэффициент корреляции r не подчиняется нормальному закону распределения случайной величины (только у серии ВЛ80С $P=0,3$ и у серии ЗЭС4К $P=0,5$), что свидетельствует о мультимодальности процесса. При этом, согласно шкале Чеддока [370] ни у одного локомотива корреляция не относится к «весьма высокой»: у 10 серий её следует отнести к высокой, у двух – к заметной. У двух локомотивов серии

ВЛ80С коэффициент попал в зону весьма высокой корреляции, что свидетельствует об однотипности перевозок.

Таким образом, учёт работы локомотива в его пробеге характеризует его загрузку с высокой точностью, но переход на учёт тонно-километровой работы даёт более точный результат (рисунок 2.8). В целом нулевая гипотеза о допустимости учёта работы локомотивов в километрах подтвердилась.

С появлением современных микропроцессорных систем управления локомотивов [172] с накопителями диагностической информации появилась возможность контролировать не только наличие неисправностей, но и наличие нарушений режимов эксплуатации (НРЭ) со стороны машинистов. В научных работах [1, 152] показано, что нарушения носят массовый характер как по причине низкой квалификации машинистов (холодный запуск и горячая остановка дизеля, боксование, отсутствие своевременной продувки тормозной магистрали и др.), так и по внешним для машиниста причинам (хотя формально вина остается на машинисте): завышенное или заниженное напряжение в контактной сети, ограничения скоростей по состоянию пути, недопустимо низкая скорость на руководящем подъёме из-за завышенной массы поезда, пропуску по боковому пути перед подъёмом и др. Эти и ряд других НРЭ существенно влияют на надёжность локомотива в целом и отдельных его узлов. Группой компаний ЛокоТех совместно с дирекцией тяги ОАО «РЖД» разработан классификатор НРЭ и регламент расследования таких случаев [222].

В таблице 2.15 приведены наиболее часто встречающиеся НРЭ. Наиболее подвергнутые отказам из-за нарушений являются тяговые электродвигатели, колёсно-моторный блок, дизель и дизельное оборудование.

В таблице 2.16 приведены статистические данные группы компаний «ЛокоТех», из которых следует, что по 7 % отказов локомотивов установлено, что их причиной стали нарушения режимов эксплуатации. Следует отметить, что большинство этих отказов являются дорогостоящими, т.к. связаны с ремонтом тяговых электродвигателей и дизеля. Влияние нарушений режимов эксплуатации на стоимость жизненного цикла локомотивов рассмотрено в диссертации И. Ю. Хромова [356].

Таблица 2.12 – Расчёт коэффициентов корреляции r между пробегом и тонно-километровой работой каждого из 40 выбранных локомотивов по каждой серии (пример)

1			2			3		
$r =$	0,816		$r =$	0,819		$r =$	0,852	
ВЛ80Р №1500/1579А	4680		ВЛ80Р №1524/1516А	6561		ВЛ80Р №1536	5692	
км	масса, т	т·км	км	масса, т	т·км	км	масса, т	т·км
164	6229	1021556	107	6243	668001	19	2246	42674
1	6229	6229	148	6243	923964	1	1478	1478
8	6229	49832	2	6243	12486	19	1478	28082
15	6229	93435	14	6243	87402	128	1478	189184
93	6229	579297	99	6243	618057	84	1478	124152
1	6229	6229	26	6243	162318	57	1478	84246
139	6229	865831	164	6243	1023852	57	4166	237462
1	6229	6229	2	6243	12486	84	4166	349944
34	6229	211786	23	6243	143589	69	4166	287454
86	6229	535694	93	6243	580599	36	4166	149976
12	6229	74748	139	6243	867777	1	4166	4166
85	6229	529465	1	6243	6243	23	4166	95818
19	6229	118351	34	6243	212262	1	4166	4166
7	6229	43603	86	6243	536898	70	4166	291620
1	6229	6229	12	6243	74916	25	4166	104150
28	6229	174412	85	6243	530655	187	4166	779042
1	6229	6229	19	6243	118617	1	4166	4166

Таблица 2.13 – Результаты расчета коэффициентов корреляции r пробега локомотивов и их тонно-километровой работы

№ п/п	ВЛ80С	ВЛ80Р	ВЛ85	2ЭС5К	3ЭС5К	ВЛ10	2ЭС4К	3ЭС4К	2ТЭ10МК	3ТЭ10МК	2ТЭ11У	2ТЭ25КМ
1	0,80	0,82	0,83	0,76	0,79	0,73	0,81	0,75	0,66	0,80	0,77	0,81
2	0,78	0,82	0,81	0,83	0,79	0,76	0,75	0,73	0,83	0,80	0,81	0,71
3	0,78	0,85	0,80	0,74	0,75	0,77	0,72	0,73	0,75	0,64	0,81	0,83
4	0,81	0,82	0,80	0,81	0,79	0,76	0,75	0,74	0,80	0,81	0,69	0,84
5	0,80	0,86	0,82	0,75	0,80	- 0,18	0,77	0,73	0,66	0,81	0,85	0,59
6	0,82	0,82	0,81	0,77	0,80	0,73	0,76	0,76	0,46	0,82	0,83	0,85
7	0,80	0,87	0,80	0,77	0,79	0,19	0,80	0,76	0,43	0,82	0,76	0,73
8	0,80	0,84	0,79	0,71	0,76	0,70	0,75	0,75	0,41	0,81	0,82	0,86
9	0,78	0,86	0,75	0,76	0,81	0,75	0,56	0,74	0,66	0,81	0,81	0,83
10	0,78	0,82	0,82	0,48	0,78	0,69	0,76	0,74	0,68	0,82	0,78	0,76
11	0,87	0,74	0,81	0,78	0,78	0,73	0,62	0,74	0,75	0,64	0,82	0,73
12	0,89	0,83	0,81	0,76	0,80	0,73	0,75	0,75	0,73	0,84	0,83	0,69
13	0,88	0,89	0,81	0,76	0,76	0,75	0,63	0,74	0,60	0,81	0,86	0,84
14	0,89	0,86	0,81	0,75	0,75	0,68	0,63	0,74	0,81	0,80	0,80	0,74
15	0,85	0,85	0,78	0,74	0,80	0,69	0,59	0,76	0,64	0,82	0,84	0,85
16	0,86	0,80	0,82	0,73	0,79	0,71	0,71	0,76	0,57	0,56	0,77	0,64
17	0,91	0,79	0,82	0,73	0,79	0,73	0,49	0,77	0,67	0,76	0,81	0,84
18	0,90	0,81	0,81	0,79	0,77	0,75	0,64	0,74	0,80	0,63	0,80	0,85
19	0,89	0,82	0,83	0,85	0,85	0,67	0,50	0,74	0,81	0,82	0,52	0,85
20	0,75	0,85	0,84	0,40	0,75	0,73	0,76	0,75	0,83	0,80	0,82	0,82
21	0,85	0,87	0,83	0,75	0,79	0,68	0,62	0,73	0,75	0,52	0,81	0,85
22	0,84	0,82	0,83	0,69	0,79	0,72	0,58	0,72	0,73	0,59	0,88	0,76

Таблица 2.14 – Сводные результаты расчета коэффициентов корреляции r пробега локомотивов и их тонно-километровой работы

№	Серия	N1	M1	СКО1	KV1	Min1	Max1	N2	M2	СКО2	KV2	Min2	Max2	Хи2фкт	P
1	ВЛ80С	40	81,6	5,30	0,07	66,0	91,3	40	81,6	5,30	0,07	66,0	91,3	4,5	0,3
2	ВЛ80Р	40	83,7	2,96	0,04	74,3	88,7	39	83,9	2,57	0,03	78,5	88,7	6,8	0,1
3	ВЛ85	40	80,6	2,09	0,03	72,1	84,4	39	80,9	1,58	0,02	75,1	84,4	12,4	0,01
4	2ЭС5К	40	73,3	10,29	0,14	40,3	85,5	39	74,2	8,90	0,12	45,4	85,5	46,0	0
5	3ЭС5К	40	78,3	2,52	0,03	69,5	84,7	39	78,5	2,11	0,03	74,7	84,7	7,4	0,1
6	ВЛ10	40	68,5	16,59	0,24	17,7	77,5	38	72,1	2,83	0,04	67,3	77,5	11,5	0,02
7	2ЭС4К	40	66,1	8,95	0,14	46,3	80,6	40	66,1	8,95	0,14	46,3	80,6	8,8	0,05
8	3ЭС4К	40	73,7	1,45	0,02	70,8	76,8	40	73,7	1,45	0,02	70,8	76,8	2,5	0,5
9	2ТЭ10МК	40	69,8	11,25	0,16	40,9	85,3	40	69,8	11,25	0,16	40,9	85,3	14,3	0,001
10	3ТЭ10МК	40	74,2	9,45	0,13	51,6	83,9	40	74,2	9,45	0,13	51,6	83,9	18,6	0
11	2ТЭ116У	40	81,2	7,91	0,10	51,0	88,1	38	82,8	3,98	0,05	68,6	88,1	20,3	0
12	2ТЭ25КМ	40	78,6	6,21	0,08	59,0	85,7	39	79,1	5,41	0,07	64,3	85,7	6,6	0,1

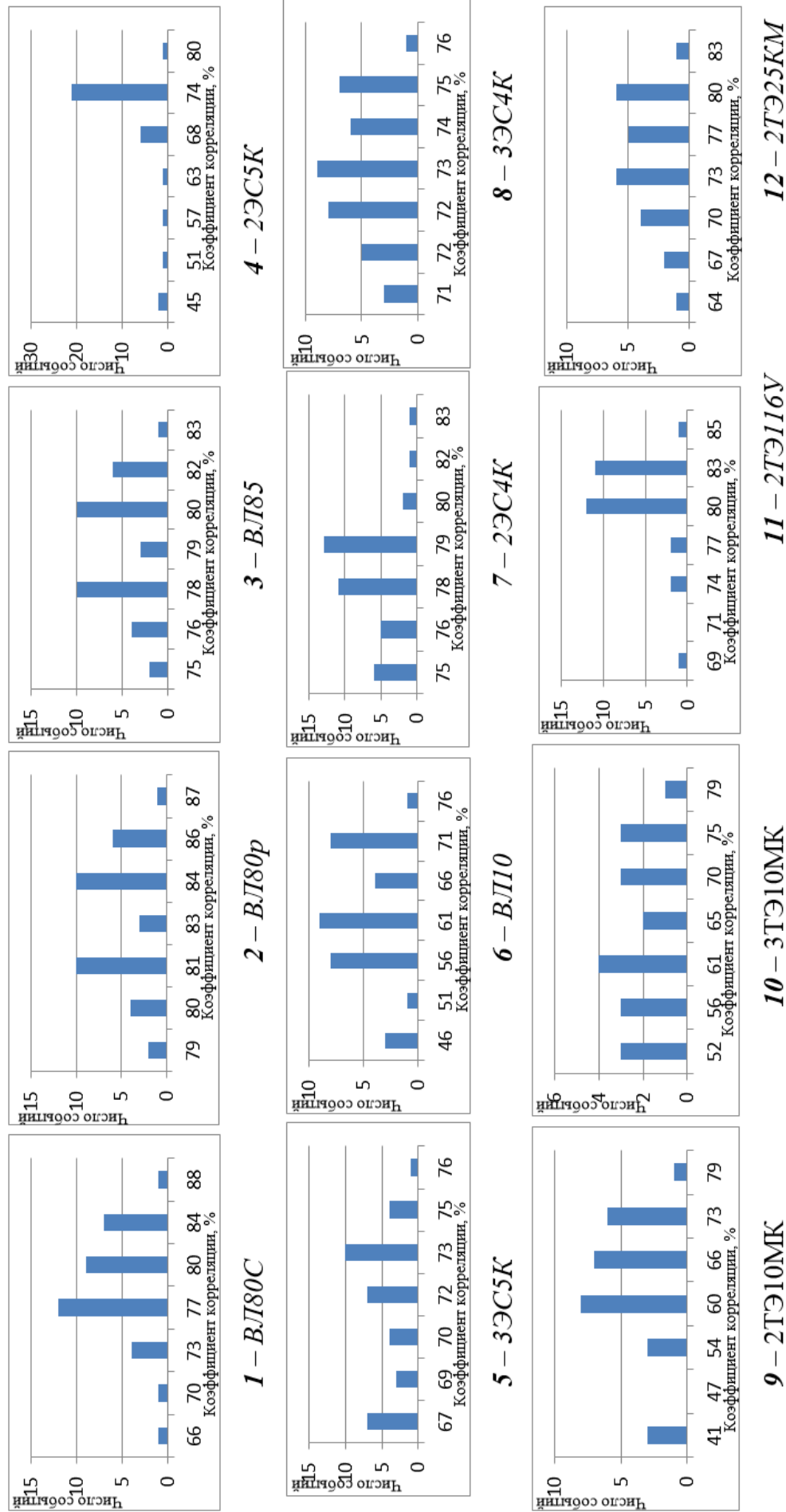


Рисунок 2.8 – Гистограммы распределения коэффициента корреляции между пробегом и т·км по сорока локомотивам каждой их рассмотренных двенадцати серий

Таблица 2.15 – Наиболее часто обнаруживаемые нарушения режимов эксплуатации локомотивов

Нарушения режимов эксплуатации локомотивов	Процент обнаружения
Длительная работа дизеля на холостом ходу	31,8 %
Пониженная скорость на руководящем подъёме	29,7 %
Боксование колёсных пар	12,4 %
Отключение мотор-вентиляторов на выбеге	9,0 %
Нарушение порядка продувки тормозной системы	5,7 %
Остановка/запуск дизеля с нарушением температурных режимов	4,8 %
Превышение массы поезда	4,1 %
Применение вспомогательного тормоза в тяге	2,5 %

Таблица 2.16 – Зависимость отказов локомотивов от НРЭ

Этап расследования	Всего, %
Всего неплановых заходов локомотивов на неплановый ремонт (отказы)	100 %
Количество отказов с наличием нарушения (нарушений) режимов эксплуатации в течение месяца до отказа	36 %
Из них с установленной связью между нарушением и отказом	7 %

Таким образом, при разработке модели управления жизненным циклом локомотива необходимо учитывать наличие нарушений режимов эксплуатации, влияющих на надёжность оборудования локомотивов, предусматривать дополнительные диагностические операции по выявлению отклонений в техническом состоянии оборудования после нарушения того или иного режима эксплуатации [298].

В мировой практике основным методом исключения опасных режимов эксплуатации является реализация алгоритмических защит в программном обеспечении бортовых микропроцессорных систем управления, практически полностью защищающих локомотив. В отечественной практике задачи встроенных алгоритмических защит являются предметом научно-практического рассмотрения ВНИКТИ, ВЭЛНИИ и др., рассмотрены в научных исследованиях И. К. Лакина, А. А. Аболмасова, И. И. Лакина и наиболее подробно у И. Ю. Хромова. Однако в настоящее время задача защиты локомотива остаётся актуальной, в т.ч. по причине недопустимого увеличения весовой нормы локомотивов.

2.4 АНАЛИЗ ПРОСТОЯ ЛОКОМОТИВОВ НА ТООР

Простой локомотивов на всех видах ТООР нормирован [136, 377], но на практике не соблюдается: локомотив стоит на ремонте гораздо дольше. Например, 2ТЭ10МК на ТР-1 при норме 36 ч. стоит в среднем 150 ч., на ТР-2 при норме 4 суток стоит 13. Это важно учесть, т.к. влияет на расчёт эффективности АСТД. В таблицах 2.17 – 2.19 приведены результаты расчёта времени простоя на ТООР, выполненного по данным раздела 2: для каждой серии локомотивов по каждому виду ремонта по данным АСОУП рассчитано математическое ожидание простоя M , среднееквадратичное отклонение σ и коэффициент вариации $K_V = \sigma / M$.

Таблица 2.17 – Среднее время простоя на ТООР по сериям, минуты [298, 296]

Серия	НР	ТО-2	ТР-1	ТР-1+ТО-4	ТР-2	ТР-3	КР	ТО-4	ТО-3
ВЛ80Р	741	85	2106	2552	5590	14542	12247	1026	
ВЛ80С	740	78	2183	2239	4907	11592	42181	864	
2ЭС5К	964	100	1500	3390	4139	7130	0	962	
3ЭС5К	945	90	1850	2217	4564	10877	0	1713	
ВЛ10	257	77	7579	809	5041	14770	0	331	
2ЭС4К	1567	93	5880	14282	14826	18776	0	6227	
3ЭС4К	789	109	4856	0	7124	25939	0	6395	
2М62У	1489	70	3178	5444	5831	8724	0	0	1468
2ТЭ10МК	2146	81	8971	10526	19230	29295	31435	2730	3064
3ТЭ10МК	1278	93	8526	7466	24317	13796	13386	3568	6033
2ТЭ116У	1172	73	4581	3329	12452	15284	0	997	2615
2ТЭ25КМ	2295	77	2890	2871	11274	106	0	2416	1813
М	1199	86	4508	5011	9941	14236	24812	2475	2999
СКО	572	11	2569	4051	6328	7554	12589	2024	1619
K_V	0,48	0,13	0,57	0,81	0,64	0,53	0,51	0,82	0,54

Таблица 2.18 – Среднее время простоя на ТООР в часах и сутках

	НР	ТО-2	ТР-1	ТР-1+ТО-4	ТР-2	ТР-3	КР	ТО-4	ТО-3
Часы	9,5	0,2	42,8	70,5	105,5	125,9	209,8	33,7	27,0
Сутки	0,397	0,008	1,784	2,938	4,395	5,246	8,743	1,405	1,124

Наиболее предсказуемым оказалось время простоя на ТО-2 ($M=86$ минут, $\sigma = 11$, $K_{var} = 0,13$), что во многом объясняется принятым в ОАО «РЖД» порядком смены состояния ТО-2 на НР при превышении времени простоя. Большой разброс имеет место по неплановым ремонтам ($M = 1199$ минут, $\sigma = 572$, $K_V = 0,48$) и обточке колёсных пар ($M = 2475$ минут, $\sigma = 2024$, $K_V = 0,82$).

Таким образом, сокращение времени простоя локомотивов на ТООР – существенный резерв повышения эффективности их эксплуатации [298, 296].

Таблица 2.19 – Результаты расчёта времени простоя на ТООР, минуты

	НР	ТО-2	ТР-1	ТР-1+ТО-4	ТР-2	ТР-3	КР	ТО-4	ТО-3
ВЛ80Р	741	85	2106	2552	5590	14542	12247	1026	
СКО	2757	24	1620	1708	1458	4971	6817	1068	
K _v	3,72	0,28	0,77	0,67	0,26	0,34	0,56	1,04	
N	560	4695	23	168	13	6	8	22	
ВЛ80С	740	78	2183	2239	4907	11592	42181	864	
СКО	2765	24	2142	1581	1827	4384	11854	928	
K _v	3,74	0,31	0,98	0,71	0,37	0,38	0,28	1,07	
N	583	4382	57	182	11	7	6	58	
2ЭС5К	964	100	1500	3390	4139	7130	0	962	
СКО	3093	28	1056	2530	2232	4441		979	
K _v	3,21	0,28	0,70	0,75	0,54	0,62		1,02	
N	304	3710	89	38	9	11	0	46	
3ЭС5К	945	90	1850	2217	4564	10877	0	1713	
СКО	3053	24	933	2189	3197	3360		3744	
K _v	3,23	0,27	0,50	0,99	0,70	0,31		2,19	
N	263	3718	110	70	18	10	0	46	
ВЛ10	257	77	7579	809	5041	14770	0	331	
СКО	1067	23	18621		1661	7929			
K _v	4,15	0,30	2,46		0,33	0,54			
N	518	3110	154	1	11	6	0	1	
2ЭС4К	1567	93	5880	14282	14826	18776	0	6227	
СКО	16523	31	6654	2127	5581	9196		4916	
K _v	10,54	0,34	1,13	0,15	0,38	0,49		0,79	
N	404	3323	59	2	5	9	0	10	
3ЭС4К	789	109	4856	0	7124	25939	0	6395	
СКО	3681	58	9260		2825	10821		9387	
K _v	4,66	0,54	1,91		0,40	0,42		1,47	
N	675	1704	134	0	16	9	0	36	
2М62У	1489	70	3178	5444	5831	8724	0	0	1468
СКО	2114	22		3524					833
K _v	1,42	0,32		0,65					0,57
N	12	84	1	2	1	1	0	0	9
2ТЭ10МК	2146	81	8971	10526	19230	29295	31435	2730	3064
СКО	17617	55	5290	10178	11795	15717		6356	3961
K _v	8,21	0,68	0,59	0,97	0,61	0,54		2,33	1,29
N	608	4068	46	13	11	7	1	45	88
3ТЭ10МК	1278	93	8526	7466	24317	13796	13386	3568	6033
СКО	5212	23	6303	5186	7030	4549	13479	3871	7303
K _v	4,08	0,25	0,74	0,69	0,29	0,33	1,01	1,08	1,21
N	1100	4648	61	15	13	4	5	21	78
2ТЭ116У	1172	73	4581	3329	12452	15284	0	997	2615
СКО	4027	19	8871	2267	4964	2638		1227	3344
K _v	3,44	0,27	1,94	0,68	0,40	0,17		1,23	1,28
N	459	2664	36	13	10	9	0	35	161
2ТЭ25КМ	2295	77	2890	2871	11274	106	0	2416	1813
СКО	15550	18	2673	957	2571			3135	2051
K _v	6,78	0,23	0,93	0,33	0,23			1,30	1,13
N	437	3126	60	7	12	1	0	48	244

2.5 ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2

- 1 Выполнен статистический анализ параметров эксплуатации локомотивов двенадцати самых массовых серий отечественных локомотивов. Для обеспечения достоверности анализа взято по 40 локомотивов каждой серии за 400 – 500 дней их эксплуатации (примерно год с учётом ТОиР).
- 2 Предложен метод анализа эффективности эксплуатации локомотивов по коэффициенту (проценту) полезной работы $K_{АП}$ как отношение времени нахождения в состоянии «В голове поезда» по классификатору АСОУП к общему времени эксплуатации [296].
- 3 Выполненный вероятностно-статистический анализ показал, что в среднем $K_{АП} < 50 \%$. При этом есть отдельные локомотивы со значением значения $K_{АП} \rightarrow 75 \%$. Достичь повышения эффективности эксплуатации локомотивов на 50 % возможно за счёт повышения эффективности использования локомотивов в эксплуатации и за счёт повышения эффективности сервисного обслуживания [296].
- 4 Надёжность всех рассмотренных серий локомотивов ниже требуемой. В том числе время простоя локомотивов на ТОиР существенно превышает нормативные значения [296].
- 5 Для сокращения времени простоя локомотива на ТОиР необходимо увеличение межремонтных пробегов за счёт совершенствования конструкции локомотивов, внедрение крупно-агрегатных методов ремонта, внедрение бортовых систем технического диагностирования с частичным переходом на ремонт по техническому состоянию, внедрение депокских переносных и стационарных автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) для дальнейшего внедрения системы ремонта по фактическому техническому состоянию, цифровизация процессов управления сервисным локомотивным депо и жизненным циклом локомотива с целью создания прозрачной технологии ТОиР [273, 296, 271].
- 6 Поставленная задача разработки модели управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования является актуальной [298].

3 АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

3.1 РАЗРАБОТКА МЕТОДА АНАЛИЗА СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

3.1.1 Постановка задачи анализа систем диагностирования локомотивов

В настоящем разделе выполнен анализ оснащённости оборудования локомотивов системами технического диагностирования (СТД), при этом приоритет отдавался автоматизированным СТД (АСТД) как соответствующих требованиям цифровых технологий, идеологии Цифровой железной дороги и Цифрового депо. Внутри АСТД предпочтительными считались бортовые и встроенные АСТД, затем переносные, обеспечивающие диагностирование на локомотиве без демонтажа.

В настоящем разделе предложен научно обоснованный метод анализа информативности систем диагностирования. При этом использован большой собственный опыт разработки систем технического диагностирования [178, 244 – 251, 263, 267, 268, 269, 270]. С позиций решаемой задачи уточнено использование терминологии в области технической диагностики и надёжности сложных систем. Показаны гносеологические основы методов диагностирования, прежде всего – диагностирование по ограниченному и в целом недостаточному объёму знаний. Предложены соответствующие методы оценки информативности систем диагностирования. Выполнен анализ методических подходов цифровизации, в т.ч. современного уровня развития IT-технологий. Сформулированы соответствующие ограничения на возможности систем диагностирования. Показана необходимость учёта методических подходов теории автоматизированных систем управления, прежде всего – необходимость обратных связей. Предложено использовать методические подходы теории конечных автоматов. Предложено использовать математический аппарат теории информации, в т.ч. элементов теории связи.

В заключении раздела сформулирована методика исследования и анализа систем технического диагностирования локомотива в целом и отдельных видов их оборудования.

3.1.2 Основные понятия технической диагностики

Выделить исторические точные сроки появления технической диагностики как самостоятельной науки сложно, можно выделить начало 20-го века, когда появилась необходимость обеспечить надёжность и безопасность работы сложных технических систем [335]. Развиваются как общие принципы диагностирования, так и конкретные методы диагностирования: органолептические методы, вибрационные и акустические методы, тепловые методы, радиография, трибодиагностика, методы неразрушающего контроля, методы параметрической диагностики. В целом развитие систем технической диагностики неразрывно связано с развитием IT-технологий, математического аппарата, в т.ч. методов распознавания образов.

В СССР основы технической диагностики широко развивались применительно к оборудованию морских судов. Позже – радиоэлектронных устройств и ракетной техники. Одним из первых создателей теории технической диагностики стал П. П. Пархоменко [131], основатель первой в стране лаборатории технической диагностики и отказоустойчивости Института проблем управления РАН. Большой вклад в развитие диагностики внесли В. В. Карибский [128], Е. С. Согомонян [131], А. В. Мозгалеvский [188, 189]. Закладывались основы автоматического мониторинга. Теоретические и практические исследования в области технического диагностирования доводились до уровня стандартов. В результате в 1975 году опубликован ГОСТ 20911-75 «Техническая диагностика. Основные термины и определения», который в доработанном виде с 1989 года действует как ГОСТ 20911-89 [52].

Техническая диагностика определена как область знаний, «охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов» [52]. А техническое диагностирование - как «определение технического состояния объекта» [52, 178]. Задачами систем диагностирования являются контроль технического состояния, локализация места отказа и прогнозирование технического состояния [52]. Именно с позиций возможности реализации этих трёх функций и будет выполнен анализ систем диагностирования в настоящем разделе.

ГОСТ 20911-89 [52] определяет системы диагностирования как встроенные и внешние. Применительно к железнодорожному тяговому подвижному составу такое деление недостаточно, т.к. имеют место «бортовые» системы диагностики: внешние по отношению к объекту диагностирования (оборудование локомотива), но встроенные по отношению к локомотиву в целом. Это важно, т.к. встроенные системы являются узкоспециализированными, а бортовые, как правило, контролируют техническое состояние локомотива в целом. Соответственно отличаются и методы их создания. В литературе термин «бортовая диагностика» встречается достаточно часто.

Диагностирование делят на тестовое и рабочее [178]. Рабочее диагностирование более характерно для бортовых систем диагностирования, когда локомотив находится в штатной эксплуатации и режимы специально не задаются. Такой подход менее затратен в части моделирования, но требует установки большого числа датчиков для измерения параметров оборудования. Более того, бортовая диагностика ограничена контролем правильности функционирования, т.к. может делать диагноз только по тем режимам работы, которые имели место. Например, если электровоз не входил в режим рекуперации, тепловоз не работал на 15-й позиции, не срабатывали защиты от опасных режимов (короткого замыкания, попадания молнии и др.), то и сделать вывод о работоспособности соответствующих систем невозможно. Тестовые режимы более информативны, но, как правило, требуют демонтажа оборудования и использования испытательных специализированных стендов. Стенды позволяют с большей вероятностью судить об исправности оборудования, бортовые – о правильном функционировании и при большом периоде наблюдения – работоспособности.

Качество диагностирования также оценивается его продолжительностью. Бортовые и встроенные системы работают в режиме online – продолжительность является критерием эффективности работы стационарных и переносных систем.

Необходимо оценивать вероятность ошибок первого и второго рода: вероятность диагностирования исправного технического состояния при наличии неисправности и наоборот.

Для современных цифровых технологий важным является выделение автоматизированных систем технического диагностирования – АСТД [368], общий принцип построения которых будет рассмотрен в следующих разделах.

Стандарт по диагностике (как и стандарт по надёжности и диагностике локомотивов [81]) гармонично дополняется ГОСТ 27.002-2015 «Надёжность в технике (ССНТ), Термины и определения» [57]. Сама надёжность определяется как «свойство объекта сохранять во времени требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования». В стандарте даны определения таким понятиям как безотказность, ремонтпригодность, восстанавливаемость, долговечность, сохраняемость и готовность.

Выделяются следующие состояния объекта: исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное. Важно отметить, что большинство АСТД не могут определить исправность объекта, а могут только проверить его работоспособность. Судить об исправности объекта можно только по очень большому (в пределе – бесконечному) числу параметров. Поэтому АСТД почти всегда с большей или меньшей степенью глубины диагностирования определяют работоспособность объекта диагностирования, а в случае с бортовыми системами – ещё меньше: правильное функционирование. В связи с вышесказанным представляется целесообразным для большей измеряемости определить понятие «предотказное состояние» (в стандарте определено как состояние с повышенным риском отказа) как «работоспособное, но не исправное», т.е. оборудование в состоянии выполнять свои функции, но уже неисправно. Пример, если в одном из цилиндров дизеля наметился тренд температуры отработавших газов к падению или росту, то неисправность уже существует, но до достижения предельного значения объект работоспособен. Если в тележке есть трещина, то она уже неисправна, но по-прежнему работоспособна. Если перетёрта изоляция провода, то он уже неисправен, но в состоянии выполнять свою функцию проводить ток. В этом случае определение отказа как нарушение его работоспособного состояния представляется не удачным: следует использовать потерю исправности как признак отказа. В стандарте предлагается использовать в этом случае понятие «дефект» и «повреждение».

В стандарте отказы делятся на явные и скрытые. Это осталось от предыдущего определения отказа (потеря исправности). Может быть скрытым дефект или повреждение. Потеря работоспособности всегда явная при наступлении соответствующего режима работы.

Отказы в стандарте делятся также на конструктивные, производственные, эксплуатационные и деградационные. Опыт внедрения АСУ ТООиР показал целесообразность в эксплуатационных причинах отказов выделять дополнительно проблемы со снабжением, технологией технического обслуживания и ремонта, качеством средств и методов диагностирования. Особенно это ощущается при сервисной системе технического обслуживания.

Таким образом, в исследовании используется терминология ГОСТ 20911-89 [52] «Техническая диагностика. Основные термины и определения» и ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения». Ряд терминов из-за специфики исследования используются в следующей интерпретации.

Предотказное состояние (предотказ): локомотив или его оборудование работоспособно, но имеет место дефект, повреждение или тренд в сторону выхода того или иного параметра за пределы допуска, что может привести к отказу. Коротко: локомотив (оборудование) работоспособен, но неисправен.

Бортовая система диагностирования: внешняя по отношению к оборудованию и узлам локомотива и встроенная по отношению к тяговой единице.

Правильное функционирование: работоспособное состояние локомотива и его оборудования, выявленное в имевших место режимах эксплуатации за рассматриваемый период времени.

СТД – любая система технического диагностирования.

АСТД: автоматизированная система технического диагностирования (описание приведено в следующем разделе).

Алгоритм диагностирования: логика диагностирования, заданная в откомпилированной программе диагностирования, по которой работает АСТД.

3.1.3 Цифровые технологии в системах диагностирования

Термин «Цифровизация» («Диджитализация») прочно вошёл в современный обиход: «Цифровая экономика», «Цифровая железная дорога», «Цифровое депо» и даже «Цифровой локомотив» – часто встречаемые в литературе термины [137, 138, 359]. Следует определить порядок применения термина к задачам диагностирования.

Для исчисления всегда пользовались специальными знаками, которые в настоящее время обозначаются термином «Цифра» (рисунок 3.1) [360]. В европейской культуре с V века до н.э. использовались римские цифры (7 символов), которые были достаточно удобны при отсутствии сложных вычислений. Аналогичный метод обозначения чисел был и в древней Руси с IX века н.э. По мере роста объёма вычислений оказались гораздо удобней использовать арабские цифры, принципиальное отличие которых было в ведении понятия цифры «0». Собственно, слово «Цифра» на арабском языке означает «Ноль». Число цифр увеличилось до 10.

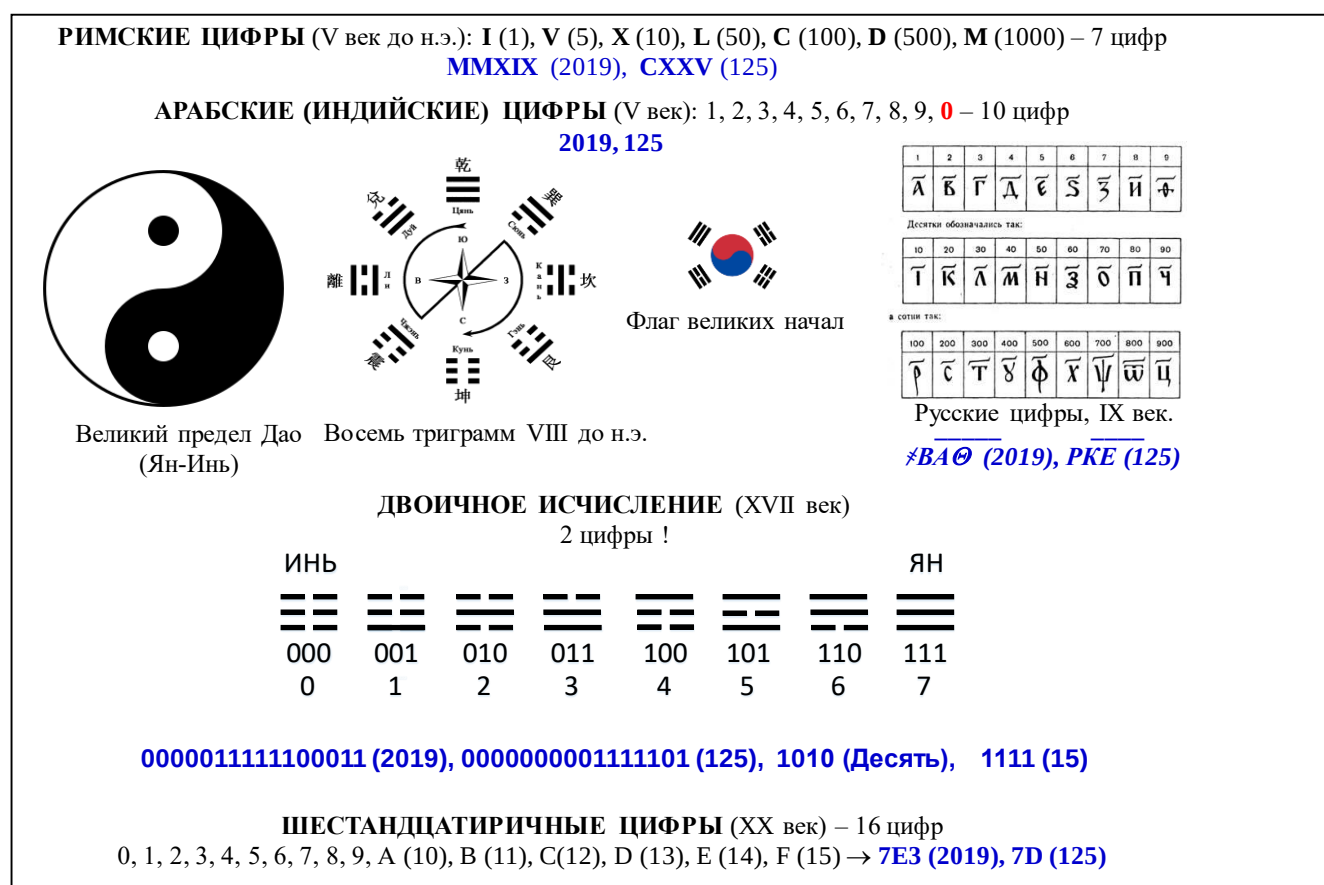


Рисунок 3.1 – Цифровые технологии как бинарное исчисление
 (исходные картинки взяты из Интернет)

Примечание: современной наукой доказано, что «арабские» цифры были изобретены в Индии [360] и в древнем мире так и назывались – «индийские». Термин «арабские цифры» исторически обозначает, что в 10-м веке индийские цифры пришли в Европу через Испанию (Барселону) из арабской культуры.

В XVII веке выдающийся философ и математик Готфрид Вильгельм Лейбниц предложил двоичное исчисление, берущее своё начало из Китайской философии (VIII в до н.э.) [99]. Анализируя китайские философские понятия Великого предела Дао в целом и триграммы в частности (соотношение начал Инь и Ян), Г. Лейбниц обнаружил, что любое десятичное число X можно представить в виде степенного ряда по основанию 2 (рисунок 3.1):

$$X = k_0 \cdot 2^0 + k_1 \cdot 2^1 + k_2 \cdot 2^2 + k_3 \cdot 2^3 + \dots = \sum (k_i \cdot 2^i), \quad (3.1)$$

где $k_i = \{0, 1\}$ – бинарный коэффициент наличия очередной степени числа 2.

В 1666 году Г. Лейбниц предложил двоичную логику, ставшую через 100 лет математической основой вычислительной техники: бинарное число легко моделируется электрическим сигналом. Так в микросхемах ТТЛ-логики сигнал от 2,4 В до 5 В соответствует нулю, а сигнал меньше 0,4 В – единице [299].

Таким образом, цифровизация, цифровые технологии, цифровые предприятия предполагают использование вычислительной техники с двоичным исчислением.

Примечание: перспективным направлением являются квантовые вычисления [136], позволяющие существенно повысить скорость вычислений, однако в их основе также лежит двоичная математика.

С точки зрения систем диагностирования переход на двоичное исчисление (цифровизацию) накладывает определённые ограничения. Большинство параметров объекта диагностирования являются аналоговыми: размер, масса, ток, напряжение, сопротивление, давление, температура, скорость, ускорение и др. Для представления (измерения) аналогового параметра в двоичном виде используются аналогово-цифровые преобразователи (АЦП) [355], разрядность которых N ограничивает точность измерения параметра $\Delta\%$:

$$\Delta\% = 100 \% / 2^N, \quad (3.2)$$

тогда:
$$N = \log_2(100 \% / \Delta\%). \quad (3.3)$$

Так, если использовать 8-разрядный АЦП, то максимальная точность измерения будет $\Delta\% = 100/256 = 0,391\%$, а при использовании 10-разрядного АЦП – $\Delta\% = 100/1024 = 0,098\%$. При этом реальная точность будет несколько ниже.

Таким образом, под цифровыми технологиями в системах диагностирования будет пониматься использование двоичного исчисления, накладывающего ограничения на точность измерения аналоговых параметров объекта диагностирования.

Для преобразования диагностических параметров в цифровой вид необходимы не только АЦП, но и датчики, преобразующие аналоговый диагностический параметр в электрический сигнал, который может быть померен. Для основных диагностических сигналов в таблице 3.1 приведены диапазоны их изменения *Min* и *Max* и требуемая для диагностирования абсолютная точность измерения Δ , по которым рассчитана относительная точность $\Delta\%$ и требуемая разрядность АЦП *N*:

$$\Delta\% = (Max - Min) / \Delta. \quad (3.4)$$

Расчёты показали, что для задач диагностирования локомотивов достаточно двенадцатиразрядных АЦП. В настоящее на рынке имеются АЦП в 16 и даже 24 разряда [355], таким образом, задача диагностирования локомотивов решается.

Кроме наличия аналогово-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей (АЦП и ЦАП) нужной разрядности должны быть аналоговые датчики, преобразующие измеряемую физическую величину в электрический сигнал. В настоящее время рынок датчиков (второе принятое название – сенсоры) достаточно полный для решения задач диагностирования [129, 132] (рисунок 3.2). Отдельно следует отметить «машинное зрение» («промышленное зрение»), которое по мере развития математического аппарата распознавания образов приходит на смену традиционным методам измерения, контроля и мониторинга [179].

Таким образом, цифровизация управления предполагает переход на двоичную систему счисления, для чего в системах диагностирования аналоговые сигналы датчиков диагностических параметров должны быть оцифрованы с конечной точностью. Для задачи диагностирования локомотивов достаточно 12 разрядов (бит).

Таблица 3.1 – Цифровизация аналоговых диагностических сигналов локомотива

Диагностический параметр локомотива	Пределы измерения	Точность измерения	Точность, $\Delta\%$	Разрядность АЦП
Напряжение контактной сети постоянного тока, В	0 ... 4000	1	0,025	12
Напряжение контактной сети переменного тока, В	0 ... 32000	1	0,031	12
Напряжение силовой цепи локомотива, В	0 ... 2000	1	0,050	11
Напряжение вспомогательных цепей, В	0 ... 150	0,1	0,330	11
Ток силовой, А	0 ... 4000	1	0,025	12
Ток цепей управления, А	0 ... 100	0,1	0,500	10
Давление воздуха, кПа	0 ... 1000	10	1,000	7
Давление масла, кПа	0 ... 500	10	2,000	6
Температура окружающей среды, °С	-60 ... +60	1	0,833	7
Температура оборудования локомотива, °С	0 ... 200	1	0,500	8
Температура дизеля, °С	0 ... 900	1	0,111	10
Сила тяги, кН	0 ... 2000	1	0,050	11
Скорость, км/ч	0 ... 300	0,5	0,143	9
Обороты дизеля, об/мин	0 ... 3000	1	3000	12
Виброускорение, м/с ²	-200 ... 200	0,1	4000	12
МАКСИМАЛЬНАЯ РАЗРЯДНОСТЬ АЦП				12

Примечание: в настоящем разделе и таблице 3.1 рассмотрено только влияние цифровизации (АЦП) на процесс диагностирования. При этом остаются все существующие ограничения на точность измерения: погрешность шунтов, согласующих резисторов, датчиков и многое другое.

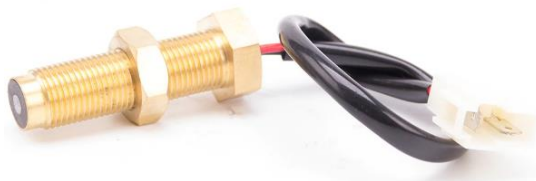
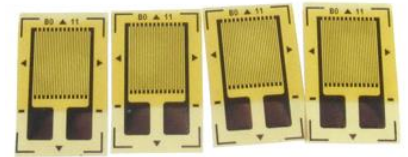
**а – тока****б – напряжения****в - скорости****г – давления****д – температуры****е – виброускорения****ж – оборотов дизеля (магнитный)****з – тензодатчики (измерение деформации)****и – тепловизоры****к – техническое зрение**

**Рисунок 3.2 – Примеры датчиков диагностических параметров локомотивов
(использованы фотографии из Интернет)**

Двоичная система счисления не сразу нашла практическое применение, хотя механизация вычислений имела место в человеческой культуре практически всегда (рисунок 3.3). Одним из ярких представителей древнейших средств вычисления являются абаки, известные с V века до нашей эры [94]. Современным их аналогом являются русские счёты, известные в России с XVII века и попавшие в Европу только в XIX веке. В самой Европе, начиная с XVII века развиваются механические вычислители на десятичной основе – арифмометры. В XIX веке большой вклад в развитие арифмометров внёс русский математик Пафнутий Львович Чебышев. Вершиной развития арифмометров можно считать разностную машину Чарльза Бэббиджа (XIX век). Однако все виды арифмометров и абаков не имеют прямого отношения к современной цифровой вычислительной технике, т.к. не использовали двоичное счисление.

Примечание: первый арифмометр был предложен Леонардо да Винчи на рубеже XV – XVI веков, однако не был реализован. В XX в. фирма IBM реализовала его: арифмометр после небольших доработок оказался работоспособен [336].

Ограниченность возможностей разностной машины натолкнуло её авторов – Чарльза Бэббиджа и Аду Лавлейс (Байрон) на создание проекта «Программируемая аналитическая машина», явившейся прообразом современных электронных вычислительных машин (ЭВМ, компьютеров). Эта машина состояла из элементов современных ЭВМ: «Склад» (оперативная память с данными), «Фабрика» или «Мельница» (процессор), «Управляющий элемент» (оперативная память с программой), «Устройства ввода-вывода информации» (принтер, перфолента, диски, Flash-память). В 1936 г. Алан Тьюринг [94] формализовал идеи Ч. Бэббиджа с использованием двоичного счисления в виде «Машины Тьюринга», на базе которой в 1940-м году был создан первый в мире практически используемый компьютер «Бомба» (Англия), сыгравший огромную роль в победе союзников во второй мировой войне. Одновременно вычислительная техника на двоичном исчислении развивается в США: в 1944 году создаётся первый компьютер США «Марк I». Таким образом, к середине 20 века цифровые технологии в виде электронных вычислительных машин (компьютеров) стали реальностью.



АБАК, V век до н.э.



Русские счёты, XVII век.



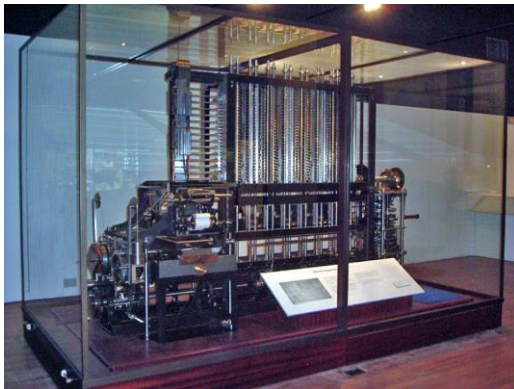
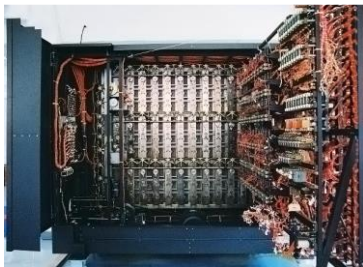
АРИФМОМЕТР:

XVI век: Леонардо да Винчи

XVII век: Блез Паскаль, Готфрид Лейбниц и др.

XIX век: Пафнутий Львович Чебышев

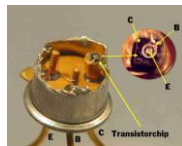
XX век: СССР «Феликс»

Разностная машина
Чарльза Бэббиджа,
XIX век.Ткацкий станок с перфолентой –
прообраз устройств ввода/вывода у
современного компьютера, 1725Машина Алана Тьюринга, 1936 г.
«Бомба», 1940 г. – первый
компьютер ВеликобританииМарк I – первый компьютер
(США, IBM), 1941 – 1944 годы

Урал I – первый компьютер СССР, 1957 г.



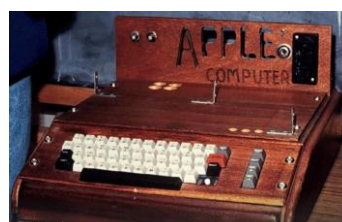
Радиолампы, 1912 г.



Транзистор, 1948 г.

Микросхема, 1962 г. Микропроцессор, 1971 г.
(Интегральная схема)

Первая микро-ЭВМ «Альтаир», 1974 г.



Первый компьютер Apple, 1975 г.

Первый персональный компьютер,
IBM PC 1981 г.

**Рисунок 3.3 – Микропроцессорная техника – основа современных систем
диагностирования (использованы фото из Интернет)**

Попытка реализовать двоичное исчисление с использованием реле оказалась бесперспективной. Поэтому первым поколением ЭВМ считаются ламповые компьютеры, к которым относятся и компьютеры СССР серии «Урал», первый из которых был создан в 1957-м году [140]. Второе поколение ЭВМ были реализованы на транзисторах, изобретённых в 1948 году. Третье – на базе интегральных микросхем, увидевших свет в 1962-м году. Четвёртое, современное поколение ЭВМ связано с изобретением в 1971-м году микропроцессора. Появление микропроцессора привело к появлению персональных компьютеров (микро-ЭВМ) буквально через несколько лет. После выпуска в 1981 году ПК (PC) фирмы IBM начался современный этап цифровизации всех видов деятельности человека. Если по сути цифровизация – это двоичное счисление, то по факту – это внедрение компьютеров на базе микропроцессоров с двоичным счислением.

Примечание: до начала 70-х годов XX века развивалось два направления ЭВМ: победившие цифровые (ЦВМ) и аналоговые (АВМ) [10], сохранившиеся для решения узкого круга задач [140]. У АВМ имеется ряд преимуществ, но простота программирования ЦВМ и стремительный темп развития их вычислительных способностей (по закону Мора каждые 18 месяцев мощность ЭВМ удваивается [94]) определили успех цифровых технологий. На базе операционных усилителей продолжают развиваться и АВМ в специализированных областях, причём как в космических аппаратах, так и на транспорте. Например, электровозы серии ВЛ85 (1983 г.) в основе своей автоматизированной системы управления имеют блок автоматического управления БАУ-002, реализующего алгоритмы управления схемно на аналоговых операционных усилителях серии 140УД6. В современных компьютерах эти же алгоритмы управления реализованы программно в микропроцессорных блоках.

Таким образом, современные диагностические комплексы должны создаваться на базе средств вычислительной техники: цифровых компьютеров или микропроцессоров. В дальнейших исследованиях под системами технической диагностики (СТД) будут пониматься цифровые комплексы с обязательным использованием аппаратно-программных микропроцессорных средств, в т.ч. и компьютеров в явном виде.

3.1.4 Методы теории автоматического управления в диагностике

Наряду с двоичным счислением и развитием средств вычислительной техники в качестве важной методической основы систем диагностирования следует считать Теорию автоматического управления (ТАУ), являющуюся важной частью отрасли науки «Техническая кибернетика» [31, 32]. Основателем Кибернетики является выдающийся американский математик и физик Норберт Винер, определивший Кибернетику как науку об общих закономерностях получения, преобразования и передачи информации в сложных управляющих системах (машины, живые организмы, общество). При всём разнообразии методов ТАУ следует выделить ключевой – это обязательное наличие обратной (обратных) связей.

На рисунке 3.4 показана в самом общем виде автоматизированная система управления (АСУ) [17, 92, 242]. В любой АСУ есть блок управления (модуль задания), датчики, встроенные в объект управления (модуль датчиков, модуль обратной связи), блок сравнения задания и состояния объекта управления, блок анализа требуемого и фактического состояний объекта управления, вырабатывающего необходимый в данной ситуации алгоритм управления. Последний обязательный элемент АСУ - блок воздействия на объект регулирования согласно выработанному управляющему алгоритму в соответствии с заданием и фактическим состоянием объекта управления (модуль управления) [17, 145, 146, 353].

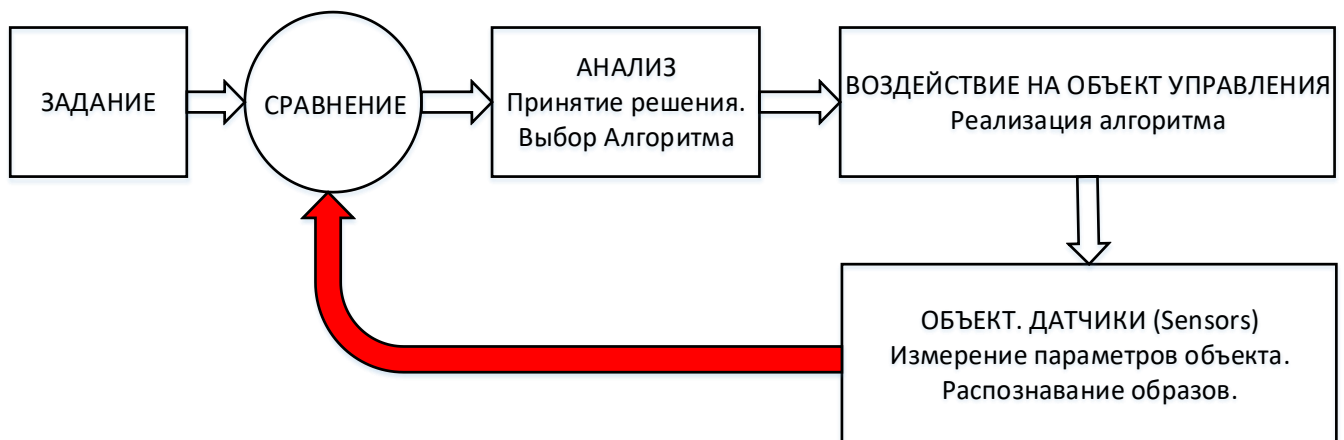


Рисунок 3.4 – Автоматизированная система управления

Таким образом, АСУ реализуют алгоритм управления в условиях ограниченной информации об объекте управления. При этом используются цифровые технологии (рисунки 3.2 и 3.4) и аналоговые датчики (рисунок 3.3).

Примечание: кроме термина АСУ используется ряд других словосочетаний: «Система автоматического управления» (САУ), «Кибернетическая система», «Робототехнические системы», «Микропроцессорная система управления» (МСУ) и многие другие. Каждый из этих терминов подчёркивает те или иные свойства АСУ, но все они соответствуют схеме, приведённой на рисунке 3.4.

Каждый из элементов АСУ по рисунку 3.4 в настоящее время превратился в самостоятельное направление ТАУ [106]. В рамках выработки задания развиваются системы поддержки принятия решений (СППР) [306, 307], в области датчиков – как непосредственно датчики, так и системы распознавания образов, в т.ч. нейронные сети [93], в области сравнения и принятия решений – математические методы управления [312 – 331]. В области непосредственного воздействия на объект управления – силовые электронные системы [229, 367], роботы манипуляторы, автоматизированные приводы и др. [17, 242].

Схема по рисунку 3.4. в полной мере относится и к современным автоматизированным микропроцессорным системам технического диагностирования (АСТД): по заданию о постановке диагноза по заданному алгоритму АСТД воздействует на объект диагностирования (входные сигналы x_i , принадлежащие множеству X : $x_i \in X$) и анализирует реакцию системы (выходные сигналы y_i , принадлежащие множеству Y : $y_i \in Y$). В результате формируется диагноз о техническом состоянии объекта диагностирования (внутренние сигналы z_i , принадлежащие множеству Z : $z_i \in Z$). Сигналы $x_i \in X$ и $y_i \in Y$ измеряются обязательно. При возможности и необходимости измеряются отдельные внутренние сигналы $z_i \in Z$.

Таким образом, системы технического диагностирования (СТД) должны разрабатываться по принципам автоматизированных систем, что предполагает использование цифровых технологий, IT-технологий и обратных связей как обязательного элемента обеспечения достоверности результатов работы системы. Поэтому далее будут рассматриваться автоматизированные СТД – АСТД: системы

технического диагностирования, построенные на базе цифровых IT-технологий с использованием микропроцессорных систем управления и соответствующих математических методов. Принципиальная схема АСТД как АСУ приведена на рисунке 3.5.

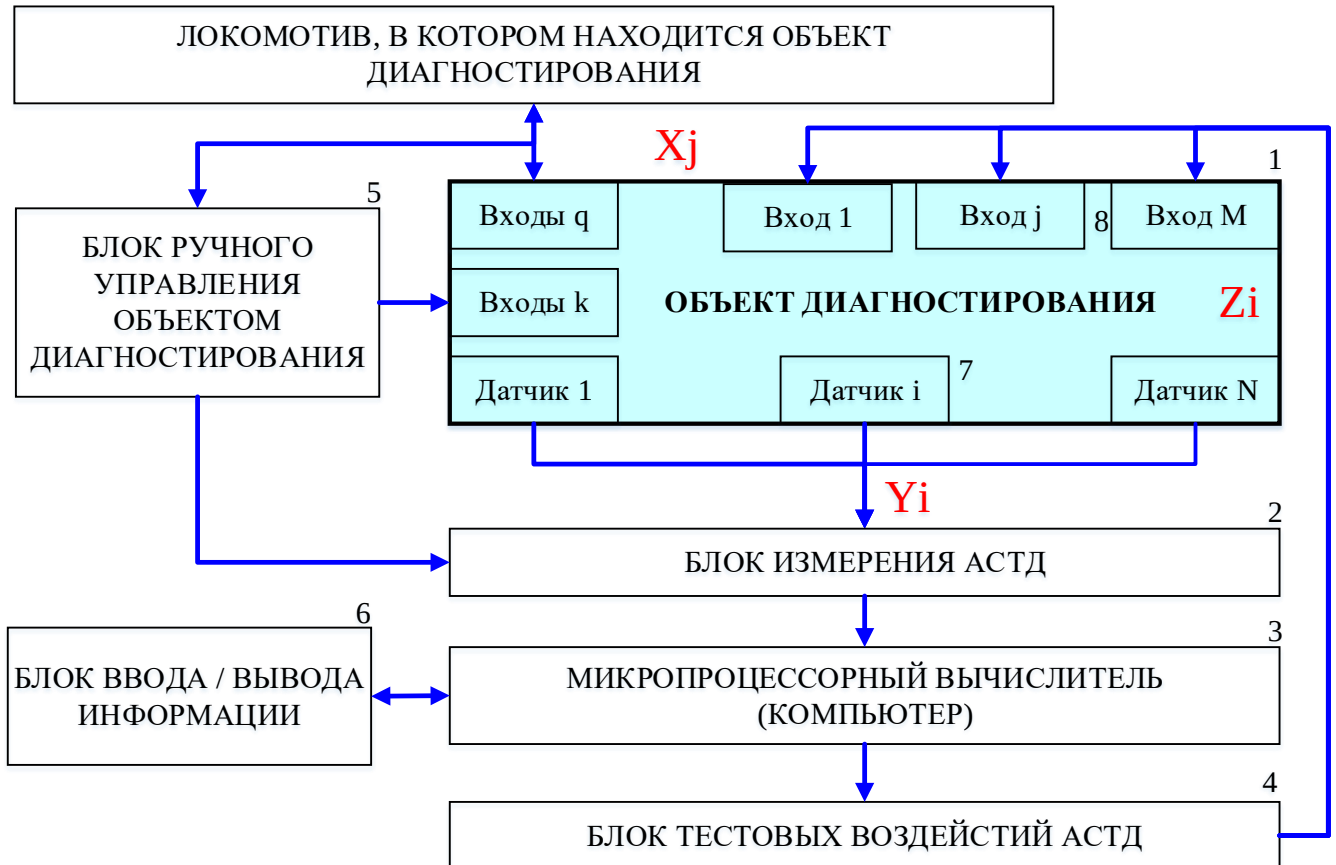


Рисунок 3.5 – Принципиальная схема современной АСТД как АСУ

В объекте диагностирования (блок 1) устанавливаются датчики (блок 7), в качестве которых могут выступать датчики аналоговых сигналов (рисунок 3.3): тока, напряжения, температуры, давления, скорости вращения (сигнал может быть и цифровым), уровня топлива и др., а также частотные сигналы (например, частоты вращения) и бинарные сигналы (включено/выключено, есть сигнал/нет сигнала и др.). Современные датчики – это устройства, преобразующие измеряемую физическую величину в электрический сигнал, в котором полезная информация передается напряжением, током, длительностью, частотой импульса и другими параметрами электрического сигнала. Информация с датчиков поступает на Измеритель АСТД (блок 2), в качестве которого выступают аналогово-цифровые преобразователи (АЦП) с аттенюаторами и возможными гальваническими развязками на входе, частотомеры, цифровые входы и др. С Измерителя (блок 2)

информация поступает в микропроцессорный блок 3, в качестве которого чаще всего выступает персональный компьютер (стационарный, ноутбук или планшет) или микропроцессорный блок (как правило для компактных переносных, бортовых или встроенных АСТД). Ряд сигналов могут быть изначально цифровыми: время, дислокация и даже скорость (в т.ч. заданная) и частота вращения.

Компьютер (блок 3) согласно алгоритму диагностирования, прописанному в его программном обеспечении, по заданию, поступающему с устройств ввода/вывода (блок 6) через блок тестовых воздействий (блок 4), представляющий из себя цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), формирователи импульсов (широтно-импульсные ШИМ и частотно-импульсные ЧИМ модуляторы), реле и др., подаёт на входы (блоки 8) объекта диагностирования тестовые сигналы и измеряет реакцию объекта. Тестовые воздействия имитируют как управляющие сигналы, так и возмущающие сигналы, в т.ч датчики самого объекта. Возможно дополнительно к автоматически поступающим сигналам ручное управление объектом диагностирования. Это, как правило, включение питания. Если АСТД является бортовой, то большинство входных сигналов могут поступать с пульта управления машиниста или с датчиков локомотива.

В случае встроенных АСТД в качестве блока ручного управления (блок 5) выступает контроллер машиниста, на входы X поступают сигналы с других видов оборудования локомотива. В связи с этим Блок тестовых воздействий отсутствует. Встроенные системы имеют датчики внутреннего состояния Z . Проверяется правильность функционирования с выявлением и локализацией места отказа, прогнозом остаточного ресурса и вероятности работоспособного состояния.

В случае бортовых АСТД ручное управление X осуществляется с пульта управления машиниста, входные воздействия X также являются сигналами с другого оборудования локомотива. Число внутренних сигналов Z меньше по сравнению со встроенными АСТД. Проверяется правильность функционирования сразу всех основных видов оборудования, которое по мере увеличения времени контроля приближается к проверке работоспособности системы.

В случае стационарных систем управления за счёт возможности установки большого числа датчиков и возможности моделирования всех возможных режимов

эксплуатации через модуль тестовых воздействий (блок 4) диагностирование приближается к проверке исправности (глубокая проверка работоспособности). Однако точность диагноза может снижаться за счёт ограниченности возможностей имитационных тестовых воздействий.

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: $k = [1, K]$.

Множества входных X и выходных Y сигналов объекта диагностирования являются обязательными для диагностирования работоспособности объекта. Для проверки исправности, локализации места неисправности и прогнозирования остаточного ресурса могут понадобиться внутренние сигналы Z .

Алгоритм диагностирования АСТД 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) [40, 197]:

$$Y(t+1) = H(t, X(t), Y(t), Z(t)), \quad (3.5)$$

где: H – функция перехода объекта диагностирования (конечного автомата) из состояния в момент времени t к состоянию в момент времени $t+1$.

Примечание: в теории конечного автомата t и $t+1$ – два последовательных момента времени работы автомата. Применительно к задачам диагностирования правильней говорить о периоде подачи входного сигнала t и периоде измерения реакции системы в период времени $t + 1$.

Оператор перехода H_0 устанавливает однозначную связь между множествами $X(t)$, $Z(t)$ и множествами $Y(t+1)$, $Z(t+1)$ для исправного состояния. Также возможно ограниченное в силу цифровых технологий число операторов перехода H между множествами $X(t)$, $Z(t)$ и множествами $Y(t+1)$, $Z(t+1)$ для неисправных состояний.

Совокупность всех операторов перехода создают таблицу функций неисправностей [338], которая по сути определяет энтропию объекта диагностирования.

В 70-е годы 20 в. АСУ распространяются на отечественных предприятиях, в т.ч. и на железнодорожном транспорте в МПС СССР [215] под руководством доктора технических наук, профессора, члена-корреспондента АН СССР, героя социалистического труда Александра Петровича Петрова [215, 288]. Предложенная концепция АСУЖТ остаётся актуальной. Первой внедряется и сейчас основная автоматизированная система оперативного управления перевозками (АСОУП), включая АСУ сортировочных станций (АСУСС). Внедряется первая АСУ локомотивного хозяйства ИОММ: Интегрированная обработка маршрутов машиниста разработки Информационных вычислительных центров (ИВЦ) Горьковской, Ярославской, Челябинской и Куйбышевской железных дорог [288]. Система оказалась эффективной и стала первоисточником для «тяжёлой отчётности» отрасли. Следующий этап развития АСУЖТ связан с появлением персональных компьютеров (ПК) в конце 20-го в. Централизованная разработка АСУЖТ дополнилось разработкой автоматизированных рабочих мест (АРМ) на линейных предприятиях и ИВЦ, многие из которых со временем стали отраслевыми: ГИД «Урал», «Эльбрус», «ЭТРАН» [288].

В 21-м веке АСУЖТ приобрела статус неотъемлемого элемента управления технологическими процессами ОАО «РЖД». Развитие продолжается. Создаётся мощная разветвлённая оптоволоконная сеть. На базе программной ERP-платформы SAP R/3 [196] создаётся единая комплексная автоматизированная система управления финансовыми и материально-техническими ресурсами (ЕК АСУФР) и трудовыми ресурсами (ЕК АСУТР) [288].

К началу 21-го века создаётся АСУ локомотивного хозяйства (АСУТ). В основу легли разработки Красноярской, Восточно-Сибирской и Западно-Сибирской железных дорог.

В настоящее время уровень развития информационных технологий характеризуется как цифровая трансформация производства и экономики, которая рассмотрена в разделе 6.

В ОАО «РЖД» введён термин: «Цифровая железная дорога», включающий в себя все уже созданные АСУ: объединение отдельных АСУ и оборудования с микропроцессорным управлением в единую систему управления методически соответствуют этапу создания киберфизических производственных систем. Объединению подлежат более 300 ключевых информационных систем АСУЖТ [16, 121, 154, 170, 221, 342]. Кроме информационных систем по принципу интероперабельности (раздел 6) объединению в CPPS-систему подлежат системы диспетчерской централизации и контроля, автоматической идентификации подвижного состава, управления сортировочными станциями и др. Системы диагностирования с микропроцессорным управлением (АСТД) также должны стать частью единой CPPS-системы.

Таким образом, включение АСТД в АСУЖТ должно осуществляться через АСУ локомотивного хозяйства – АСУТ, в состав которой входит проект «Цифровое депо», строящийся по принципам CPPS. С точки зрения теории АСУ (ТАУ) – АСТД является интеллектуальным (Smart) источником объективной информации о техническом состоянии оборудования локомотива.

3.1.5 Гносеологические предпосылки систем диагностирования

Задача определения состояния объекта исследования по его внешним признакам стояла ещё в Древней Греции и Древнем Риме [152]. Сам термин «Диагностика» дословно значит «Способный распознавать» (διαγνωστικός, *diagnosticos*) [119]. Самым сложным предметом исследования для человечества был и остаётся сам человек. Поэтому и методы диагностирования, распознавания состояния объекта исследования развивались именно применительно к медицине. Тогда и появилась латинская поговорка «*Bene dignoscitur, bene curatur*» – «Хорошо распознаётся – хорошо лечится». Применительно к технике в наше время можно трактовать пословицу как «Что хорошо диагностируется, то хорошо обслуживается». Главное, с чем столкнулась диагностика – это необходимость принятия решения о состоянии объекта (изначально – о здоровье или болезни человека) по ограниченному и не всегда достоверному набору диагностических параметров. Попытка познать непознаваемое (трудно познаваемое) и привело к появлению другой древнегреческой пословицы «Я знаю, что ничего не знаю» (*scio me nihil scire* или *scio me nescire*) – приписывается Сократу или Демокриту.

Наиболее полно проблема познания объективной реальности (ноуменального мира *N*, «вещи в себе») по её внешним проявлениям (феноменальному миру *F*, «вещи для нас») описана в трудах великого немецкого философа Иммануила Канта в конце XVIII века, фактически заложившего современную теорию познания [14]. В 1781 году вышел главный труд философа – «Критика чистого разума», в котором исследуются познавательные способности человека. Утверждение И.Канта «мысли без содержания пусты, созерцания без понятий слепы» фактически являются основой научно-практического исследования, в т.ч. диагностирования, при котором надо иметь методику и алгоритмы диагностирования на основании объективных данных об объекте исследования: «Чтобы иллюстрировать образно какое-нибудь наивысшее понятие рассудка, мы пользуемся чувственным примером в виде воспроизведения какого-нибудь представления во времени». В немецкой классической философии фактически были заложены основы диалектических методов познания, которые имеют непосредственное отношение к практической реализации технического диагностирования.

По мнению самого И. Канта, на нём закончилась философия. Дальнейшие исследования либо ушли в специальные науки, либо сводились к диаграмме, показанной на рисунке 3.6.а. Доказано, что текущий уровень знаний $i_F(t)$ с возможными отклонениями из-за ошибок асимптотически стремится к максимально достижимому уровню знаний I_F , который в силу ограниченности методов и чувств познания может отличаться от максимально возможного уровня знаний I_N на величину Δ . Фактически учёные спорят о величине этой разницы Δ (по И. Канту – разница между ноуменальным и феноменальным мирами, между «вещью в себе» и «вещью для нас»), которую также можно оценить коэффициентом достижимости знаний о ноуменальном мире $k_{F/N}$.

$$I_F = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n i_k \cdot \Delta t = \int_1^{\infty} i_k dt; \quad (3.6)$$

$$\Delta = I_N - I_F; \quad (3.7)$$

$$k_{F/N} = I_F / I_N. \quad (3.8)$$

где: $\Delta t, dt$ – рассматриваемый период времени познания;

i_k – информация, полученная за период Δt ;

n – число периодов познания.

Процесс диагностирования соответствует гносеологическому подходу к познанию: диагноз тем точнее, чем дольше и по большему числу параметров диагностируется объект. Но у любой системы диагностирования есть три предела её информативности: при проверке исправности Δ_I , проверке работоспособности $\Delta_{P/I}$ и проверке правильности функционирования $\Delta_{P/\Phi}$. Тогда знания об объекте диагностирования:

$$I_{I/P/\Phi} = \lim_{n \rightarrow T_{max}} \sum_{k=0}^{T_{max}} i_k \Delta t = \int_1^{T_{max}} i_k dt; \quad (3.9)$$

где: T_{max} – максимально допустимое время диагностирования;

$I_{I/P/\Phi}$ – информация одного из трёх видов диагностирования: I_I, I_P, I_Φ .

Время проверки правильности функционирования t_Φ определяется временем эксплуатации объекта: при $t_\Phi \rightarrow \infty$ уровень информации о правильном функционировании I_Φ приближается к уровню информации о работоспособности I_P :

$$I_R = \lim_{T_\Phi \rightarrow \infty} I_\Phi(T_\Phi). \quad (3.10)$$

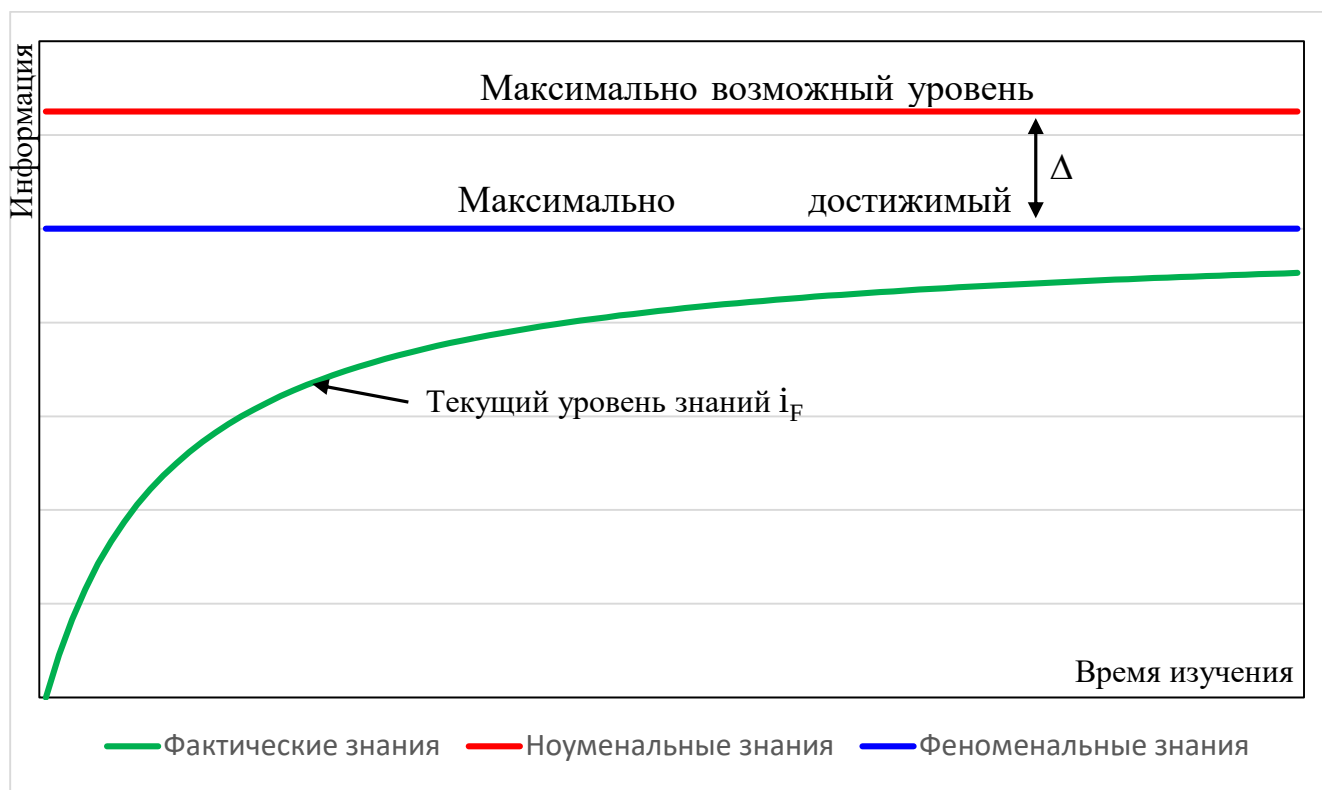


Рисунок 3.6 – Принципиальный график гносеологического понимания процесса познания

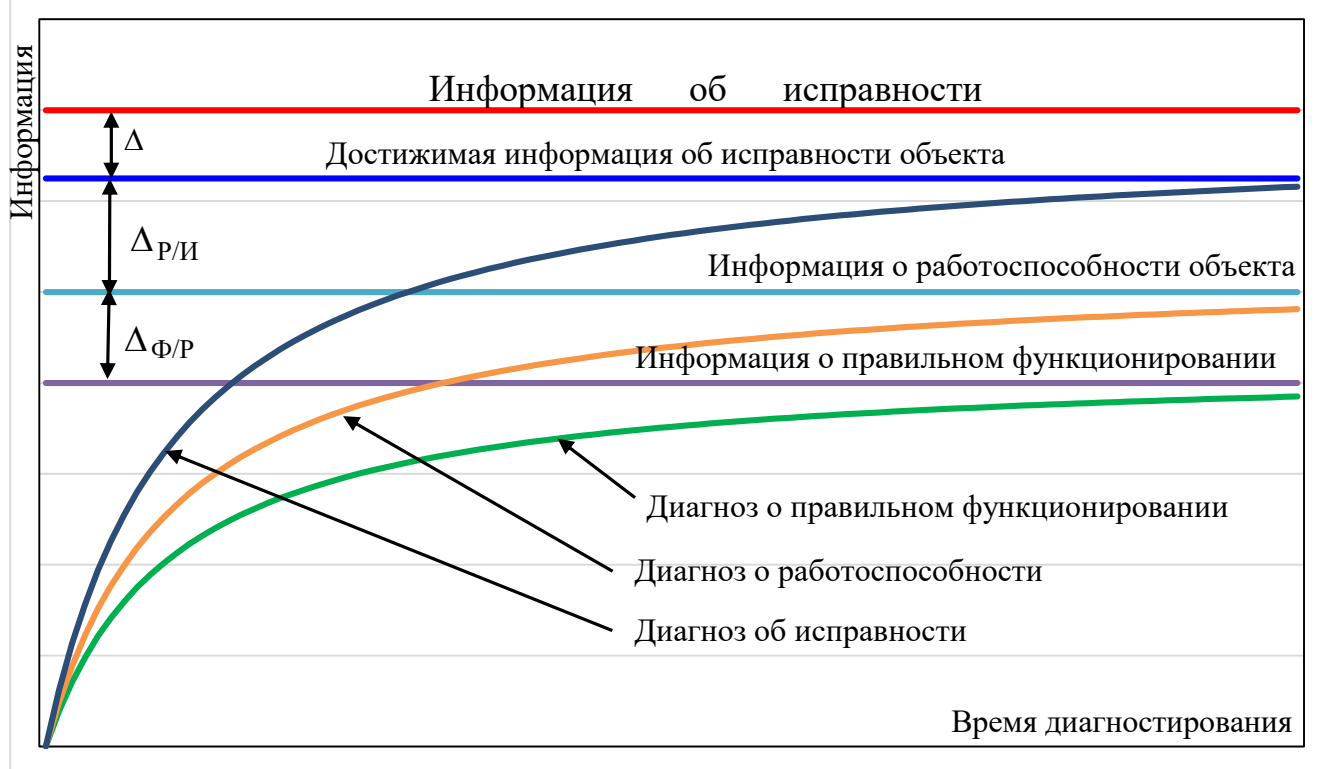


Рисунок 3.7 – Принципиальный график гносеологическое понимание процесса технического диагностирования

Таким образом, гносеологически правильно считать ограниченными возможности любой системы диагностирования, наличие вероятности ошибки, постепенность приближения к правильному диагнозу.

Примечание: формула 3.9 имеет ограничение по интенсивности потока отказов объекта диагностирования. Например, если на момент времени t_1 произошёл штатный вход в рекуперацию, то это не значит, что на момент времени $t_2 \gg t_1$ система рекуперации будет исправна из-за наличия интенсивности отказов системы даже в нерабочем режиме.

Аналогично процессу познания эффективность системы диагностирования можно оценить коэффициентом информативности АСТД k через отношение знаний о работоспособности I_P объекта к информации об исправности I_{II} , информации о правильном функционировании I_Φ к информации о работоспособности I_P :

$$k_{P/II} = I_P / I_{II}; \quad (3.11)$$

$$k_{II/\Phi} = I_\Phi / I_P. \quad (3.12)$$

Из приведённых формул очевидно, что главное отличие процесса диагностирования от общего процесса познания – это ограниченность времени постановки диагноза t максимально допустимым временем диагностирования T_{MAX} : $t \leq T_{MAX}$. Поэтому дополнительно для оценки системы диагностирования целесообразно ввести коэффициент достижения полной информации о правильном функционировании, работоспособности и исправности за ограниченное время T_{MAX} в сравнении с теоретически возможным уровнем информации при неограниченном времени T_∞ :

$$k_{tII/P/\Phi} = I_{II/P/\Phi}(T_{MAX}) / I_{II/P/\Phi}(T_\infty). \quad (3.13)$$

Примечание: недостаток формулы 3.13 – это отсутствие учёта стоимости последствий того или иного отказа, т.е. затрат на восстановление работоспособности и потерь перевозочного процесса от отказа. Далее будет предложен алгоритм, устраняющий этот недостаток.

Таким образом, гносеологической основой систем диагностирования является тезис об ограниченности наших знаний об объекте диагностирования. Решение о техническом состоянии объекта диагностирования всегда приходится принимать с вероятностью ошибки. Ошибка первого рода: отказ есть, но он не диагностирован. Ошибка второго рода: отказа нет, но он диагностирован. Тогда вероятность появления ошибок первого и второго рода можно оценить по предложенному коэффициенту полноты информации $k_{tII/P/\Phi}$.

3.1.6 Методы теории информации в диагностике

Переход от философских понятий «Вещь в себе» (ноуменальный мир) и «Вещь для нас» (феноменальный мир) к строгим математическим методам были осуществлены в XX веке в рамках создания теории информации [120] и теории обработки сигналов [152]. Большой вклад в развитие теории информации внесли Гарри Найквист, Ральф Хартли, Клод Шеннон и др. [340]. По сути задача распознавания сигнала, посланного источником, очень близка к задаче диагностирования (она же – задача по феноменальному признаку распознать ноуменальный объект).

Одно из основных понятий теории информации – «Энтропия» (информационная энтропия, энтропия Шеннона) [340, 380]: мера неопределённости некоторой системы. При этом в основу положена логарифмическая мера информации I (мера Хартли):

$$I = K \cdot \log_2(N), \quad (3.14)$$

где: N – количество символов в используемом алфавите;

K – длина сообщения;

$M = N^K$ – количество вариантов сообщения.

Далее рассмотрено три примера для задачи диагностирования [287]:

- если у объекта диагностирования два состояния – исправен/неисправен, то количество информации будет:

$$I_1 = 1 \cdot \log_2(2) = 1; N = 2^1 = 2; M = 2^1 = 2; \quad (3.15)$$

- если у объекта диагностирования есть 32 элемента, один из которых может быть неисправен, то количество информации будет:

$$I_2 = 1 \cdot \log_2(32) = 5; N = 2^5 = 32; M = 32^1 = 32; \quad (3.16)$$

- если у объекта диагностирования есть 32 элемента, три из которых одновременно могут быть неисправны (например, в случае зависимых отказов), то количество информации будет:

$$I_3 = 3 \cdot \log_2(32) = 15; N = 2^{15} = 32\,768; M = 32^3 = 1024. \quad (3.17)$$

В самом общем случае диагноз по итогам диагностирования может содержать информацию: объект исправен (работоспособен, правильно функционирует) или

объект неисправен (неработоспособен, не правильно функционирует). В этом случае энтропия диагностики I (мера Хартли по формуле 2.1) будет: $I = K \cdot \log_2(N) = 1 \cdot \log_2(2) = 1$. В задачи диагностирования входит не только определение технического состояния, но и локализация места отказа, поэтому состояние «Не исправно» распадается на N возможных отказов. Локомотив состоит из оборудования и узлов, которые делятся на детали, каждая из которых также может состоять из конечного числа элементов. Но каждый элемент может иметь самое разное число неисправностей: в общем случае число неисправных состояний локомотива стремиться к бесконечности $N \rightarrow \infty$:

$$I = \log_2(N) \rightarrow \log_2(\infty) \rightarrow \infty. \quad (3.18)$$

Таким образом, число диагнозов теоретически стремиться к бесконечности. Поэтому более удобен статистический подход к определению энтропии объекта диагностирования: число вариантов отказов всегда ограничено числом их наличия на практике. При интенсивности отказов, например, в 200 на 1 млн км пробега за время эксплуатации локомотива (40 лет) у него произойдёт

$$T = 4,8 \text{ млн км} \cdot 200 \text{ отк./млн км} = 960 \text{ отказов}. \quad (3.19)$$

В этом случае энтропия составит $H_\Sigma = \log_2(960) = 9,9$. Если бортовая система диагностирования будет распознавать 700 отказов из 960, то информативность АСТД будет $I_{\text{АСТД}} = \log_2(700) = 9,45$, а коэффициент эффективности АСТД по формуле 2.2 составит $k_{F/N} = I_{\text{АСТД}} / H_\Sigma = 9,45/9,9 = 0,954$. Даже если все отказы будут разными, то на парке в 3 тыс. секций теоретически возможно до 3 млн видов отказов с энтропией $H_\Sigma = \log_2(3000000) = 21,5$. На практике число видов отказов существенно меньше. Таким образом, задача исчисления энтропии технического состояния локомотива для АСТД решаема.

Вероятность возникновения тех или иных видов отказов может существенно отличаться, поэтому приведённые выше расчёты не будут отражать реальную эффективность СТД. Мера Хартли является частным случаем (для равновероятных событий) широко распространённой формулы Шеннона [122], согласно которой энтропия технического состояния локомотива $H_\Sigma(N)$ и количество информации СТД $I_{\text{АСТД}}$ («Информативность источника», приходящаяся на один сигнал) рассчитывается по формуле:

$$H(A) = I = - \sum_{i=0}^N P_i * \log(P_i), \quad (3.20)$$

где P_i - вероятность i -го события при условии, что $\sum_{i=0}^N P_i \leq 1$.

Понятие количества информации I применительно к системам диагностирования позволяет оценить эффективность той или иной системы диагностирования. Приведём несколько примеров:

- 1 Система безотказна: есть одно событие «Исправное состояние» ($i=1$), вероятность наступления которого $P_i = 1$, тогда объём полезной информации равен нулю: $I_1 = 1 \cdot \log_2(1) = 1 \cdot 0 = 0$. Эффективность СТД $k_{СТД} = 0$.
- 2 Система за заданный период эксплуатации исправна с вероятностью $P_0 = 0,8$, при этом могут наступить 4 отказа с вероятностью $P_1 = 0,1$, $P_2 = 0,05$, $P_3 = 0,03$, $P_4 = 0,02$. Тогда $I_2 = 0,8 \cdot 0,32 + 0,1 \cdot 3,32 + 0,05 \cdot 4,32 + 0,03 \cdot 5,06 + 0,02 \cdot 5,64 = 1,07$. Если, например, СТД распознаёт все состояния, кроме последнего, то эффективность СТД будет: $k_{СТД} = 0,958/1,070 = 0,895$.
- 3 Если по предыдущему примеру в расчёте не учитывать исправное состояние, тогда: $P_1 = 0,5$, $P_2 = 0,25$, $P_3 = 0,15$, $P_4 = 0,1$. Тогда:

$$I_3 = 0,5 \cdot 1 + 0,25 \cdot 2 + 0,15 \cdot 2,74 + 0,1 \cdot 3,32 = 1,74, \text{ а } k_{СТД} = 1,411/1,743 = 0,809.$$

Таким образом, т.к. вероятность исправного состояния много больше суммы вероятностей неисправных состояний, то информативность систем диагностирования лучше оценивать без учёта исправного состояния (примеры 2 и 3). Это соответствует утверждению теории информации, что максимальная информативность (максимальная энтропия) наступает при равновероятности всех возможных исходов.

Таким образом, понятия «энтропия» и «информативность» следует использовать при оценке эффективности систем диагностирования без учёта вероятности исправного состояния.

При техническом диагностировании [57] надёжность локомотива оценивается трудоёмкостью и материалоёмкостью восстановления работоспособного состояния S , поэтому формулу Шеннона в исходном виде использовать не целесообразно. Рассмотрим пример (таблица 3.2). Пусть имеется объект диагностирования, у которого вероятность исправного состояния за заданный период эксплуатации

$P_0 = 0,8$ и имеется семь отказов различной вероятности появления $P_1 - P_7$. Тогда в примере информативность системы по формуле Шеннона составит $I = 1,115$.

Таблица 3.2 – Пример определения информативности АСТД

N	P	Log ₂	-P·log ₂	C	P·C	P·C/S	log ₂	-P·C·log ₂
0	0,8	-0,322	0,2575	10	8	0,040	-4,63	0,187
1	0,1	-3,322	0,3322	100	10	0,051	-4,31	0,218
2	0,05	-4,322	0,2161	200	10	0,051	-4,31	0,218
3	0,025	-5,322	0,1330	400	10	0,051	-4,31	0,218
4	0,01	-6,644	0,0664	1000	10	0,051	-4,31	0,218
5	0,01	-6,644	0,0664	5000	50	0,253	-1,99	0,501
6	0,0025	-8,644	0,0216	10000	25	0,126	-2,99	0,377
7	0,0025	-8,644	0,0216	30000	75	0,379	-1,40	0,531
Σ	1		1,1150	46710	198	1		2,466

Предлагается учесть стоимость восстановления работоспособности по каждому отказу i (таблица 3.2) $C_i \in \{C_0, C_7\}$ как произведение вероятности отказа на приведённую стоимость восстановления работоспособности в случае не обнаружения отказа по формуле:

$$P_{Ci} = P_i \cdot C_i / S, \quad (3.21)$$

$$\text{где } S = \sum_{i=0}^7 P_i \cdot C_i - \text{суммарная стоимость ТОиР}, \quad (3.22)$$

$$\sum_{i=0}^7 P_i \cdot C_i / S = 1 \quad (3.23)$$

При расчёте по предложенному методу в рассмотренном примере энтропия системы возрастает с $H_{\Sigma} = 1,115$ до $H_{\Sigma} = 2,466$. Если в примере по таблице 3.2 АСТД распознаёт, например, отказы с 4 по 7, то её информативность будет:

– по формуле Шеннона: $I_{\text{АСТД}} = 0,07 + 0,07 + 0,02 + 0,02 = 0,176$;

$$k_{\text{АСТД}} = 0,176 / 1,115 = 0,157;$$

– по формуле 3.23: $I_{\text{АСТД}} = 0,22 + 0,50 + 0,38 + 0,53 = 1,63$, $k_{\text{АСТД}} = 1,627 / 2,466 = 0,66$.

Таким образом, теоретически низкая информативность АСТД ($k_{\text{СТД}} = 0,157$) оказывается существенно выше ($k_{\text{СТД}} = 0,659$), т.к. стоимость восстановления после отказов 4 – 7 высокая. Таким образом, при расчёте информативности по предложенной формуле эффективность СТД будет оцениваться более объективно, т.к. будет учитываться стоимость восстановления системы (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Расчёт информативности АСТД с учётом стоимости ремонтов

N	P	I_{pi}	C	C/S	I_{Ci}
0	0,8	0,2575	10	0,00021	0,003
1	0,1	0,3322	100	0,00214	0,019
2	0,05	0,2161	200	0,00428	0,034
3	0,025	0,1330	400	0,00856	0,059
4	0,01	0,0664	1000	0,02141	0,119
5	0,01	0,0664	5000	0,10704	0,345
6	0,0025	0,0216	10000	0,21409	0,476
7	0,0025	0,0216	30000	0,64226	0,410
Σ	1	1,1150	46710	1	1,464

Примечание: в качестве цены восстановления работоспособности целесообразно брать не цену произошедшего отказа C_{ni} , а стоимость более опасного отказа C_{oi} , который удалось предотвратить, за вычетом стоимости устранения предотказа:

$$C_i = C_{oi} - C_{ni}. \quad (3.24)$$

Примеры: недорогой ремонт форсунки предотвратит дорогой ремонт крышки цилиндра из-за возникшей трещины по причине перепада температур, вовремя заменив щётку из-за искрения удастся предотвратить круговой огонь по коллектору, заменив тиристор удастся исключить сквозной пробой ВИП.

Таким образом, эффективность АСТД можно оценить как отношение информативности СТД $I_{АСТД}$ к полной информационной энтропии H_{Σ} .

Примечание: аналогичный подход можно было реализовать, если рассмотреть вероятность появления отказа i и его стоимость C_i как два независимых источника информации, тогда, исходя из свойства аддитивности энтропии [120]:

$$H(i, C_i) = H(i) + H(C_i). \quad (3.25)$$

В таблице 3.3 приведены результаты расчёта по приведённой формуле:

$$I_{\Sigma} = I_{pi} + I_{Ci} = 1,115 + 1,464 = 2,579. \quad (3.26)$$

Результаты расчёта отличаются, что очевидно:

$$\text{Вариант 1: } I_i = P_i \cdot C_{si} \cdot \log_2(P_i \cdot C_{si}) = P_i \cdot C_{si} \cdot \log_2(P_i) + P_i \cdot C_{si} \cdot \log_2(C_{si}). \quad (3.27)$$

$$\text{Вариант 2: } I_i = P_i \cdot \log_2(P_i) + C_{si} \cdot \log_2(C_{si}). \quad (3.28)$$

Следует выбрать один из двух вариантов – формулы 3.26 и 3.27.

По свойствам формулы Шеннона максимальная информативность I получается при равновероятности событий и одинаковой стоимости восстановления работоспособности. При существенном росте стоимости одного из отказов i получаем, что в первом варианте информативность системы стремиться к информативности этого отказа $I_{\Sigma} \rightarrow I_i$, а во втором – к информативности по вероятности $I_{\Sigma} \rightarrow I_p$. В примере – это $I_p = 1,115$.

$$I_{\Sigma} = \lim_{C_i \rightarrow \infty} (\sum_{i=0}^N (P_i \cdot C_i / S \cdot \log_2(P_i \cdot C_i / S))) = P_i \cdot \log_2(P_i). \quad (3.29)$$

$$I_{\Sigma} = \lim_{C_i \rightarrow \infty} [\sum_{i=0}^N (P_i \cdot \log_2(P_i) + (C_i / S) \cdot \log_2(C_i / S))] = \sum_{i=0}^N (P_i \cdot \log_2(P_i)) = I_p. \quad (3.30)$$

В первом случае при существенной разности стоимости восстановления информативность АСТД падает, что логично: высокая стоимость отдельно взятого отказа может свидетельствовать о неравномерном разбиении объекта диагностирования на элементы. Во втором случае информативность системы становится независимой от стоимости, что не соответствует решаемой задаче.

Таким образом, эффективность АСТД k по формуле 3.8 следует оценить как отношение информативности АСТД $I_{\text{АСТД}}$ к общей энтропии технического состояния объекта с учётом стоимости восстановления системы I_{Σ} :

$$\begin{aligned} k_{\text{АСТД}} &= I_{\text{АСТД}} / I_{\Sigma} = \\ &= [\sum_{i=0}^N (E_i \cdot I_i)] / [\sum_{i=0}^N I_i] = \\ &= [\sum_{i=0}^N (E_i \cdot P_i \cdot (C_i / S) \cdot \log_2(P_i \cdot (C_i / S)))] / [\sum_{i=0}^N (P_i \cdot (C_i / S) \cdot \log_2(P_i \cdot (C_i / S)))] \end{aligned} \quad (3.31)$$

где $E_i \in [0, 1]$ – эффективность АСТД при диагностировании i -того состояния.

В предлагаемой формуле стоимость восстановления C_i можно брать в абсолютных и относительных значениях. Пример: пусть АСТД диагностирует микропроцессорную систему управления (МСУ), состоящую из 5 однотипных входных плат, микропроцессорной платы и трёх выходных плат. Самый дорогой среднестатистический ремонт у микропроцессорной платы, который принимается за 1. Если считать, что АСТД распознаёт все отказы, кроме отказа микропроцессорной платы, то для вероятностей отказов, приведённых в таблице 3.4, эффективность СТД будет 0,406.

Таким образом, для оценки информационной эффективности автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) в исходной формуле Шеннона, наряду с вероятностью наступления отказа, следует учитывать стоимость восстановления после этих отказов. Коэффициент эффективности АСТД следует считать по предлагаемой формуле 3.31 [271].

Таблица 3.4 – Пример расчёта эффективности АСТД

N	Отказ	P	I_P	C	C_i	E_i	I_Σ	$I_{\text{СТД}}$
0	Исправен	0,75	0,311	0,01	0,004	1	0,02684	0,02684
1	Процессор	0,1	0,332	1	0,433	0	0,19610	0,00000
2	Вход 1	0,024	0,129	0,2	0,087	1	0,01852	0,01852
3	Вход 2	0,024	0,129	0,2	0,087	1	0,01852	0,01852
4	Вход 3	0,024	0,129	0,2	0,087	1	0,01852	0,01852
5	Вход 4	0,024	0,129	0,2	0,087	1	0,01852	0,01852
6	Вход 5	0,024	0,129	0,2	0,087	1	0,01852	0,01852
7	Выход 1	0,01	0,066	0,1	0,043	1	0,00484	0,00484
8	Выход 2	0,01	0,066	0,1	0,043	1	0,00484	0,00484
9	Выход 3	0,01	0,066	0,1	0,043	1	0,00484	0,00484
Σ		1	1,488	2,31	1		0,330	0,134
Коэффициент эффективности АСТД $K_{\text{АСТД}} = I_{\text{АСТД}} / I_\Sigma$							0,406	

3.1.7 Методика анализа эффективности систем технического диагностирования оборудования локомотива

Выведенная в предыдущем подразделе формула 3.31 положена в основу дальнейших исследований [287].

На рисунке 3.8 приведена блок-схема алгоритма исследования функциональности и эффективности современных автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) [271].

В начале локомотив разбивается на $k \in K$ подсистем (видов оборудования), по каждому из которых следует выполнить исследование на его ремонтпригодность и возможность диагностирования (блок 1). Если система диагностирования является специализированной на определенном виде оборудования, то рассматривается только это оборудование. Например, дизель, тяговый электродвигатель, выпрямительно-инверторный преобразователь и др.

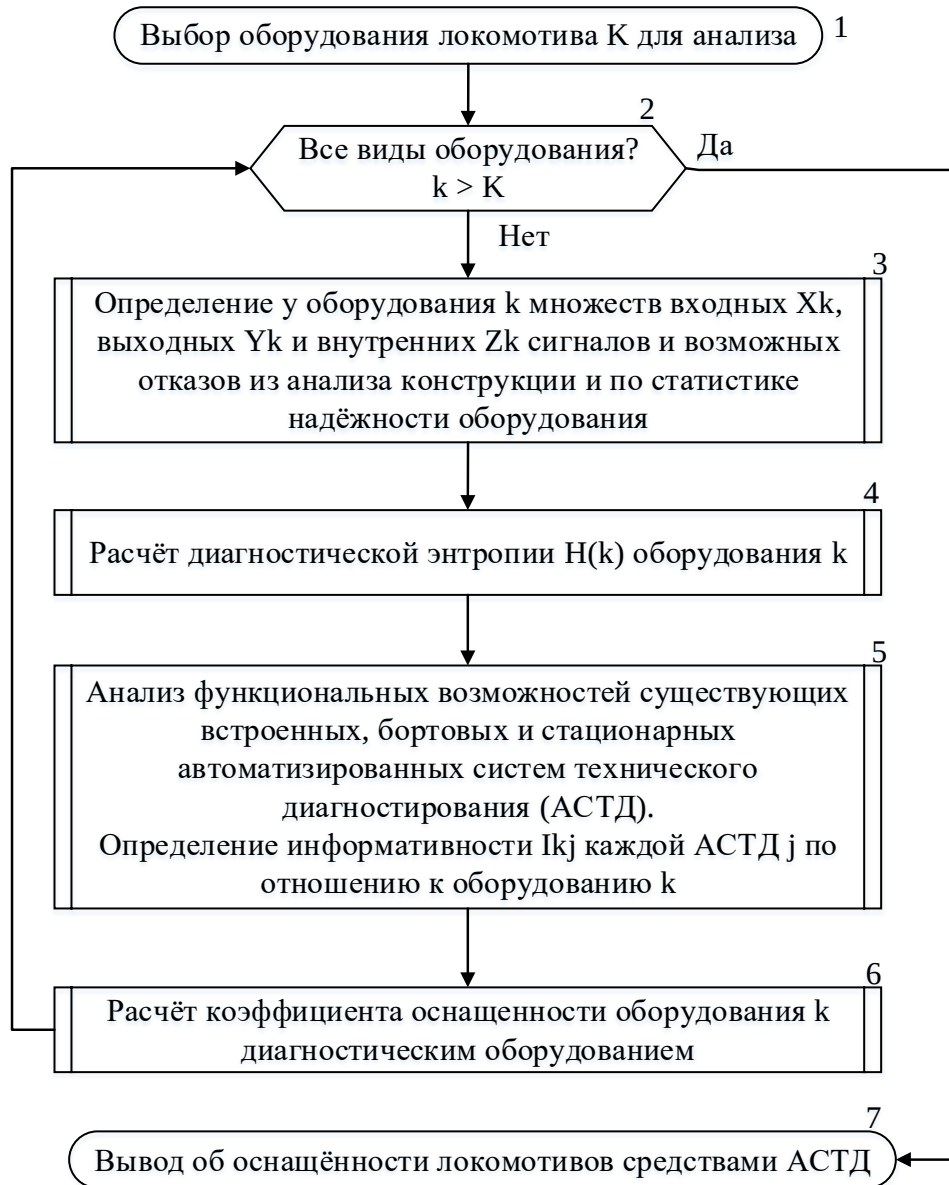


Рисунок 3.8 – Алгоритм анализа эффективности и информативности АСТД

Для оборудования k выполняется анализ его конструкции Z_k , входных X_k , выходных Y_k сигналов и статистики отказов, по которой определяется вероятность возможного отказа P_k за заданный период времени с учётом стоимости устранения S_k (блок 3). В результате рассчитывается диагностическая энтропия H_k оборудования k по предложенным и обоснованным формулам 2.20 – 2.22 (блок 4).

Далее производится анализ существующих видов АСТД $j \in J$ этого оборудования (блок 5). Отдельно рассматриваются встроенные, бортовые и стационарные АСТД k и их информативность I_{kj} по отношению к оборудованию k . В результате определяется информативность АСТД по предложенному коэффициенту информативности по формуле 3.31.

$$K_{АСТДki} = I_{ki} / H_k. \quad (3.32)$$

Также определяется общая информативность всех АСТД k -того оборудования $K_{АСТДk}$ по формуле:

$$K_{АСТДk} = I_k / H_k. \quad (3.33)$$

После обработки данных по каждому виду оборудования определяется общая информативность систем диагностирования локомотива $K_{АСТД0}$ (блок 7) по формуле:

$$K_{АСТД0} = I_0 / H_0. \quad (3.34)$$

В качестве исходных данных (таблица 3.5) для выполненных расчётов использованы описание АСТД, параметры надёжности оборудования, взятые согласно ТУ или статистическим расчётам. Также использованы статистические данные компании «Кlover Групп» [348]. Стоимость ремонта взята в относительных величинах, где за 1 принят самый дорогой ремонт (например, дизеля). Межремонтный пробег между смежными ТОиР объёма ТР-1 – 50 тыс. км.

Таблица 3.5 – Исходные данные для расчёта эффективности АСТД

№ п/п	Оборудование	Ci	λ_i , отк./млн км	Pi
1	Дизель	1,00	5	0,22
2	Тяговые электродвигатели	0,50	5	0,22
3	Преобразователи	0,70	0,3	0,01
4	Электрические аппараты	0,15	8	0,33
5	Микропроцессорные системы управления (МСУ)	0,10	0,3	0,01
6	Колёсно-моторный блок (механические отказы)	0,70	2	0,10
7	Механическое оборудование (тележка, подвеска, автосцепка)	0,30	0,5	0,02
8	Вспомогательные машины	0,30	1	0,05
9	Цепи управления	0,05	2	0,10
10	Тяговый трансформатор	0,70	0,3	0,01

Ранее отмечалось, что высокая вероятность исправного состояния снижает информативность системы. При использовании формулы 3.31 это негативное свойство нивелируется за счёт низкой стоимости сопровождения исправного состояния C_0 . При этом всегда $C_0 > 0$ из-за отсутствия логарифма нуля $\log_2(0)$.

Исходными данными о надёжности оборудования i является интенсивность их отказов λ_i в размерности числа отказов на 1 млн км [298], по которой рассчитывается вероятность наступления отказа P_i между двумя плановыми заходами в локомотивное депо на ремонт в объёме ТР-1 (50 тыс. км). Для экспоненциального закона распределения случайной величины:

$$P_i = e^{-\lambda \cdot a} - e^{-\lambda \cdot b} = e^{-\lambda \cdot 0,00} - e^{-\lambda \cdot 0,05} = 1 - e^{-\lambda \cdot 0,05}, \quad (3.35)$$

где a и b – начало и конец участка наблюдения: $a = 0$ млн км, $b = 0,05$ млн км.

Вероятность исправного состояния P_0 соответствует вероятности, что ни один отказ не наступит:

$$P_0 = (1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \cdot (1 - P_3) \cdot \dots = \prod (1 - P_i); \quad (3.36)$$

с учётом формулы 3.35:

$$P_0 = \prod (1 - P_i) = \prod (1 - 1 - e^{-\lambda_i \cdot t}) = \prod (e^{-\lambda_i \cdot t}). \quad (3.37)$$

Для практического использования предлагаемой методики разработана типовая таблица в среде Excel с автоматическим расчётом коэффициента информативности АСТД, в которую надо только подставить исходные данные (примеры таблиц приведены в подразделах 3.2 и 3.3). Достоинством предлагаемой методики является универсальность подходов теории информации к рассмотрению самых разнообразных типов АСТД.

В подразделе 3.3 рассмотрены бортовые АСТД на базе микропроцессорных систем, т.к. в разделе 1 доказано, что существует тренд использования именно бортовой диагностики при организации ТОиР. К сожалению, будет доказана ограниченность возможностей бортовых АСТД отечественных локомотивов, поэтому в подразделе 3.4 будет рассмотрена эффективность основных видов депо-ских стационарных и переносных АСТД. Информационная эффективность АСТД ещё не является основанием для включения её в технологические процессы ТОиР, т.к. следует дополнительно оценить её экономическую целесообразность, что выполнено в следующем, четвёртом разделе.

Таким образом, разработана методика оценки информационной эффективности АСТД с позиций теории информации с учётом специфики применения АСТД.

3.2 ИНФОРМАЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ БОРТОВЫХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

3.2.1 Функциональная характеристика бортового диагностирования

Современные отечественные локомотивы (серии Э5К, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К, ЭП1, ЭП1М, ЭП1П, 2ЭС4К, 3ЭС4К, 2ЭС5С, 2ЭС6, 2ЭС10, 2ТЭ116У, 2ТЭ25КМ, 3ТЭ25КМ, 2ТЭ25К2М, ТЭМ18Д и др.) аналогично зарубежным имеют микропроцессорную систему управления (МСУ), достаточно однотипную по своей функциональности (рисунок 3.9) [1, 112, 152, 172, 305, 311, 386].

Управление движением локомотива осуществляется с пульта машиниста с использованием контролера машиниста, тумблеров, электронных кнопок, сенсорных экранов и др. Часть управляющих воздействий идёт непосредственно на оборудование (быстродействующий выключатель, автоматические тормоза и др.). Основные команды поступают (по интерфейсу CAN, RS и др.) в МСУ, в которой согласно заданию машиниста и информации с датчиков по заложенному в программном обеспечении МСУ алгоритму осуществляется управление оборудованием: ДГУ тепловозов, электрическими аппаратами, тиристорными и IGBT преобразователями (например, выпрямителями, ВИП, ПСН и др.). Конечной целью является управление скоростью поезда и силой тяги локомотива путём изменения тока тяговых электродвигателей (ТЭД) колёсно-моторных блоков (КМБ). Через установленные в цепях и оборудовании локомотива датчики (подраздел 3.1.4) автоматически контролируются параметры работы локомотива, которые поступают в МСУ в качестве сигналов обратной связи (подраздел 3.1.5). Все формируемые в процессе управления приводом данные передаются в «Блок индикации» (по исполнению - промышленный компьютер) и там сохраняются на энергонезависимом носителе (например, магнитном диске), а также отображаются машинисту на экране (с возможностью изменения форм представления информации). Обычно есть возможность автоматического обмена информацией по радиоканалу со стационарным сервером центра управления (диспетчерским центром), в качестве которого в будущем будет выступать АСУ «Цифровая железная дорога».



Рисунок 3.9 – Типовая структура управления локомотивом на базе МСУ

Таким образом, формируемая в процессе управления информация содержит диагностическую информацию о техническом состоянии локомотива и режимах его работы, которая может быть использована в процессе ТОиР.

Различные бортовые системы диагностирования имели место на локомотиве ещё на паровозах. В современном понимании диагностика впервые появилась на электровозах серии ВЛ80Р [236, 367] с электронной системой управления (БУВИП) [123, 124, 229, 367, 368]. Именно опыт проектирования и эксплуатации ВЛ80Р и ВЛ85 позволил создать комплексную систему управления современных электровозов переменного тока семейства ЭС5К с бортовой системой технического диагностирования на базе МСУ – МСУД [311]. Сформировалась концепция бортового диагностирования без создания дополнительных аппаратно-программных комплексов [271].

Как было доказано в подразделе 3.1.2, бортовые АСТД являются встроенными по отношению к локомотиву в целом и внешними по отношению к каждому виду оборудования локомотива. Если в оборудовании локомотива имеются встроенные АСТД (например, в дизель-генераторной установке, ВИП, в преобразователях собственных нужд (ПСН) и др.), то обработанная информация с этих встроенных АСТД должна передаваться в бортовую.

Кроме штатных систем управления на ряде локомотивов устанавливается микропроцессорная система управления движением поезда УСАВП [7], позволяющая вести поезд с учётом профиля и массы поезда по энергооптимальному графику, в т.ч. во взаимодействии с диспетчерским центром (цифровой железной дороги). УСАВП также можно использовать как АСТД.

На тепловозах для учёта топлива устанавливаются микропроцессорные аппаратно-программные комплексы (АПК) с функциями диагностирования: АПК «БОРТ» разработки НИИТКД [12, 13], АСК разработки ВНИКТИ (г. Коломна), РПДА разработки ОЦВ (г. Москва), АСК-ВИС (г. Санкт-Петербург) и др. [172].

Таким образом, принципы функционирования современных микропроцессорных систем управления локомотивов (МСУ) [288] создают предпосылки для реализации на их базе автоматизированной бортовой системы диагностирования (АСТД) для взаимодействия с системой ТОиР за счёт доработки программного обеспечения с минимальными затратами на аппаратные средства, что является предпочтительным.

3.2.2 Диагностика электровозов переменного тока

Электровозы производства НЭВЗ (г. Новочеркасск) переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) (серии ВЛ80Р, ВЛ85, ВЛ65, ЭП1, ЭП1М, ЭП1П, Э5К, 2ЭС5К, 3ЭС5К, 4ЭС5К) – самый массовый тип отечественных электровозов. Все современные электровозы имеют микропроцессорную систему управления и диагностирования – МСУД (рисунок 3.10) [311].

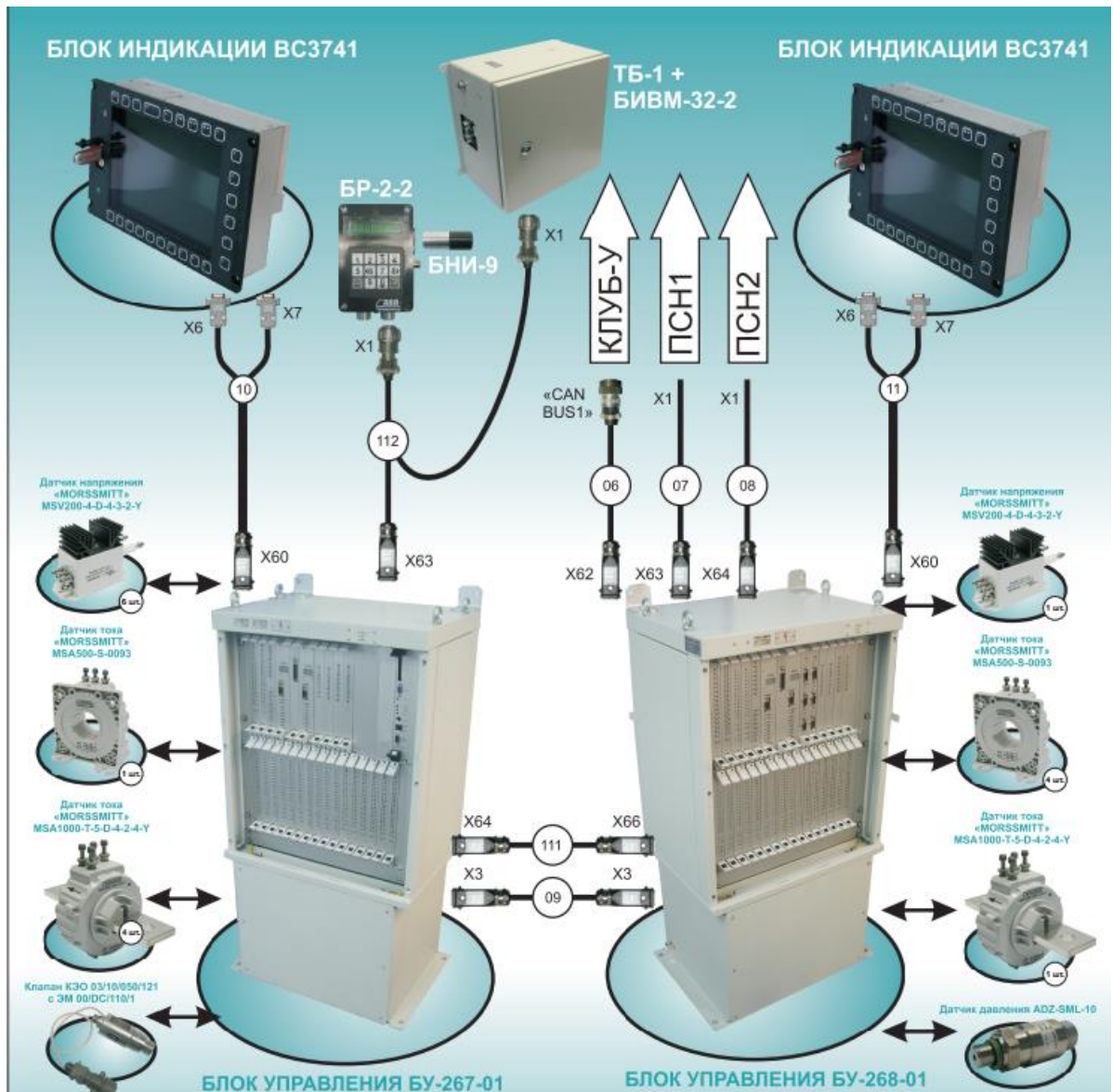


Рисунок 3.10 – Аппаратные средства МСУД (по данным ЛЭС) [172, 311]

Сам МСУД имеет дублированную структуру: состоит из двух полукомплектов, собранных в едином корпусе. Диагностическая информация собирается с датчиков в МСУ через аналогово-цифровые преобразователи (АЦП), обрабатывается, используется для реализации алгоритмов управления

выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) и передаётся для сохранения и отображения информации машинисту в бортовой компьютер (блок индикации), находящийся в каждой кабине машиниста. Диагностическая функциональность МСУД, в основном, определяется наличием соответствующих датчиков: скорости движения локомотива, токов и напряжения каждого тягового электродвигателя, параметров управления ВИП, напряжения в контактной сети и др. Также через бинарные сигналы контролируется работа низковольтных и силовых цепей управления.

Дизель-генераторной установки (ДГУ) на электровозах нет ($P_1 = 0$, $E_1 = 0$). По тяговым электродвигателям ($i=2$) контролируется их работоспособность, вольтамперные, скоростные характеристики, отклонение которых от нормы может свидетельствовать о наличии предотказов. Нет возможности контролировать состояние щёточно-коллекторного узла, моторно-якорных подшипников, крепления полюсов к остову, электрическую прочность изоляции. Поэтому способности МСУД по контролю ТЭД можно оценить на уровне $E_2=0,7$. Теоретически диагностические способности по ТЭД могут быть расширены за счёт установки дополнительных вибродатчиков, датчиков искрения щёток, датчиков высокочастотного колебания тока и напряжения и др.

По выпрямительно-инверторным преобразователям (ВИП) ($i=3$) имеется возможность контролировать их работоспособность: $E_3 = 0,7$. Косвенно диагностическая функциональность может быть повышена за счёт контроля качества входа в рекуперацию, разброса параметров различных ВИП и др. При наличии в составе ВИП встроенной АСТД с передачей данных в МСУД информативность диагностирования можно повысить. Например, по данным встроенной диагностики можно выявлять отдельные отказавшие тиристоры в плечах ВИП, включённых последовательно-параллельно: на 8 плеч ВИП приходится 64 тиристора.

Диагностирование электрических аппаратов ($i = 4$) возможно по факту их срабатывания. Специалистами сервисного локомотивного депо «Барабинск» (Западно-Сибирская ж.д.) разработана методика выявления предотказных состояний электрических аппаратов локомотивов по разнице времени между

командой и замыканием (размыканием) контакторов. $E_4 = 0,8$. Не контролируется дугогасительная камера.

Само диагностирование МСУ ($i = 5$) в МСУД находится на высоком уровне: контролируется исправность как сменных модулей МСУД, так и датчиков, сигналы которых поступают на вход МСУД. $E_5 = 0,99$.

Колёсно-моторный блок ($i = 6$) и другое механическое оборудование ($i=7$) МСУД практически не контролирует, хотя есть рекомендации по установке соответствующих датчиков виброускорения. Косвенно по разбросу токов и боксованию можно оценить исправность механической подсистемы локомотива: например, при разбросе диаметров бандажей колёсных пар при одной и той же скорости движения локомотива скорость вращения ТЭД будет разной, а значит они будут находиться в разных частях скоростной характеристики. Расчёты показали, что даже при допустимой разнице диаметров бандажей разброс токов может достигать 50А. Аналогично колёсная пара с меньшим диаметром более склонна к боксованию. Ещё хуже ситуация на трёхосных тележках (например, проблема была на ЭП2К), где из-за неправильной настройки механической части (не только развески) возникала склонность к боксованию, возможен отказ механической части. $E_6 = 0,2$, $E_7 = 0,2$.

Аналогично с контролем вспомогательных машин: $E_8 = 0,1$.

Цепи управления ($i = 9$) за счёт наличия бинарных сигналов (от 100 до 200) достаточно хорошо контролируются: $E_9 = 0,7$.

Тяговый трансформатор ($i = 10$) контролируется по напряжению в контактной сети и на вторичных обмотках: $E_{10} = 0,7$. Нет контроля состояния охлаждающего масла, исправности изоляторов и крепления. За счёт применения дополнительных датчиков качество диагностирования можно повысить.

Сводные данные по диагностической информативности МСУД представлены в таблице 3,6. В таблице 3.7 приведены перспективные данные МСУД при установке на электровозе дополнительных датчиков, описанных выше. Для достижения $k_{МСУД} > 0,8$ необходимо обеспечить измерение следующих параметров оборудования локомотива (без учёта ДГУ):

Таблица 3.6 – Диагностическая информативность существующих АСТД на базе МСУД электровозов переменного тока с ВИП

<i>i</i>	Оборудование	P_i	C_i	$C_{нприв}$	E_i	$H_{МСУДi}$	$I_{МСУДi}$
0	Исправное состояние	0,38	0,1	0,028	1	0,07	0,07
2	Тяговые электродвигатели	0,22	0,5	0,139	0,7	0,15	0,11
3	Преобразователи	0,01	0,7	0,194	0,6	0,02	0,01
4	Электрические аппараты	0,33	0,15	0,042	0,8	0,08	0,07
5	МСУ	0,01	0,1	0,028	0,99	0,00	0,00
6	КМБ без ТЭД	0,10	0,7	0,194	0,2	0,11	0,02
7	Механическое оборудование	0,02	0,3	0,083	0,1	0,02	0,00
8	Вспомогательные машины	0,05	0,3	0,083	0,1	0,03	0,00
9	Цепи управления	0,10	0,05	0,014	0,7	0,01	0,01
10	Тяговый трансформатор	0,01	0,7	0,194	0,8	0,02	0,02
	ИТОГО		3,6	1,00		0,53	0,32
	$k_{МСУД} = I_{МСУД} / H_{МСУД}$		0,600				

Таблица 3.7 – Диагностическая информативность перспективных АСТД на базе МСУД электровозов переменного тока с ВИП

<i>i</i>	Оборудование	P_i	C_i	$C_{нприв}$	E_i	$H_{МСУДi}$	$I_{МСУДi}$
0	Исправное состояние	0,38	0,10	0,028	1	0,07	0,07
2	Тяговые электродвигатели	0,22	0,50	0,139	0,9	0,15	0,14
3	Преобразователи	0,01	0,70	0,194	0,9	0,02	0,02
4	Электрические аппараты	0,33	0,15	0,042	0,9	0,08	0,08
5	МСУ	0,01	0,10	0,028	0,99	0,00	0,00
6	КМБ без ТЭД	0,10	0,70	0,194	0,5	0,11	0,05
7	Механическое оборудование	0,02	0,30	0,083	0,5	0,02	0,01
8	Вспомогательные машины	0,05	0,30	0,083	0,8	0,03	0,03
9	Цепи управления	0,10	0,05	0,014	0,9	0,01	0,01
10	Тяговый трансформатор	0,01	0,70	0,194	0,9	0,02	0,02
	ИТОГО		3,6	1,00		0,53	0,43
	$k_{МСУД} = I_{МСУД} / H_{МСУД}$		0,814				

- виброускорение, виброскорость, виброперемещение основных узлов локомотива (ДГУ, буксы, экипажная часть, ТЭД щёткодержатели и др.);
- температура нагрева основных узлов локомотива;
- уровень и качество смазки;
- токи якоря, обмотки возбуждения каждого ТЭД;
- напряжение на каждом ТЭД;
- частота вращения якоря (ротора) каждой электрической машины;
- искрение на коллекторе;
- сила нажатия щёткодержателей;
- биение коллектора (через виброускорение);
- скорость срабатывания электрических аппаратов;
- сила нажатия электрических аппаратов;
- сопротивление изоляции;
- количество циклов включения-отключения (ресурс);
- коммутируемый электрическими аппаратами ток;
- температура и давление воздушных потоков;
- сила нажатия в тормозной системе;
- динамика изменения силы нажатия в тормозной системе;
- объём торможения;
- длина и скорость выхода штока тормозных цилиндров;
- динамика изменения давления в тормозной системе.

Таким образом, диагностическая информативность МСУД достаточно низкая: $k_{МСУД} = I_{МСУД} / H_{МСУД} = 0,6$. Повысить информативность МСУД можно за счёт установки дополнительных датчиков и использования встроенных АСТД, например, в ВИП, в преобразователе собственных нужд, вспомогательных машинах и др. Но и в этом случае информативность МСУД будет $k_{МСУД} = 0,814$: необходимо применение и депокских АСТД.

Коэффициент информативности бортовой системы диагностирования современных отечественных электровозов переменного тока существенно меньше единицы, что не позволяет говорить о достаточности бортовой диагностики для полного диагностирования с формированием плана ТОиР с учётом этих данных. Не диагностируется механическое оборудование и экипажная часть, недостаточно контролируются электрические аппараты и силовые и низковольтные управляющие цепи. Современных АСТД недостаточно для перехода от планово-предупредительной системы ТОиР к ремонту по фактическому состоянию (предиктивному ремонту).

Максимально насыщенным средствами диагностирования транспортным средством можно считать космических корабль "Спейс Шаттл" (США) [396]. При этом из 6 аппаратов два потерпели крушение. Более того, есть версия, что первое крушение произошло из-за неисправности бортовой АСТД: диагностирование тепловой защиты давало сбои (ошибки второго рода). И когда было действительно диагностировано нарушение тепловой защиты – посчитали это ошибкой диагностики, что и привело к трагедии.

Опыт компаний Siemens и General Electric (раздел 1) показывает, что в значительной степени локомотив можно оснастить бортовыми средствами диагностирования. Однако компании Siemens пришлось отказаться от тотальной диагностики скоростных поездов ICE, т.к. ТОиР датчиков сами стали проблемой. И обе компании продолжают строго придерживаться планово-предупредительной системы ТОиР с использованием при обслуживании оборудования сложных методов деповского и заводского диагностирования.

3.2.3 Диагностирование электровозов постоянного тока

На отечественных электровозах постоянного тока производства НЭВЗ установлены соответственно МСУ производства ЛЭС типа МСУД-001 для электровозов серии 2(3)ЭС4К (рисунок 3.11) и МПСУ для электровозов серии ЭП2К. По принципу действия и диагностической функциональности МСУ этих локомотивов аналогичны МСУД (таблица 3.8). Отсутствует тяговый трансформатор и силовые преобразователи – есть только преобразователи собственных нужд (ПСН).



Рисунок 3.11 – Аппаратные средства МСУД 2(3)ЭС4к (по данным ЛЭС [311])

Таблица 3.8 – Диагностическая информативность АСТД на базе МСУД и МПСУ электровозов постоянного тока

i	Оборудование	P_i	C_i	$C_{интв}$	E_i	$H_{МСУД_i}$	$I_{МПСУ_i}$
0	Исправное состояние	0,22	0,10	0,04	0,90	0,10	0,10
2	Тяговые электродвигатели	0,01	0,50	0,21	0,80	0,20	0,18
3	Преобразователи	0,33	0,20	0,08	0,80	0,01	0,01
4	Электрические аппараты	0,01	0,15	0,06	0,99	0,12	0,09
5	МСУ	0,10	0,10	0,04	0,20	0,01	0,01
6	КМБ без ТЭД	0,02	0,70	0,29	0,10	0,14	0,03
7	Механическое оборудование	0,05	0,30	0,13	0,00	0,03	0,00
8	Вспомогательные машины	0,10	0,30	0,13	0,70	0,04	0,00
9	Цепи управления	0,22	0,05	0,02	0,90	0,02	0,01
	ИТОГО		2,4	1,00		0,67	0,43
	$k_{МПСУ}$	0,648					

Таким образом, диагностическая информативность МСУД и МПСУ электровозов постоянного тока также достаточно низкая: $k_{МПСУ} = 0,648$, но больше, чем у МСУД ($k_{МСУД} = 0,6$). При этом энтропия информации выше ($0,67 > 0,53$).

3.2.4 Диагностика тепловозов

На отечественных тепловозах производства Трансмашхолдинг установлены МСУ типа МСУ-ТП [305] (серии 2ТЭ116У, 2ТЭ25КМ [175]) и МСУ-ТЭ (серия ТЭП70БС) разработки ВНИКТИ (г. Коломна). По принципу работы, конструкции и функциональности МСУ-ТП и МСУ-ТЭ тепловозов аналогичны МСУД и МПСУ электровозов. Главное отличие – это управление дизель-генераторной установкой (ДГУ) и её диагностирование с соответствующим набором датчиков (рисунки 3.12 – 3.14).



Рисунок 3.12 – МСУ-Т

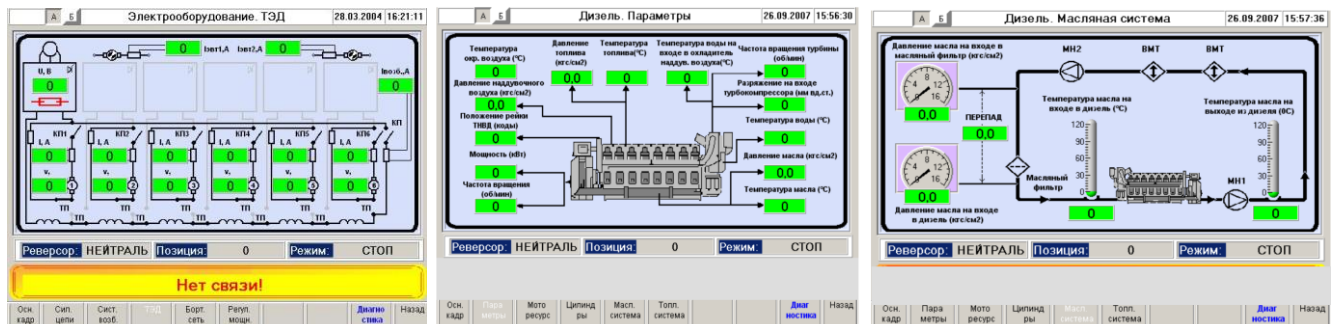


Рисунок 3.13 – Диагностические окна блока индикации МСУ-ТП (примеры) [274]

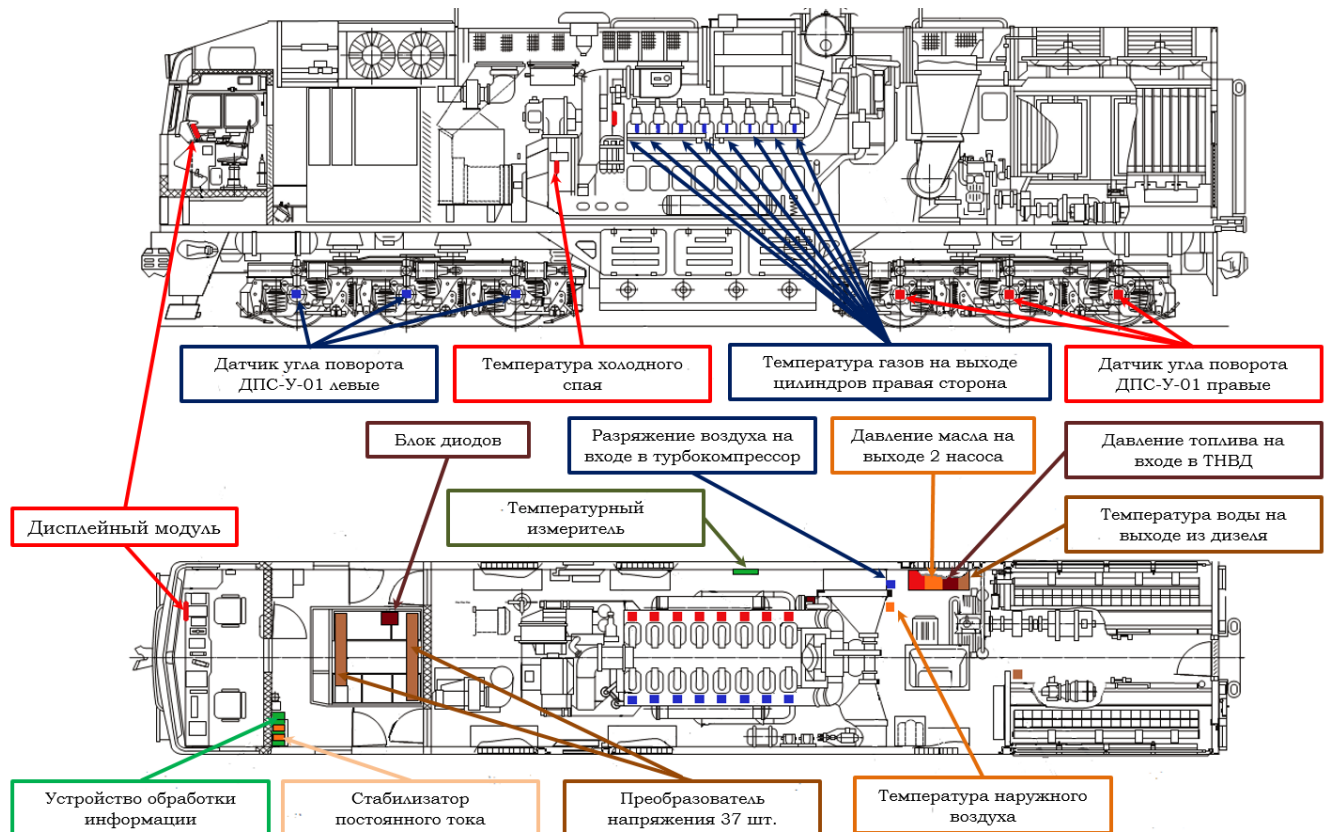


Рисунок 3.14 – Схема сбора данных в МСУ на примере тепловоза серии 2ТЭ116У [227]

Большое число датчиков в ДГУ (ток и напряжение генератора, частота вращения, температура отработавших газов каждого цилиндра, температура холодильника и др.) позволяют достаточно глубоко производить диагностирование дизеля ($i = 1$). Алгоритмы диагностирования ДГУ по данным МСУ подробно рассмотрены в докторской диссертации В. В. Грачёва [89, 90], а также в кандидатских диссертациях В. А. Мельникова [180] (разработаны методы диагностирования тепловозов по данным МСУ-ТП тепловозов серии 2ТЭ116У), А. А. Аболмасовым [1] (разработана запатентованная технология организации ТОиР по данным МСУ), И. Ю. Хромовым [356] (обоснован оптимальный набор датчиков для диагностирования ДГУ). Таким образом, диагностическая функциональность МСУ тепловозов гораздо шире, чем у МСУ электровозов (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Диагностическая информативность АСТД на базе МСУ-ТП и МСУ-ТЭ тепловозов серий 2ТЭ116У, 2ТЭ25КМ, 3ТЭ25КМ, ТЭП70БС

i	Оборудование	P_i	C_i	$C_{инт}$	E_i	$H_{МСУ-ТП}$	$I_{МПСУ-ТП}$
0	Исправное состояние	0,30	0,10	0,03	1	0,06	0,06
1	Дизель	0,22	1	0,29	0,80	0,26	0,21
2	Тяговые электродвигатели	0,22	0,5	0,15	0,90	0,16	0,14
3	Преобразователи	0,01	0,2	0,06	0,80	0,01	0,01
4	Электрические аппараты	0,33	0,15	0,04	0,80	0,09	0,07
5	МСУ	0,01	0,1	0,03	0,99	0,00	0,00
6	КМБ без ТЭД	0,10	0,7	0,21	0,20	0,11	0,02
7	Механическое оборудование	0,02	0,3	0,09	0,10	0,02	0,00
8	Вспомогательные машины	0,05	0,3	0,09	0,00	0,03	0,00
9	Цепи управления	0,10	0,05	0,01	0,70	0,01	0,01
	ИТОГО		3,40	1		0,76	0,53
	к_{МСУ-ТП}	0,695					

Таким образом, диагностическая информативность МСУ тепловозов (на примере МСУ-ТП и МСУ-ТЭ) выше ($k_{МСУ-Т} = 0,695$), чем у электровозов переменного ($k_{МСУД} = 0,6$) и постоянного ($k_{МПСУ} = 0,648$) тока. При этом выше и энтропия информации: $I_{\Sigma МСУ-Т} = 0,76$ (у электровозов соответственно 0,53 и 0,67).

3.2.5 Бортвые системы учёта топлива

В предыдущих разделах показана диагностическая эффективность МСУ новых локомотивов. В эксплуатации находятся тысячи локомотивов серий предыдущих поколений без МСУ. Для диагностирования могут успешно использоваться аппаратно-программные комплексы (АПК) контроля расхода топлива дизель-генераторными установками тепловозов (ДГУ): АПК «Борт», АСК ВИС, РПДА и др.

В диссертации рассмотрен аппаратно-программный комплекс (АПК) «Борт» [12, 13, 191] (рисунок 3.12). Разработчик – ОАО «НИИТКД» [190]. АПК «Борт» диагностирует теплотехническое состояние дизель-генераторных установок (ДГУ) маневровых тепловозов серий ЧМЭЗ, ЧМЭЗТ, ЧМЭЗЭ, ТЭМ2, ТЭМ3, ТЭМ18 и магистральных тепловозов 2ТЭ10, 2ТЭ116, М62.

АПК «Борт» [191] контролирует параметры ДГУ, расход топлива, несанкционированный слив топлива, наличие подтоварной воды в топливном баке. Создаваемая база данных на стационарном сервере позволяет оценить расход топлива на тягу поездов индивидуально для каждого локомотива, серии, полигона эксплуатации. АПК «Борт» обрабатывает информацию тепловозных датчиков (рисунок 3.12). Специализированный АРМ АПК «Борт» диагностирует техническое состояние ДГУ (таблица 3.10, рисунки 3.15, 3.16).



а - аппаратные средства АПК «Борт»: 1 – блок индикаторный; 2 – блок питания и кроссировки; 3 – блок аккумуляторных батарей; 4 – блок дополнительных параметров; 5 – модуль радиоканала; 6 – распределительная коробка давления (ЧМЭЗ); 7 – распределительный модуль; 8 – датчик мощности; 9 – датчик контроллера машиниста; 10 – датчик уровня топлива; 11 – комплект крепежных изделий; 12 – комплект кабелей; 13 – датчик температуры воды контура охлаждения; 14 – датчик давления тормозной магистрали; 15 – датчик давления масла; 16 – датчик давления топлива; 17 – антенна GPS; 18 – датчик турбонаддува; 19 – датчик оборотов дизеля; 20 – датчик температуры контура масла; 21 – датчик турбокомпрессора (ЧМЭЗ, ТЭ116).

Рисунок 3.15 – Аппаратные средства АПК «Борт»

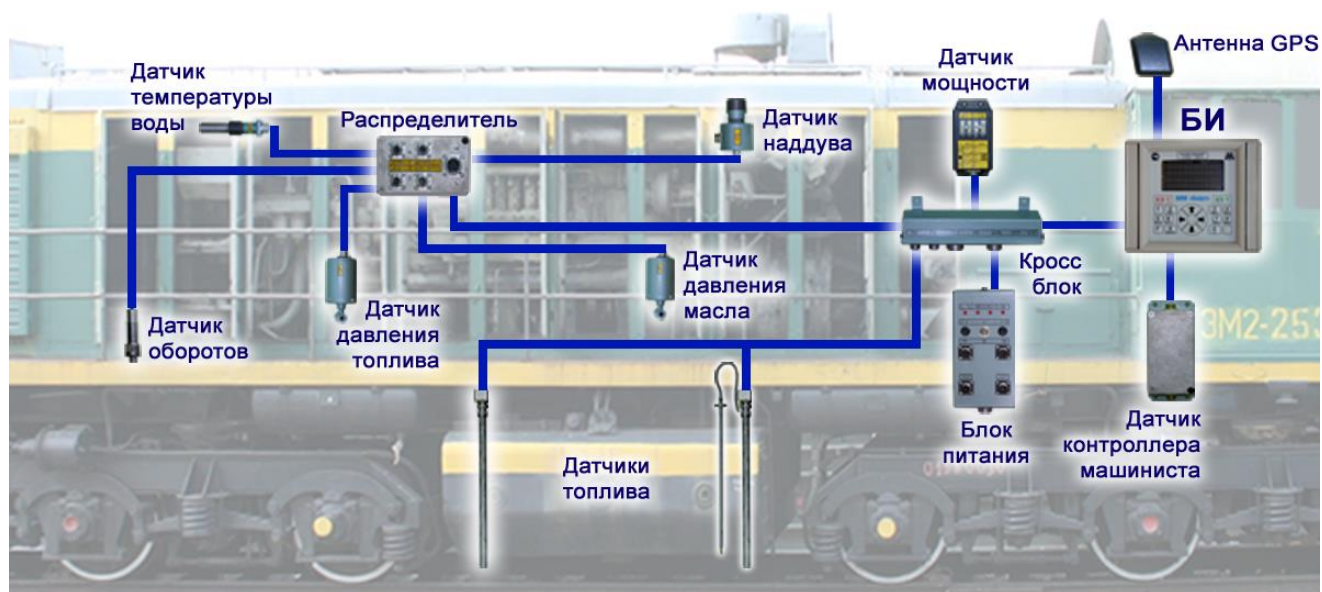


Рисунок 3.16 – Расположение аппаратных средств АПК «Борт»

Таблица 3.10 – Измеряемые в АПК «Борт» параметры (серии ТЭ10, ТЭ116, М62)

Наименование параметра	Пределы измерения
Ток тягового генератора, А (мВ)	0 – 6000 (0 – 0,75)
Напряжение на зажимах тягового генератора, В	0 – 1000
Электрическая мощность тягового генератора, кВт	0 – 2200
Объем топлива, л	0 – 6000
Уровень топлива, мм	30 – 1100
Масса топлива, кг	400 – 6000
Частота вращения коленчатого вала дизеля, об/мин	1200
Давление наддувочного воздуха в воздушном ресивере, кгс/см ²	0,05 – 2,0
Температура воды в горячем контуре охлаждения, °С	0 – 100
Температура масла на выходе из дизеля, °С	0 – 100
Давление масла в масляной системе дизеля, кгс/см ²	0 – 10
Давление воздуха в тормозной магистрали, кгс/см ²	0 – 10
Давление топлива в коллекторе низкого давления, кгс/см ²	0 – 10
Температура топлива в баке, °С	-45 – +50
Температура наружного окружающего воздуха, °С	-55 – +50
Скорость движения, км/ч	0 – 160
Позиция контроллера машиниста	0 – 15
Плотность топлива, кг/м ³ (г/см ³)	800 – 880 (0,80 – 0,88)

В отличие от МСУ диагностическая функциональность АПК «Борт» рассмотрена применительно только к дизель-генераторной установке (ДГУ), что объясняется контролируемыми параметрами (таблица 3.9). Основные элементы ДГУ на примере Д49 (2А-9ДГ) [103, 104, 105, 110, 341] (рисунки 3.17 – 3.19).

При расчёте диагностической информативности за единицу стоимости ремонта принят ремонт коленчатого вала ($i=1$) $C_1 = 1$. Несмотря на достаточно низкую интенсивность отказов ($\lambda_1 = 0,1$) их стоимость высокая. Коленчатый вал напрямую не диагностируется, однако косвенно о наличии неисправностей можно судить по падению мощности, затруднённому запуску и другим косвенным признакам: $E_1 = 0,1$. Эффективность диагностирования можно повысить за счёт установки датчиков виброускорения. В этом случае $E_{1+} = 0,5$. Аналогичное диагностирование производится рамы под дизель и генератор ($i = 2$), блок цилиндров ($i = 3$), однако стоимость их ремонта ниже: $C_{2/3} = 0,7$.



Рисунок 3.17 – Осциллограммы расшифровки файлов АПК «Борт»

Главная Документация Отчеты Графики Контакты Настройки Выйти

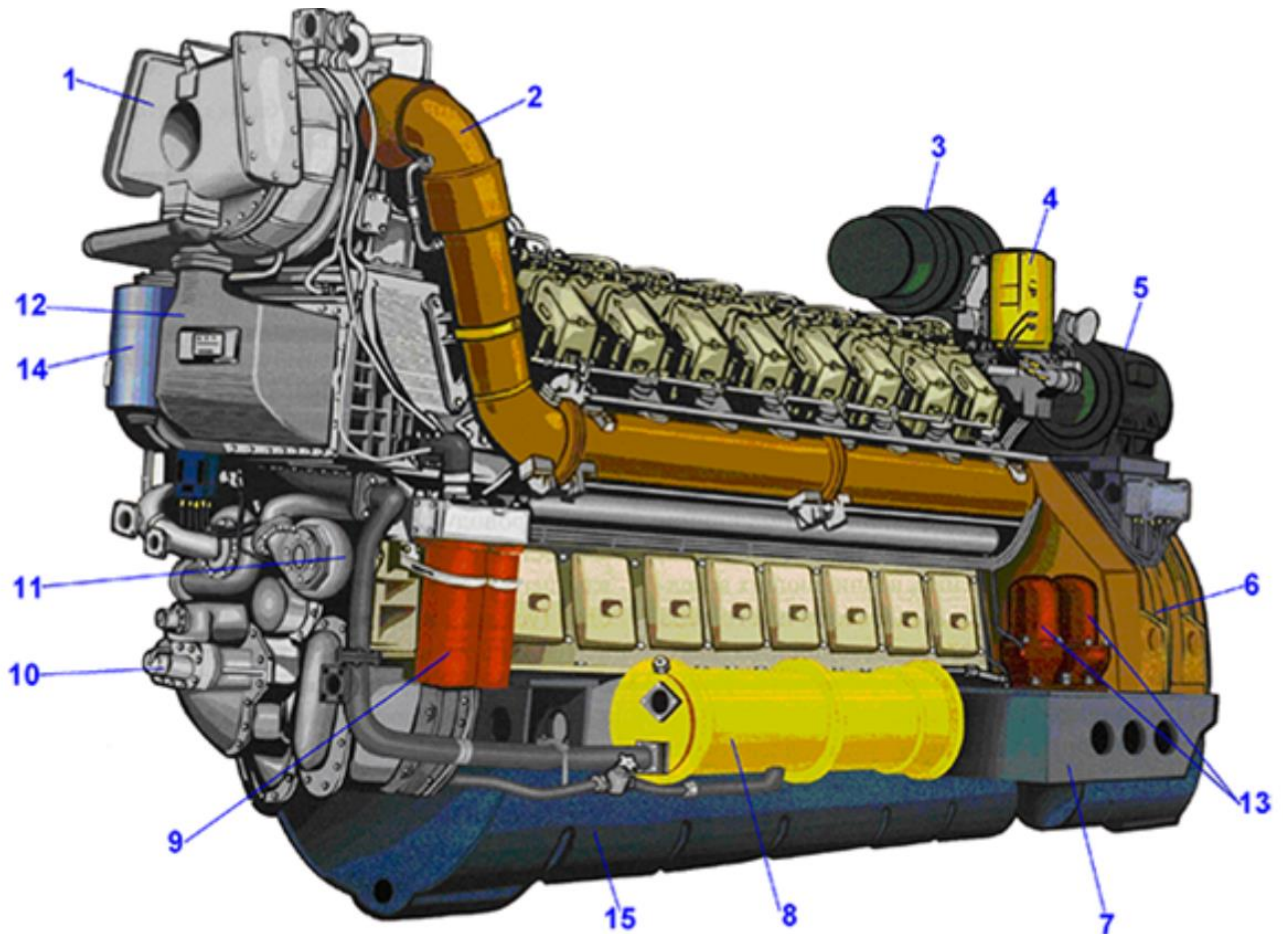
ОТЧЕТ ПО ДОПУСКАМ ПАРАМЕТРОВ ДГУ

за период с 01.01.2018 г. по 13.02.2018 г.
Западно-Сибирская, Омск (ТЧЗ-2)

№	Серийный номер	Кол-во смен	Вода в баке	Давление масла, кг/см ²		Давление топлива, кг/см ²		Обороты дизеля, об/мин.		Скорости (макс.), км/ч
				Мин.	Макс.	Мин.	Макс.	Мин.	Макс.	
1	ТЭМ18ДМ 427	82	-	2.00	5.40	1.60	6.10	278	448	
2	ТЭМ18ДМ 432	52	-	0.80	5.20	1.50	5.10	282	403	
3	ТЭМ18ДМ 543	145	-	2.20	5.40	0.10	4.80	292	424	
4	ТЭМ18ДМ 544	17	-	1.90	4.40	3.10	5.90	268	406	
5	ТЭМ18ДМ 634	153	-	3.20	5.30	0.10	4.90	284	424	
6	ТЭМ18ДМ 635	87	-	1.70	4.60	2.40	6.00	299	443	
7	ТЭМ18ДМ 636	0	-	-	-	-	-	-	-	
8	ТЭМ18ДМ 639	160	-	0.50	4.60	0.50	4.70	288	450	
9	ТЭМ18ДМ 640	145	-	2.40	7.60	1.60	4.90	291	444	
10	ТЭМ18ДМ 644	121	-	1.00	4.80	0.10	4.30	296	443	
11	ТЭМ18ДМ 645	131	-	2.20	5.00	0.10	5.60	275	444	
12	ТЭМ18ДМ 648	95	-	0.60	5.30	1.20	3.90	286	405	
13	ТЭМ18ДМ 649	84	-	2.80	5.40	1.70	4.20	280	412	
Итого:			7	35	33	46	59	55	60	

Отправить в Excel

Рисунок 3.18 – Отчет по выходу параметров локомотива за пределы допустимых значений



1 – турбокомпрессор; 2 – коллектор выпускной; 3 – вентилятор охлаждения тягового генератора; 4 – регулятор частоты вращения и мощности; 5 – возбудитель тягового генератора; 6 – генератор тяговый (переменного тока); 7 – рама поддизельная; 8 – маслоохладитель; 9 – масляный фильтр грубой очистки; 10 – насос масляный; 11 – насос водяной; 12 – охладитель наддувочного воздуха; 13 – центробежные фильтры масла; 14 – маслоотделительный бачок; 15 – поддон дизеля.

Рисунок 3.19 – Основные диагностируемые элементы ДГУ [104]
(по материалам <https://teplovoz.ucos.ru> [105])

Существенную часть имеющих на практике неплановых ремонтов по дизелю (течь воды по уплотнениям цилиндрических гильз, разрушение подшипников 69-й группы, крышки цилиндров, износ подшипников коленчатого вала и гильз цилиндров на ранних стадиях, ослабление крепления агрегатов) средствами МСУ не локализуются. Тяговый генератор, узел возбуждения генератора (возбудитель, управляемый выпрямитель, система энергоснабжения поезда на БС) хорошо контролируются штатными МСУ, что невозможно при помощи АПК «Борт».

Шатунный механизм ($i = 4$) включает главный и прицепной шатуны, пальцы, составной поршень, тронку, болты и шпильки, палец плавающего типа, кольца и др. Охлаждение осуществляется маслом. Стоимость ремонта шатунного механизма

$C_4 = 0,3$ при большом потоке отказов. Шатунный механизм диагностируется косвенно: $E_4 = 0,3$.

Следующий дорогой и важный с точки зрения ТОиР элемент дизеля – крышка цилиндра ($i = 5$), представляющая собой сложный механизм, несмотря на достаточно неудачное «упрощенное» название. Ремонт крышки цилиндра достаточно дорогой ($C_5 = 0,3$), при этом имеет место высокая интенсивность отказов ($\lambda_5 = 2,0$). По данным д.т.н. В. В. Грачёва [91], отказ крышки цилиндра тепловозного дизеля – это, обычно, трещина межклапанной перемычки. Если трещина несквозная, она никак себя не проявляет и может быть обнаружена только при осмотре (дефектоскопии) крышки на ТР-2. Если сквозная нитевидная, то следствием её появления будет пробой газов в воду, который будет приводить к нарушениям циркуляции воды в контуре. На первой стадии развития отказа нарушения не критичны и проявляются в периодическом увеличении уровня воды в расширительном баке, но, если вовремя не заметить этого, то со временем может выбросить воду из системы и бака при работе под нагрузкой, в результате горячий дизель останется без воды с последующим дорожным отказом. $E_5 = 0,1$.

Одним из самых часто отказывающих узлов дизеля является форсунка ($i = 6$), устанавливаемая в цилиндрической крышке. Форсунка хорошо диагностируется по температуре отработавших газов (падает при наличии неисправностей): $E_6 = 0,9$.

Следующий важный диагностируемый узел дизеля – турбокомпрессор ($i = 7$), характеризуемый частотой вращения, расходом воздуха и давлением наддува (последний параметр контролируется): $E_7 = 0,7$. Интенсивность отказов одна из самых высоких: $\lambda_7 = 2$.

Топливная система высокого давления ($i = 8$) контролируется по давлению топлива и температуре отработавших газов цилиндров: $C_8 = 0,3$, $E_8 = 0,7$. Надёжность системы достаточно низкая: $\lambda_8 = 3$. Топливоподкачивающая система рассмотрена отдельно: $i = 9$, $C_9 = 0,2$, $\lambda_9 = 1$, $E_9 = 0,5$.

Масляная система дизеля ($i = 10$) предназначена для смазывания и охлаждения трущихся поверхностей дизеля по циркуляционному принципу. Главные предотказы (течь масла и его загрязнение) непосредственно не

контролируются (предусмотренная система планово-предупредительного ТОиР),: $C_{10} = 0,2$, $E_{10} = 0,4$, $\lambda_{10} = 1$.

В дизеле тепловозов применена двухконтурная (горячий и холодный) внешняя система охлаждения ($i = 11$): $C_{11} = 0,2$, $E_{11} = 0,7$, $\lambda_{11} = 2$. В отдельную группу выделены секции холодильника системы охлаждения, т.к. эффективность их диагностирования может быть повышена за счёт установки дополнительных датчиков температуры: $C_{12} = 0,3$, $E_{12} = 0,7$, $\lambda_{12} = 2$, $E_{12+} = 0,8$. Также в отдельную группу выделен привод насосов: $C_{13} = 0,2$, $E_{13} = 0,6$, $\lambda_{13} = 1$.

Выпускной коллектор ($i = 14$) для отвода отработанных газов цилиндров к турбине турбокомпрессора также требует диагностирования из-за частых отказов: $C_{14} = 0,2$, $\lambda_{13} = 1$. Коллектор контролируется косвенно по давлению турбонаддува: $E_{14} = 0,3$. Установка дополнительных датчиков давления, температуры и виброускорений может повысить эффективность диагностирования коллектора: $E_{14+} = 0,9$.

Привод распределительного вала дизеля ($i = 15$) передаёт вращение распределительному валу, регулятору частоты вращения, предельному выключателю, механическому тахометру, вентилятору тягового генератора, стартер-генератору, возбuditелю генератора. Это проблемный узел дизеля. Напрямую привод не диагностируется, однако о его неисправности можно судить по неработоспособности обслуживаемых им узлов: $C_{15} = 0,2$, $E_{15} = 0,7$, $\lambda_{13} = 1,5$.

Наряду с диагностированием собственно дизеля контролируется работоспособность тягового генератора, в т.ч. возбuditеля и стартер-генератора. Результаты расчёта диагностической информативности АПК «Борт» приведены для существующей схемы включения (таблица 3.11). В таблице 3.12 приведены для сравнения диагностические способности штатных МСУ-ТП по диагностированию ДГУ: контролируется более 100 цифровых и 40 аналоговых параметров.

Таким образом, диагностическая информативность АПК «Борт» как примера специализированной бортовой системы диагностирования ДГУ составляет $k_{\text{Борт}} = 0,61$. АПК «Борт» (как и другие МСУ) не исключает деповские системы диагностирования, но целесообразен к использованию при отсутствии МСУ согласно технико-экономическому обоснованию, выполненному в разделе 4.

Таблица 3.11 – Диагностическая информативность АСТД на базе АПК «Борт»

i	Отказывающие узлы ДГУ	Ci	$Cinp$	λ	L	Pi	Ei	Hi	$I_{АСТД}$
0	Исправное состояние	0,10			50,00	0,301	1,00	0,037	0,0369
1	Коленчатый вал	1,00	0,159	0,1	50,00	0,005	0,10	0,008	0,0008
2	Рама под дизель	0,70	0,111	0,1	50,00	0,005	0,10	0,006	0,0006
3	Блок цилиндров дизеля	0,70	0,111	0,1	50,00	0,005	0,10	0,006	0,0006
4	Шатунный механизм	0,30	0,048	1,0	50,00	0,049	0,30	0,020	0,0061
5	Крышка цилиндров	0,30	0,048	2,0	50,00	0,095	0,50	0,035	0,0176
6	Форсунка	0,10	0,016	4,0	50,00	0,181	0,90	0,024	0,0219
7	Турбокомпрессор	0,20	0,032	2,0	50,00	0,095	0,80	0,025	0,0202
8	Топливная система	0,30	0,048	3,0	50,00	0,139	0,70	0,048	0,0336
9	Топливо-подкачивающая система	0,10	0,016	1,0	50,00	0,049	0,80	0,008	0,0064
10	Масляная система	0,20	0,032	1,0	50,00	0,049	0,50	0,014	0,0072
11	Система охлаждения дизеля	0,30	0,048	2,0	50,00	0,095	0,70	0,035	0,0247
12	Секции холодильника	0,3	0,048	2,0	50,00	0,095	0,7	0,035	0,0247
13	Привод насосов	0,20	0,032	1,0	50,00	0,049	0,60	0,014	0,0087
14	Выпускной коллектор	0,20	0,032	1,0	50,00	0,049	0,50	0,014	0,0072
15	Привод вала распределительного	0,20	0,032	1,5	50,00	0,072	0,70	0,020	0,0141
16	Прочее оборудование	0,20	0,032	1,0	50,00	0,049	0,60	0,014	0,0087
17	Измерения и защита	0,10	0,016	0,5	50,00	0,025	0,10	0,004	0,0004
18	Возбудитель тягового генератора	0,10	0,016	0,3	50,00	0,015	0,80	0,003	0,0023
19	Стартер-генератор	0,10	0,016	0,1	50,00	0,005	0,80	0,001	0,0009
20	Тяговый генератор	0,70	0,111	0,3	50,00	0,015	0,90	0,015	0,0138
	ИТОГО	6,3						0,390	0,238
	КБОРТ				0,610				

Таблица 3.12 – Диагностическая информативность АСТД на базе МСУ-ТП при диагностировании дизель-генераторной установки при расширенном наборе датчиков (в т.ч. датчиков виброускорений, температуры и давления)

<i>i</i>	Отказывающие узлы ДГУ	<i>Ci</i>	<i>Cinp</i>	λ	<i>L</i>	<i>Pi</i>	<i>Ei</i>	<i>Hi</i>	<i>I_{АСТД}</i>
0	Исправное состояние	0,10	0,016		50,00		0,301	1	1,00
1	Коленчатый вал	1,00	0,159	0,10	50,00	0,995	0,005	1	0,50
2	Рама под дизель	0,70	0,111	0,10	50,00	0,995	0,005	1	0,30
3	Блок цилиндров дизеля	0,70	0,111	0,10	50,00	0,995	0,005	1	0,30
4	Шатунный механизм	0,30	0,048	1,00	50,00	0,951	0,049	1	0,50
5	Крышка цилиндров	0,30	0,048	2,00	50,00	0,905	0,095	1	0,70
6	Форсунка	0,10	0,016	4,00	50,00	0,819	0,181	1	0,95
7	Турбокомпрессор	0,20	0,032	2,00	50,00	0,905	0,095	1	0,95
8	Топливная система	0,30	0,048	3,00	50,00	0,861	0,139	1	0,85
9	Топливо-подкачивающая система	0,10	0,016	1,00	50,00	0,951	0,049	1	0,95
10	Масляная система	0,20	0,032	1,00	50,00	0,951	0,049	1	0,85
11	Система охлаждения дизеля	0,30	0,048	2,00	50,00	0,905	0,095	1	0,95
12	Секции холодильника	0,3	0,048	2	50,00	0,905	0,095	1	0,9
13	Привод насосов	0,20	0,032	1,00	50,00	0,951	0,049	1	0,85
14	Выпускной коллектор	0,20	0,032	1,00	50,00	0,951	0,049	1	0,75
15	Привод вала распределительного	0,20	0,032	1,50	50,00	0,928	0,072	1	0,85
16	Прочее оборудование	0,20	0,032	1,00	50,00	0,951	0,049	1	0,75
17	Измерения и защита	0,10	0,016	0,50	50,00	0,975	0,025	1	0,30
18	Возбудитель тягового генератора	0,10	0,016	0,30	50,00	0,985	0,015	1	0,95
19	Стартер-генератор	0,10	0,016	0,10	50,00	0,995	0,005	1	0,90
20	Тяговый генератор	0,70	0,111	0,30	50,00	0,985	0,015	1	0,95
	ИТОГО	6,3						0,390	0,323
	КБОРТ	0,828							

Таким образом, диагностическая информативность МСУ-ТП при установке дополнительных датчиков и соответствующего программного обеспечения может достигать $k_{МСУ-ТП} = 0,806$ и превышать информативность АПК «Борт» на 26 %.

Следует отметить, что, по мнению д.т.н. В. В. Грачёва [89 – 91], диагностические способности бортовых МСУ останутся ограниченными, в т.ч. по выходной мощности. При начале утечки газов мощность практически не меняется вплоть до выброса воды (отказ). Неоднозначна зависимость мощности тягового генератора с состоянием дизеля и существенно зависит от принципа регулирования ДГУ (раздельный или объединенный). При раздельном регулировании (маневровые) даже отключение цилиндра может не сказаться на мощности генератора, если остальные цилиндры находятся в нормальном состоянии. При объединенном регулировании скажется, если правильно настроен регулятор мощности. Пониженная мощность часто является следствием неправильной настройки регулятора или системы регулирования напряжения генератора, неправильного согласования датчика положения вала исполнительного устройства электронного регулятора с дизелем (в новых тепловозах). Только после проверки этих настроек можно диагностировать по снижению мощности. Состояние подшипников коленчатого вала, также мало влияет на мощность, если это не заклинивание (отказ).

В системах газотурбинного наддува давление наддува определяется, с одной стороны, расходом воздуха, а с другой – гидравлическим сопротивлением поршневой машины и выпускного тракта, которые, в свою очередь, влияют на расход воздуха.

Снижение мощности дизеля при неизменных оборотах вследствие недогрузки его генератором приведет к снижению и давления наддува, причем при почти неизменной температуре отработавших газов. Увеличение сопротивления воздушного фильтра, увеличение сопротивления охладителя наддувочного воздуха, увеличение температуры воздуха на входе в нагнетатель, приведут к уменьшению давления наддува в зависимости от способа регулирования мощности. Закоксовывание выпускного тракта на начальной стадии может приводить даже к некоторому увеличению давления наддува при уменьшении расхода воздуха: при нормальном наддуве и исправном турбокомпрессоре будет дымный выхлоп. Изменение температуры отработавших газов (температура газов на выходе из цилиндров) является важным диагностическим признаком, но его роль нельзя преувеличивать. Важно контролировать температуру этих газов на входе в турбину.

3.2.6 Результаты анализа эффективности бортовых систем

В таблице 3.13 приведены сводные данные по бортовым АСТД на базе МСУ: диагностическая энтропия $H (I_{\Sigma})$ (по формуле 3.30), информативность бортовой АСТД $I_{АСТД}$ (по формуле 2.30 с учётом коэффициента распознавания $E_{АСТД}$), коэффициент информативности $k_{АСТД}$ (по формуле 3.31).

Таблица 3.13 – Диагностическая информативность АСТД на базе МСУ

№ п/п	Бортовая АСТД на базе МСУ	$H (I_{\Sigma})$	$I_{АСТД}$	$k_{АСТД}$
1	МСУД электровозов переменного тока с ВИП производства НЭВЗ	0,532	0,319	0,600
2	МСУД с расширенным набором датчиков	0,532	0,433	0,814
3	МСУД и МПСУ электровозов постоянного тока производства Трансмашхолдинг	0,666	0,432	0,648
4	МСУ-ТП и МСУ-ТЭ тепловозов производства Трансмашхолдинг	0,757	0,526	0,695
5	АПК «БОРТ» производства НИИТКД (только ДГУ)	0,390	0,238	0,610
6	МСУ-ТП с перспективным набором датчиков и математической обработкой (только ДГУ)	0,390	0,323	0,828
Σ	В среднем по локомотиву в целом для штатных МСУ с существующим набором датчиков	0,65	0,43	0,65

В среднем диагностическая информативность существующих МСУ более 50 %: $k_{АСТД} = 0,65$, которая может быть существенно повышена (до $k_{АСТД+} > 0,8$) за счёт установки дополнительных датчиков: виброускорения, температуры, давления, перемещения, скорости вращения (для механического, пневматического и гидравлического оборудования), тока, напряжения, сопротивления и др. (для электрических цепей: силовых и управляющих), времени срабатывания, силы нажатия, искрения и др. (для электрических аппаратов). Желательно дополнительно контролировать наличие посторонних запахов, звуков, световых эффектов и др. В качестве датчика можно рассматривать и субъективные замечания машиниста, если их фиксировать не в бумажном бортовом журнале формы ТУ-152 [278], а в аналогичном электронном журнале, например, на базе бортового компьютера (блока индикации) [298]. Дополнительно диагностическую эффективность МСУ можно повысить за счёт развития математических методов обработки информации с уже существующих датчиков.

Таким образом, полностью отказаться от деповских АСТД на сегодняшний день невозможно.

3.3 ИНФОРМАЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕПОВСКИХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

3.3.1 Реостатные испытания тепловозов

В предыдущем разделе рассмотрено диагностирование дизель-генераторной установки (ДГУ) средствами бортовой АСТД на базе МСУ-ТП, МСУ-ТЭ, а также с использованием специализированной диагностической системы АПК «Борт». До появления возможности бортового диагностирования основными являлись деповские стационарные станции реостатных испытаний ДГУ (рисунки 3.20 – 3.21).

Реостатные испытания автоматизируются, в т.ч. с использованием АСТД «Кипарис» производства НИИТКД (рисунки 3.22 – 3.24) [191]. Комплекс представляет собой аналого-цифровую информационно-измерительную систему, управляющую нагрузочным реостатом и ДГУ тепловоза.

Кипарис осуществляет в режиме online мониторинг основных параметров ДГУ: ток нагрузки, напряжение и мощности генератора, частота вращения дизеля, температуры воды и масла, давления масла и топлива. Осуществляется мониторинг тренда параметров путём сравнения с замерами предыдущих испытаний. «Кипарис» обеспечивает автоматизацию испытаний, сохранение данных, наглядное отражение информации с рекомендациями через дружественный интерфейс, печать протоколов.

В таблице 3.14 приведены результаты расчёта диагностической информативности станции реостатных испытаний. За основу для расчёта взята таблица 3.11 информативности АПК «Борт» (пункт 3.2.5) для сравнимости данных.

Реостатные испытания достаточно затратные (пункт 4.5.3), но обладают высокой глубиной диагностирования: $k_{\text{РЕОСТАТ}} = 0,922$. У АПК «Борт» – существенно ниже: $k_{\text{БОРТ}} = 0,660$, у МСУ-ТП по отношению к ДГУ $k_{\text{МСУ-ТП}} = 0,806$. В диссертации В. А. Мельникова [180] предлагается вариант сокращения объёма реостатных испытаний за счёт бортового диагностирования. МСУ-ТП и МСУ-ТЭ уже сейчас имеют возможность проведения упрощённых ускоренных реостатных испытаний без использования реостатных станций.

Таким образом, для современных тепловозов объём реостатных испытаний может быть сокращён за счёт бортового диагностирования.



Рисунок 3.20 – Общий вид станции реостатных испытаний в СЛД Тюмень



Рисунок 3.21 – Жидкостной нагрузочный реостат станции реостатных испытаний

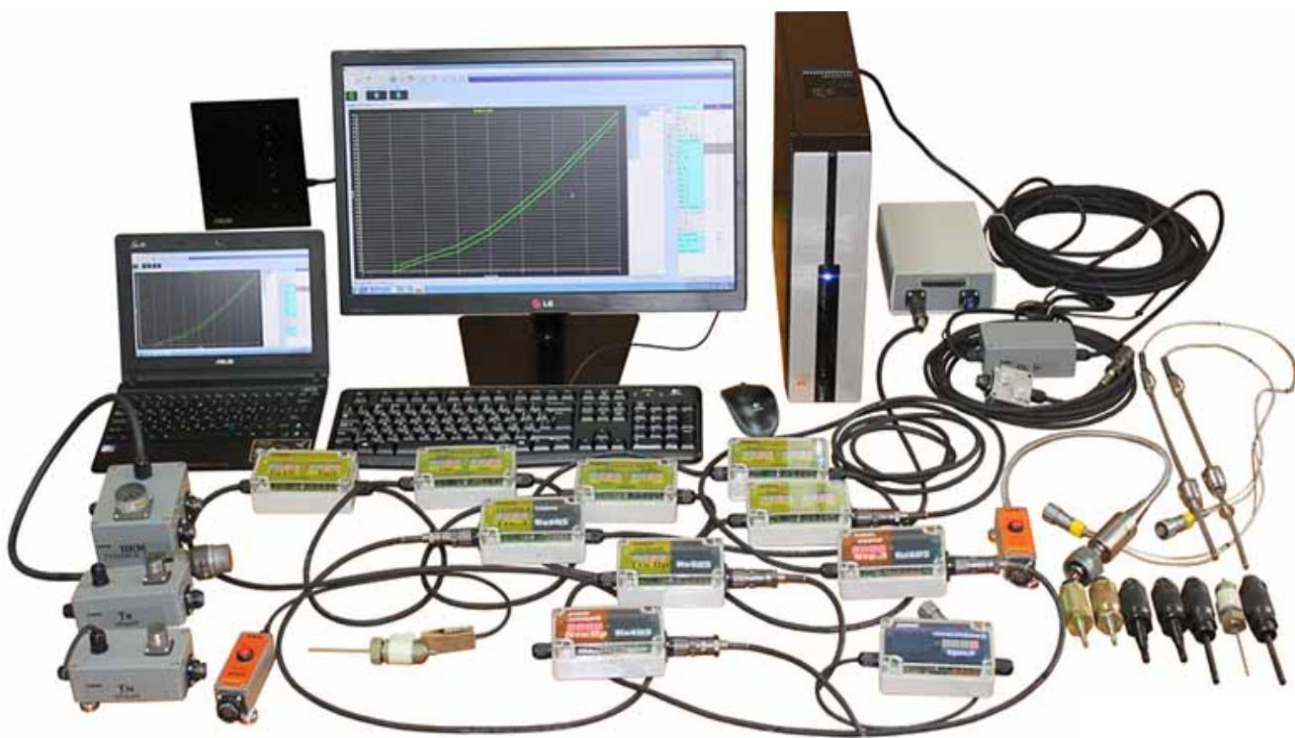


Рисунок 3.22 – АСТД «Кипарис» (НИИТКД, г. Омск [191])



Рисунок 3.23 – АСТД «Алмаз» (ЗАО «Локомотив», г. Ярославль [304])



Рисунок 3.24 – АСТД «CUBO» (VOLO», г. Ижевск [310])

Таблица 3.14 – Диагностическая информативность АСТД станции реостатных испытаний дизель-генераторных установок тепловозов

<i>i</i>	Узлы ДГУ	C_i	$C_{инр}$	λ	L	P_i	E_i	H_i	$I_{АСТД}$
0	Исправное состояние	0,10	0,016		50,00	0,301	1,00	0,037	0,0369
1	Коленчатый вал	1,00	0,159	0,10	50,00	0,005	0,70	0,008	0,0057
2	Рама под дизель	0,70	0,111	0,10	50,00	0,005	0,90	0,006	0,0054
3	Блок цилиндров дизеля	0,70	0,111	0,10	50,00	0,005	0,90	0,006	0,0054
4	Шатунный механизм	0,30	0,048	1,00	50,00	0,049	0,85	0,020	0,0173
5	Крышка цилиндров	0,30	0,048	2,00	50,00	0,095	0,90	0,035	0,0318
6	Форсунка	0,10	0,016	4,00	50,00	0,181	0,95	0,024	0,0231
7	Турбокомпрессор	0,20	0,032	2,00	50,00	0,095	0,95	0,025	0,0240
8	Топливная система	0,30	0,048	3,00	50,00	0,139	0,95	0,048	0,0456
9	Топливо-подкачивающая система	0,10	0,016	1,00	50,00	0,049	0,95	0,008	0,0076
10	Масляная система	0,20	0,032	1,00	50,00	0,049	0,95	0,014	0,0137
11	Система охлаждения дизеля	0,30	0,048	2,00	50,00	0,095	0,95	0,035	0,0335
12	Секции холодильника	0,3	0,048	2	50,00	0,095	0,95	0,035	0,0335
13	Привод насосов	0,20	0,032	1,00	50,00	0,049	0,90	0,014	0,0130
14	Выпускной коллектор	0,20	0,032	1,00	50,00	0,049	0,80	0,014	0,0116
15	Привод вала распределительного	0,20	0,032	1,50	50,00	0,072	0,90	0,020	0,0181
16	Прочее оборудование	0,20	0,032	1,00	50,00	0,049	0,80	0,014	0,0116
17	Измерения и защита	0,10	0,016	0,50	50,00	0,025	0,90	0,004	0,0040
18	Возбудитель тягового генератора	0,10	0,016	0,30	50,00	0,015	0,95	0,003	0,0027
19	Стартер-генератор	0,10	0,016	0,10	50,00	0,005	0,95	0,001	0,0010
20	Тяговый генератор	0,70	0,111	0,30	50,00	0,015	0,95	0,015	0,0145
	ИТОГО	6,3						0,390	0,360
	КРЕОСТАТ	0,922							

Таким образом, возможности стационарной АСТД реостатных испытаний дизель-генераторных установок тепловозов (ДГУ) существенно выше: $k_{\text{КРЕОСТАТ}} = 0,922$ (у АПК «Борт» $k_{\text{БОРТ}} = 0,660$), но требуются дополнительные затраты ресурсов и времени. $k_{\text{КРЕОСТАТ}} < 1$, поэтому остаётся необходимость в стендовом оборудовании для наладки и испытания отдельных узлов ДГУ.

3.3.2 Вибродиагностирование

Отсутствие бортового мониторинга виброускорений (подраздел 3.2) снижает эффективность бортовых АСТД. Комплекс оперативного диагностирования «Прогноз» [184] (НИИТКД, г. Омск [190, 276]) и «Вектор-2000» (ВАСТ, г. Санкт-Петербург [100], рисунки 3.25 – 3.27) диагностируют механическое состояние узлов локомотивов путём измерения виброускорений по показаниям датчиков. Математическая обработка результатов измерения в различных режимах позволяет поставить диагноз [18].



Рисунок 3.25 – АСТД «Вектор-2000»



Рисунок 3.26 – Стенд входного контроля подшипников ТЭД

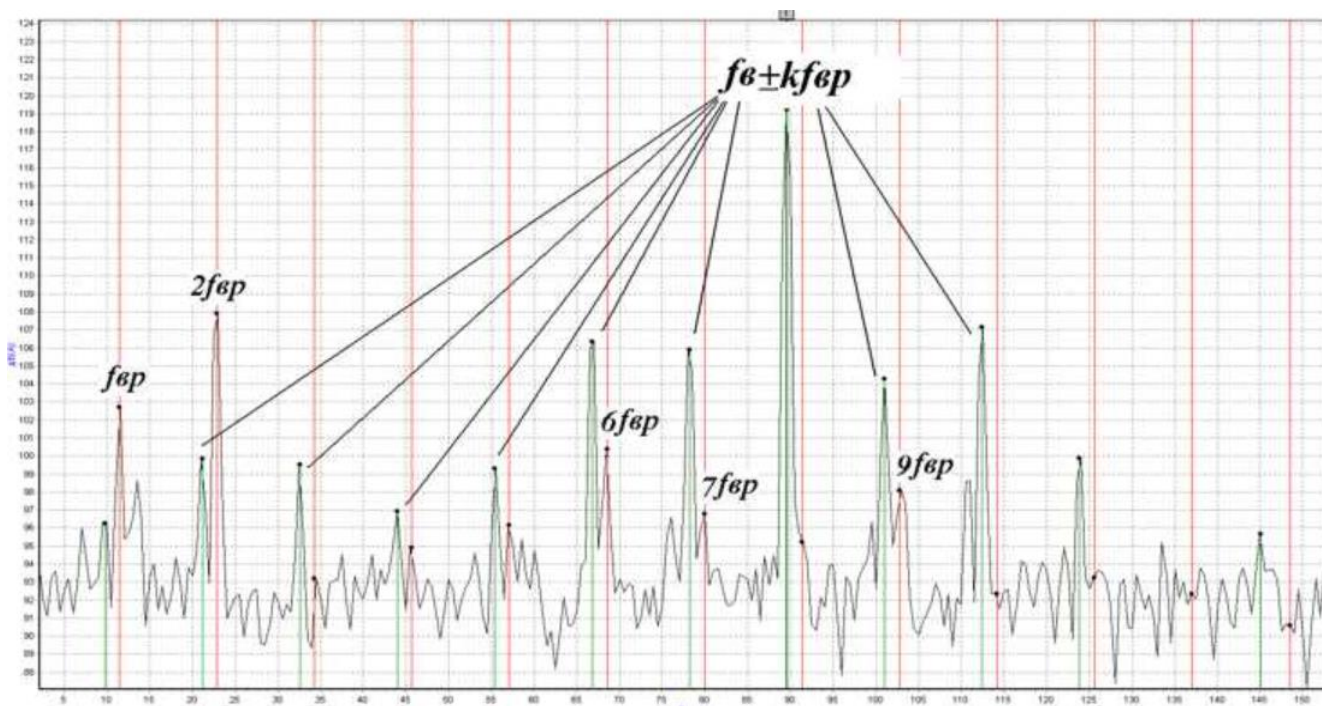


Рисунок 3.27 – АХЧ виброиспытаний при трещине внутреннего кольца (пример)
АСТД вибродиагностирования «Вектор» ассоциации ВАСТ [100]

3.4 ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 3

- 1 Системы технического диагностирования (СТД) должны проектироваться как цифровые автоматизированные (АСТД) по канонам АСУ с компьютерами или микропроцессорными системами в своем составе.
- 2 СТД подчиняются законам диалектического познания объективной реальности. Отличие заключается в наличие несколько асимптотически достигаемых уровней знаний: об исправности, работоспособности и правильности функционирования объекта диагностирования и всегда осуществляется в условиях ограниченной информации.
- 3 Разработан метод оценки диагностической информативности автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) [271] по коэффициенту информативности $k_{\text{АСТД}}$ как отношение информативности системы диагностирования $I_{\text{АСТД}}$ к общей диагностической энтропии объекта диагностирования I_{Σ} (в основе формула 3.31) с учётом вероятности отказа и стоимости восстановления работоспособности. В качестве методики исследования разработаны табличные формы в среде MS Excel.
- 4 Предпочтительными являются бортовые АСТД на базе микропроцессорных систем управления (МСУ) локомотивов [298, 271], т.к. не требуют затрат времени, материалов, трудовых и других ресурсов при проведении ТОиР.
- 5 Рассмотрены основные типы бортовых АСТД на базе МСУ локомотивов как наиболее предпочтительные: МСУД электровозов переменного тока ($k_{\text{МСУД}} = 0,60$), МСУД и МПСУ электровозов постоянного тока ($k_{\text{МПСУ}} = 0,65$), МСУ-ТП и МСУ-ТЭ тепловозов ($k_{\text{МСУ-Т}} = 0,69$), бортовых систем диагностирования АПК «Борт» ($k_{\text{БОРТ}} = 0,66$). Бортовые системы достаточно эффективны, но полностью не заменяют деповское диагностирование. Предиктивный ремонт по данным бортовых АСТД даже при дополнительных датчиках и соответствующем программном обеспечении пока не возможен.
- 6 Деповские АСТД обладают высокой информативностью ($k_{\text{АСТД}} > 0,9$), но требуют дополнительных затрат ресурсов на их приобретение, сопровождение, трудовые, материальные, энергетические и другие ресурсы.

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДА И МЕТОДИКИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

4.1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ АНАЛИЗА

В предыдущем разделе доказано, что современные аппаратно-программные средства позволяют создавать автоматизированные системы технического диагностирования (АСТД) [271] любого оборудования локомотива. Однако требует доказательства технико-экономическая целесообразность внедрения АСТД [274]: эффект R будет достигнут, если приведённые к одному году затраты на эксплуатацию систем диагностирования Q не превысят годовой экономический эффект R_{Γ} в приведённых единицах [53].

$$R > R_{\Gamma} - E_{\text{н}} \cdot Q, \quad (4.1)$$

где: $E_{\text{н}}$ – нормативный коэффициент окупаемости проекта (обычно $E_{\text{н}} = 0,15$).

Выполненные исследования применительно к условиям сервисного локомотивного депо (СЛД) «Тында-Северная» [117, 118] показали, что комплексное оснащение депо автоматизированными системами технического диагностирования (АСТД) [271] потребует не менее $Q_{\text{КСЛД}} > 450$ млн руб.: капитальные затраты на весь локомотиворемонтный комплекс превысят $Q_{\text{к}} = 95 \cdot 450 > 400$ млрд руб. При этом экспертная оценка позволяет прогнозировать экономию на уровне максимум 20 млрд руб., а фактически – не более 5 млрд руб. (подробней источники эффекта рассмотрены в подразделе 4.2). Таким образом, срок окупаемости комплексной системы технического диагностирования составит не менее $400/20 = 20$ лет даже без учёта дисконтирования.

Таким образом, целесообразность применения систем технического диагностирования (СТД) требует экономического обоснования для каждого вида оборудования с индивидуальной оценкой экономической целесообразности её внедрения [289].

В мировой практике есть тенденция перехода на необслуживаемые виды оборудования даже за счёт частичного ухудшения характеристик или повышения стоимости [388]. Например, переход на безмаслянные трансформаторы, или на

необслуживаемые подшипники. Есть тенденция использования бортовых автоматизированных систем технического диагностирования на базе микропроцессорных систем управления (МСУ) [296]: для управления приводом и автоведения поезда МСУ используют комплекс датчиков (тока, напряжения, температуры, давления, скорости вращения, времени срабатывания и др.), которые могут одновременно использоваться и для определения объёма потребного ТОиР.

Таким образом, задача автоматизации технического диагностирования локомотивов должна решаться как оптимизационная в силу её высокой стоимости.

Далее предложен метод (научный подход) и соответствующая методика (практическое руководство и программное обеспечение) оценки экономической целесообразности внедрения АСТД [261], а также произведена оценка технико-экономической целесообразности внедрения АСТД на примере основных типов оборудования локомотивов.

4.2 ЭФФЕКТ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

4.2.1 Источники эффекта

Оценить допустимость затрат на АСТД можно через их технико-экономическую целесообразность: сами АСТД не приносят дополнительный доход и не сокращают затраты, как и весь локомотиворемонтный и даже локомотивный комплексы – необходимо найти источник эффективности.

Железнодорожный транспорт играет стратегическую роль в экономической структуре РФ [108, 194] с миссией эффективного развития конкурентоспособного на российском и мировом рынках транспортного бизнеса [194]. Миссия железнодорожного транспорта не выполнима без поддержания инфраструктуры, содержания парка вагонов и, конечно, без исправного современного парка локомотивов, которые составляют треть всех фондов ОАО «РЖД»: локомотивный комплекс является вторым после инфраструктуры затратным элементом железнодорожного транспорта. Наряду с эксплуатационными затратами (заработная плата локомотивных бригад, электроэнергия, горюче-смазочные материалы, песок и др.) локомотивный комплекс несёт большие затраты на поддержание тягового подвижного состава в исправном состоянии (более 200 млрд

руб. в год). С 2014-го года локомотиворемонтный комплекс выделен в отдельную вертикаль и передан сервисным компаниям, основными из которых являются группа компаний «ЛокоТех», «СТМ-Сервис», «Рослокомотив» и др. [106, 107].

Таким образом, эффект от любых мероприятий в локомотиворемонтном комплексе не увеличивает доходность транспорта, а снижает себестоимость услуг тяги. Применительно к АСТД – это снижение стоимости жизненного цикла в части технического обслуживания и ремонта локомотивов (ТОиР) [225, 271].

Далее рассмотрены основные составляющие эффекта от АСТД.

Примечание: в диссертации рассмотрен эффект влияния АСТД и ТОиР в целом на стоимость жизненного цикла локомотивов. В меньшей степени – важный эффект от экономии энергоресурсов. Например, правильная настройка топливной аппаратуры: высокий уровень энергоэффективности соответствует оптимальным режимам работы основных узлов дизеля и является условием надежной работы, а показатель энергоэффективности может использоваться в качестве интегрального показателя состояния ряда агрегатов. Комплексно эта задача рассмотрена в трудах д.т.н. В. В. Грачёва применительно к современным тепловозам с МСУ [89 – 91]. В научных исследованиях д.т.н. В. Н. Игина [116] предложены методы анализа энергетической эффективности тепловозов. В исследованиях В. А. Мельникова [154, 180] по статистике МСУ-ТП тепловозов серии 2ТЭ116У выполнен анализ вырабатываемой энергии ДГУ по позициям. В трудах к.т.н. И. И. Лакина [152] показано влияние настройки аппаратуры электровозов переменного тока на их коэффициент мощности в тяговом и рекуперативном режимах работы. Отдельно следует отметить научную школу экономии электроэнергии д.т.н. В. Т. Черемисина [141, 362], созданную в ОмГУПС. Настоящая научная работа выполнялась с позиций сервисного обслуживания локомотивов, поэтому энергоэффективность рассмотрена в меньшей степени.

4.2.2 Сокращение времени ожидания ремонта

В настоящее время при техническом обслуживании и ремонте (ТОиР) имеют место перепростои локомотива из-за ожидания комплектующих для выполнения непланового ремонта в следствие отказа.

Основные источники информации о техническом состоянии локомотивов показаны на рисунке 4.1. В настоящее время главным из них является бортовой рукописный журнал формы ТУ-152 (блок 5) [298], в котором машинист фиксирует субъективные замечания по работе локомотива. Например, «броски тока в тяге», «нет мощности на 15-й позиции», «нет входа в рекуперацию», «многократно срабатывает защита» и др. В случае создания электронной версии бортового журнала (предпосылкой является наличие бортового компьютера в кабине – Блока индикации) – это будет ещё один бортовой вид АСТД (субъективный).

Второй не менее важный источник информации (блок 6) – это результаты визуальной приёмки локомотива на ТОиР, при которой фиксируется как комплектность локомотива и наличие проявлений вандализма, так и внешние признаки отказов: течь масла, наличие трещин, подгаров, другие визуальные признаки отказов. Информация в обоих случаях формируется в депо в момент захода локомотива на ТОиР. Таким образом, в случае обнаружения отказов, требующих использования комплектующих или даже замены оборудования, может возникнуть пауза из-за отсутствия переходного оборудования (материалов повторного использования) и товарно-материальных ценностей (ТМЦ) на складе. Это, в свою очередь, приведет к перепростою локомотива в депо.

Наряду с перечисленными источниками информации также используются данные АСОУП [6] (блок 2) о показателях эксплуатации локомотива, прежде всего – пробеге (раздел 2). Наличие отказов перевозочного процесса (опоздание поезда, вызов вспомогательного локомотива, необходимость «снятия локомотива с кольца» для выполнения непланового ремонта (НР), и др.) в ОАО «РЖД» фиксируется в информационной системе КАС АНТ [221]. Оба источника информации косвенно могут указывать на отказ, однако также носят субъективный и не точный характер. Например, «многократное срабатывание защит»: причины могут быть самые разные, поэтому планирование ремонтных ресурсов по этим источникам информации затруднён, хотя возможен по ранее накопленной статистике.

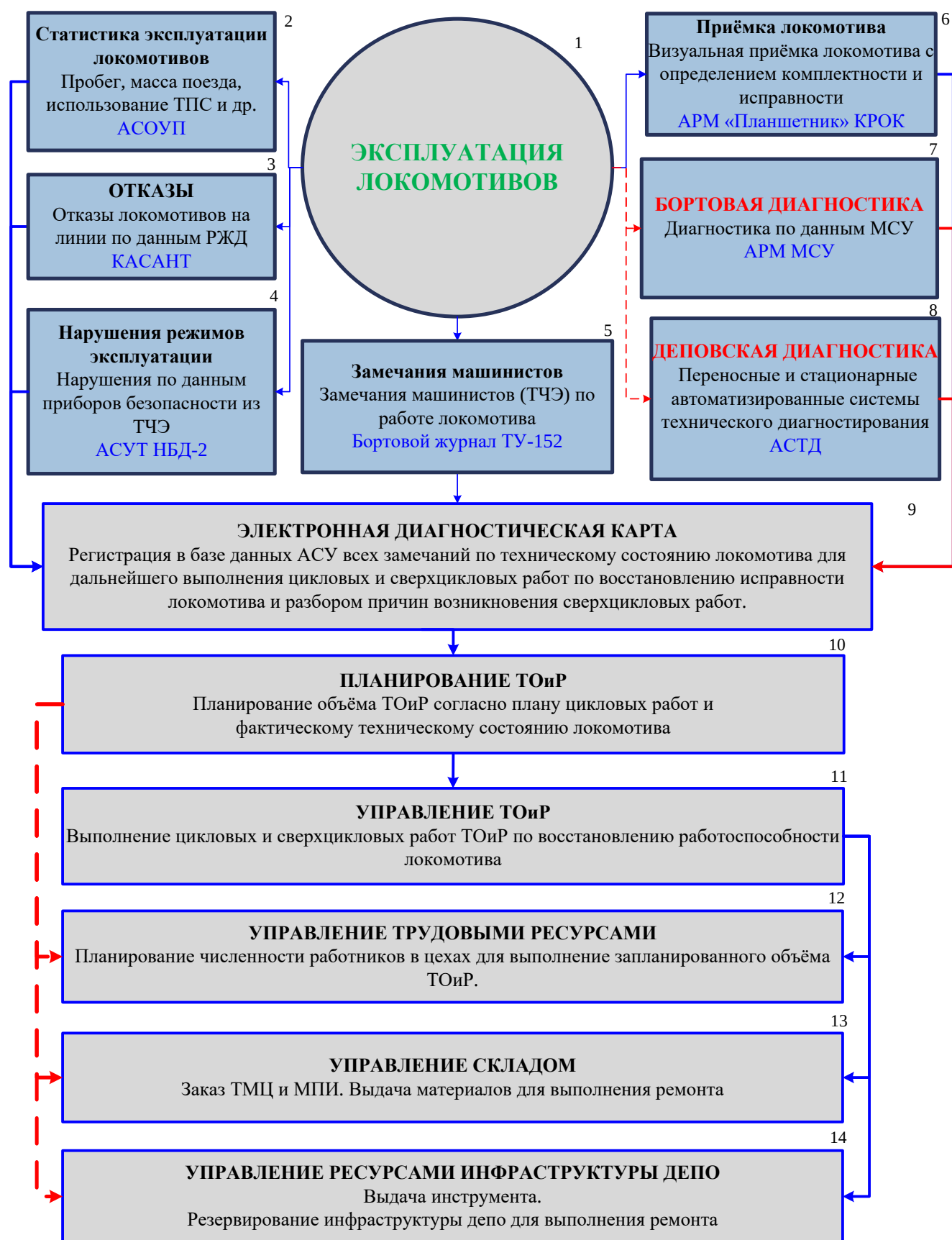


Рисунок 4.1 – Источники информации о техническом состоянии локомотива (красный пунктир – новая функциональность АСТД, сокращающая время простоя локомотивов на ТОиР) [296]

Таким образом, при отсутствии АСТД основная информация о техническом состоянии локомотива определяется при его заходе в депо (блок 9), планирование ТОиР носит оперативный характер (блок 10), что приводит к оперативному (без предварительного планирования) управлению ресурсами: трудовыми (блок 12), складом (блок 13), инструментом, оборудованием и инфраструктурой депо (блок 14). Вероятность возникновения дефицита одного или нескольких ресурсов приводит к перепростоя локомотива в ожидании ресурсов для ремонта.

Наличие бортовых АСТД (блок 7) позволит определить наличие предотказных состояний ещё до захода локомотива в депо. При этом под предотказным состоянием понимается работоспособное состояние локомотива с наличием неисправности или тренда к появлению неисправности (риск отказа).

Неисправность или тренд к появлению неисправности могут показать и деповские переносные или стационарные АСТД (блок 8) во время предыдущего обслуживания. В результате появится возможность заранее заказать необходимые для выполнения ремонта ресурсы, сократив, тем самым, потери от перепростоя локомотива.

Таким образом, применение АСТД позволяет сократить время простоя локомотива в депо благодаря сокращению ожидания комплектующих и других ресурсов. В результате сокращение времени ТОиР высвобождает парк локомотивов (рисунок 4.2): по мере сокращения времени простоя T на ремонте ТОиР № X накапливается резерв времени ΔT_x , который при очередном виде ТОиР станет равным времени эксплуатации одного локомотива T_L :

$$T_L = \sum_{x=1}^X (\Delta T_x), \quad (4.2)$$

где X – число ремонтов, экономия времени, на которых не менее ресурса времени одного локомотива.

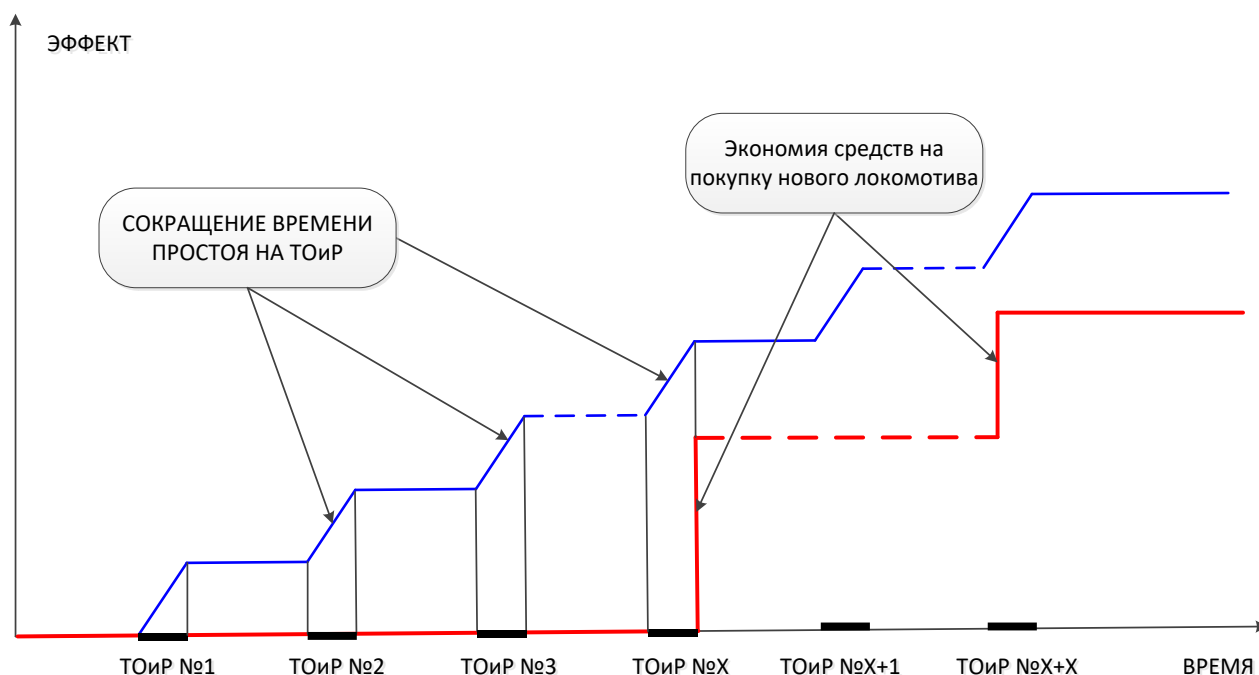


Рисунок 4.2 – Эффект R_1 от АСТД за счёт сокращения парка локомотивов [368]

Экономия времени простоя на ремонте позволит сократить число закупаемых локомотивов в объеме N_L :

$$N_L = \sum_{y=1}^Y (\Delta T_y) / T_L, \quad (4.3)$$

где Y – общее число ремонтов с экономией времени благодаря АСТД.

Первый вид экономии от внедрения АСТД составит R_1 :

$$R_1 = C_L \cdot T_L, \quad (4.4)$$

где C_L – стоимость одного локомотива.

К эффекту R_1 относится сокращение времени на приёмку локомотива в ремонт: диагностирование позволит вовремя выявить отказы (предотказы) и включить соответствующие работы в объём запланированного ТОиР.

Более 60 % работ ТОиР объёма ТР-1 звучит как «осмотреть и в случае необходимости заменить (отремонтировать)» [218]. Очевидно, что АСТД могут сократить время на осмотр оборудования локомотива.

4.2.3 Сокращение объема плановых ремонтов

Второй эффект R_2 связан с сокращением стоимости ремонта за счёт внедрения элементов ремонта по фактическому техническому состоянию [271]. В последнее время часто используется термин «Предиктивный» или «Предсказательный» ТОиР (Predictive maintenance) [371], который предполагает широкое использование АСТД и математических методов обработки информации для мониторинга и прогнозирования технического состояния сложных технических систем с целью отказа от планово-предупредительной системы ТОиР со снижением его себестоимости. Например, теоретически можно отказаться от плановой замены масла, воды, смазок. Предиктивный ремонт частично нашёл практическое применение для механической части локомотива, когда на плановых ТОиР не производят разбор подшипниковых узлов, редукторов и колёсно-моторных блоков в целом. Вместо этого производят вибрационное диагностирование узлов с прогнозированием его работоспособности. Удалось частично отказаться от ТОиР электронного оборудования за счёт его бортового диагностирования [301, 302].

На рисунке 4.3 показана динамика получения эффекта R_2 . На каждом ремонте i за счёт сокращения части планово-предупредительных работ с эффектом ΔR_{2i} . На ремонте X может понадобиться усиленный ремонт с удорожанием ТОиР на ΔR_{2X} . Тогда эффект от предиктивного ремонта составит:

$$R_2 = \sum_{i=1}^{X-1} (\Delta R_{2i}) - \Delta R_{2X}, \quad (4.5)$$

$$\text{где} \quad \sum_{i=1}^{X-1} (\Delta R_{2i}) < \Delta R_{2X}. \quad (4.6)$$

4.2.4 Сокращение объема неплановых ремонтов

Третий вид эффекта R_3 от АСТД – это предотвращение дорогих отказов за счёт устранения предотказа (рисунок 4.4). Например, восстановление предотказного состояния крышки цилиндра дизеля (замена форсунки) может предотвратить появление трещин с дальнейшей отбраковкой крышки.

Число устранённых предотказов может быть больше числа отказов, но общая стоимость неплановых ремонтов сократиться:

$$R_3 = R_{\text{ОТК}} - \sum_{n=1}^N (R_{\text{пред } n}), \quad (4.7)$$

где n – очередное устранение предотказного состояния;

T – общее число устранений предотказных состояний;

$R_{\text{ПРЕД } n}$ – стоимость устранения n -го предотказа;

$R_{\text{ОТК}}$ – стоимость устранения отказа и восстановления работоспособности.

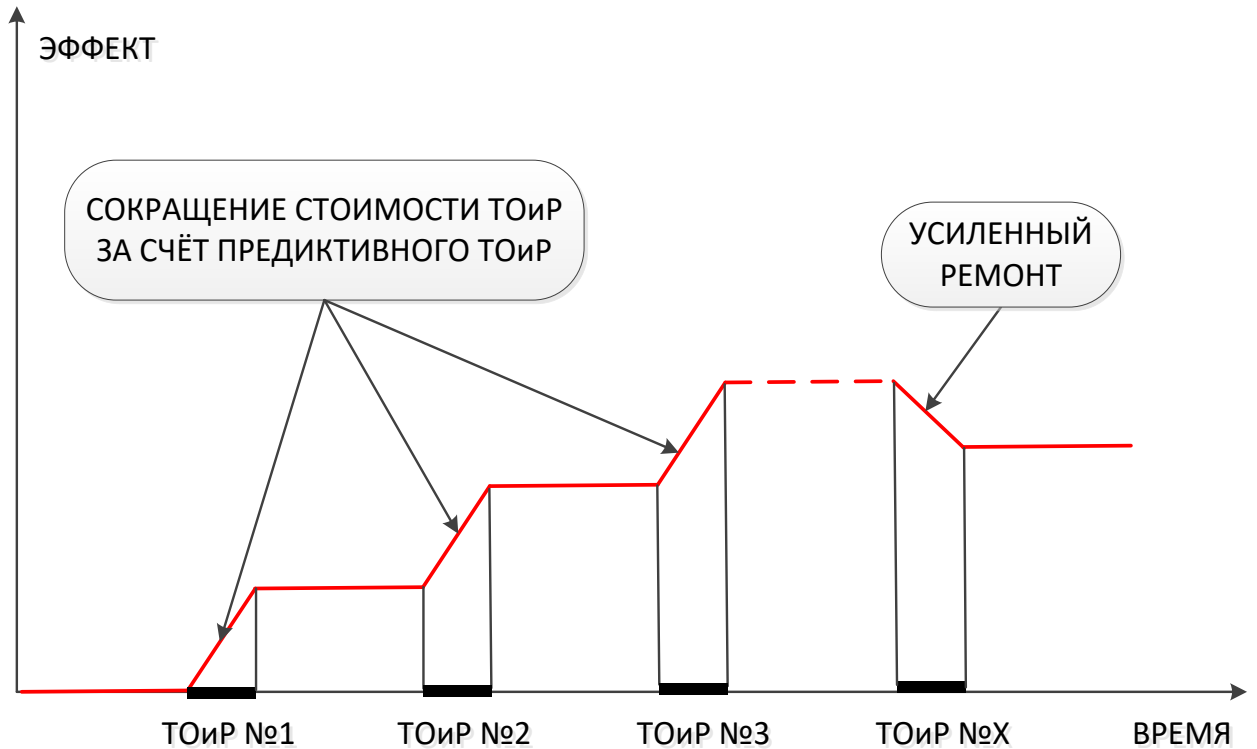


Рисунок 4.3 – Эффект R_2 от АСТД за счёт предиктивного обслуживания

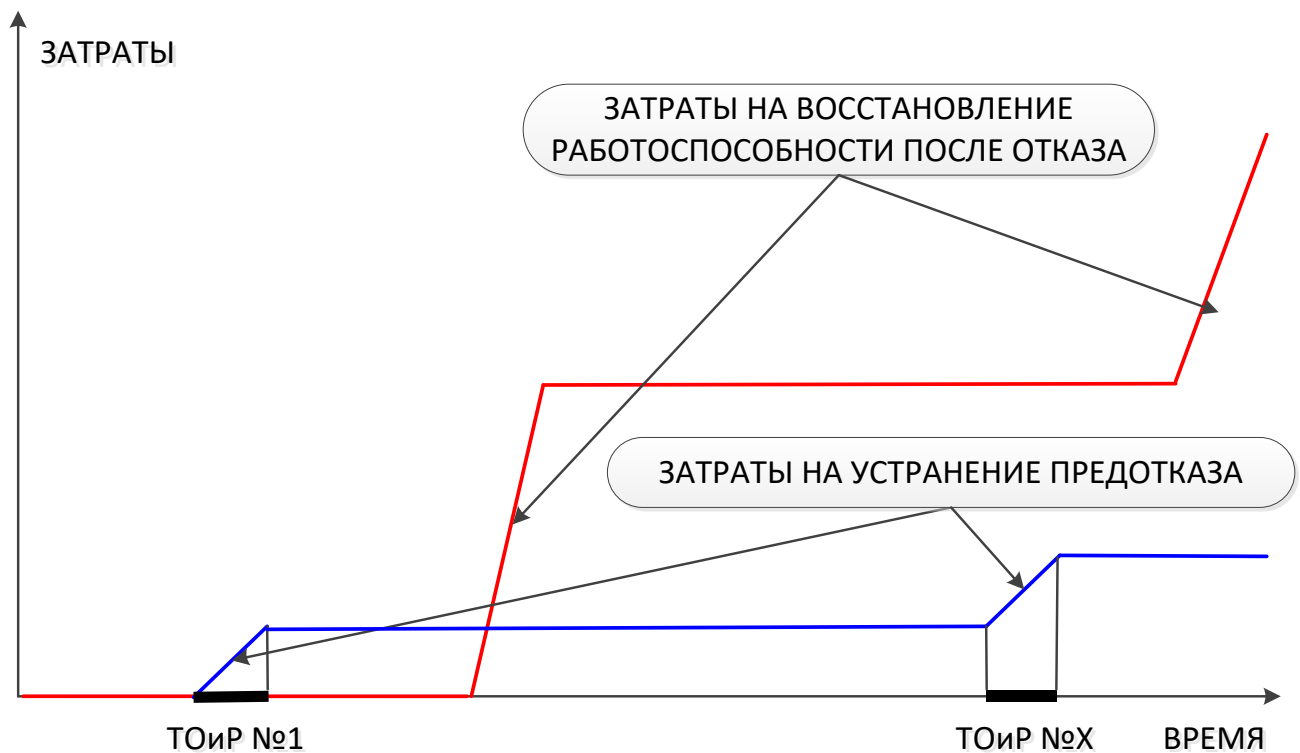


Рисунок 4.4 – Эффект R_3 от АСТД за счёт снижения последствий отказов

4.2.5 Общий эффект от внедрения систем диагностирования

Эффект от внедрения АСТД R достигается за счёт следующего.

- 1 Сокращение потребного парка локомотивов за счёт сокращения времени простоя на ТОиР (эффект R_1) [271]. Определяется как произведение стоимости нового локомотива C_L на число высвобождаемых локомотивов $N_{ЛОК} = \sum_{y=1}^Y (\Delta T_y) / T_L$. В процессе моделирования (подраздел 4.5) будет доказано, что этот вид эффекта самый значимый при расчёте эффективности АСТД.
- 2 Уменьшение стоимости ТОиР за счёт внедрения элементов предиктивного обслуживания $\sum_{i=1}^{X-1} (\Delta R_{2i}) - \Delta R_{2X}$ (эффект R_2) и сокращения объёма плановых цикловых работ. Это эффект оказался не существенным. Во-первых, изменение планово-предупредительной системы ремонта требует согласования и переутверждения регламентов ремонта. Во-вторых, деградационные отказы не позволяюткратно уменьшить период диагностирования. Например, даже если система диагностирования позволят определить наличие остаточного ресурса тормозных колодок, электрических щёток тяговых электродвигателей, полозов токоприёмника и др., то его может не хватить до следующего обслуживания.
- 3 Сокращение последствий внезапных отказов $R_{ОТК} = \sum_{n=1}^N (R_{пред n})$ (эффект R_3). Этот вид эффекта занимает второе место после сокращения парка, но пересекается с ним, т.к. сокращение отказов на линии – один из источников сокращения парка потребных локомотивов.

Таким образом, эффект от АСТД определяется как:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = C_L \cdot \sum_{y=1}^Y (\Delta T_y) / T_L + \sum_{i=1}^{X-1} (\Delta R_{2i}) - \Delta R_{2X} + R_{ОТК} - \sum_{n=1}^N (R_{пред n}). \quad (4.8)$$

Численные значения по формуле 4.8 получены в результате моделирования и приведены в подразделе 4.4.

4.3 ЗАТРАТЫ НА ДИАГНОСТИРОВАНИЕ

4.3.1 Источники затрат

Стоимость АСТД Q определяется совокупностью капитальных затрат Q_K , приведённых к одному году через нормативный коэффициент окупаемости E_H , и эксплуатационных затрат $Q_{\text{Э}}$,

$$Q = E_H \cdot Q_K + Q_{\text{Э}}, \quad (4.9)$$

где Q_K и $Q_{\text{Э}}$ определяются совокупностью входящих в них затрат:

$$Q_K = \sum_{n=0}^N \Sigma Q_{Kn}, \quad (4.10)$$

$$Q_{\text{Э}} = \sum_{m=0}^M \Sigma Q_{\text{Э}mb}, \quad (4.11)$$

где N и M – число видов капитальных и эксплуатационных затрат (описаны в последующих подразделах).

4.3.2 Капитальные затраты

Начальная стоимость АСТД Q_{K1} – это затраты на покупку оборудования, происходят периодически на протяжении жизненного цикла локомотива. Если рассмотреть период от изготовления локомотива до его заводского (среднего или капитального) ремонта или от заводского до заводского, то покупку АСТД можно считать одноразовой затратой:

$$Q_{K1} = C_{K1}, \quad (4.12)$$

где C_{K1} – стоимость приобретения АСТД.

Примечание: стоимость разработки АСТД входит в её стоимость.

Для начала эксплуатации АСТД может понадобиться произвести оснастку диагностических позиций. Например, для вибродиагностирования механической части локомотива может понадобиться монтаж домкратов. Таким образом, вторая составляющая капитальных затрат – оснастка депо:

$$Q_{K2} = C_{K2}, \quad (4.13)$$

где C_{K2} – стоимость монтажных работ в СЛД.

Для расчёта затрат Q и доходов R как функцию времени t , следует уже приведённые к году через коэффициент E_H расходы привести к единице измерения времени, в качестве которой в работе приняты минуты диагностирования:

$$Q_K(t) = (C_{K1} + C_{K2}) / (365 \text{ дней} \cdot 24 \text{ часа} \cdot 60 \text{ минут}). \quad (4.14)$$

4.3.3 Эксплуатационные затраты

Стоимость обслуживания $Q_{\text{Э}}$ зависит от времени эксплуатации системы:

$$Q_{\text{Э}} = k_2 \cdot t, \quad (4.15)$$

где: t – время эксплуатации системы, мин;

k_3 – коэффициент пропорциональности, определяемый как:

$$k_3 = (Q_{\text{Э1}} + Q_{\text{Э2}} + Q_{\text{Э3}} + Q_{\text{Э4}}) / (365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60), \quad (4.16)$$

где: $Q_{\text{Э1}}$ – стоимость метрологического обслуживания;

$Q_{\text{Э2}}$ – стоимость ремонта, которая определяется интенсивностью отказов диагностического оборудования;

$Q_{\text{Э3}}$ – стоимость хранения оборудования;

$Q_{\text{Э4}}$ – стоимость на экологические мероприятия;

$Q_{\text{Э5}}$ – аренда помещения и др.

4.3.4 Затраты на диагностирование

Само диагностирование требует затрат: трудовых, энергозатрат, материалов и др. Стоимость одного диагностирования Q_3 :

$$Q_3 = k_3 \cdot \Delta t. \quad (4.17)$$

Примечание: если у диагностов не сдельная, а почасовая оплата (т.е. есть оклад и премиальная система), то есть смысл зарплату диагностов отнести к затратам по п. 4.3.3.

АСТД может снизить расходы за счёт определения остаточного ресурса оборудования и снижения объёма планово-предупредительных ремонтов с переходом на предиктивный ремонт, но чаще диагностирование приводит к дополнительным сверхцикловым работам. Например, вибродиагностирование, с одной стороны, устраняет необходимость на каждом ТОиР вскрывать крышки буксовых узлов и снимать крышки редукторов, с другой может диагностировать досрочную замену подшипников. Реостатные испытания почти всегда приводят к дополнительным затратам. Бортовая диагностика также часто требует дополнительных ремонтных операций. Эти дополнительные затраты окупаются, что доказывает моделирование, выполненное в подразделе 4.5.

4.4 МЕТОД И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

4.4.1 Порядок расчёта чистой приведённой стоимости проекта

В современных экономических расчётах для оценки успешности инвестиционного проекта используется показатель «Чистая приведенная к текущему дню стоимость проекта NPV (Net Present Value)» [392], который рассчитывается по формуле:

$$NPV = \sum_{t=0}^n (CF_t / (1 + R)^t), \quad (4.18)$$

где: t – время от начала проекта, обычно в годах;

n – количество интервалов времени;

CF_t – денежный поток (расходы и доходы);

R – ставка дисконтирования денежных потоков, рекомендуется $R = 0,1$.

Если использовать переменную аннуитетную ставку дисконтирования RR :

$$RR = 1 / (1 + R)^t, \quad (4.19)$$

то:
$$NPV = \sum RR_t \cdot CF_t. \quad (4.20)$$

Инвестиционный проект признаётся целесообразным, если NPV достигает положительного значения ($NPV > 0$) за время t меньше заданного (например, 6 лет). Именно эта методология положена в основу программы имитационного моделирования экономической целесообразности применения той или иной АСТД “ТЕО”, написанной автором на алгоритмическом языке Visual Basic for Applications (VBA) в среде MS Excel [373].

4.4.2 Помесячный расчёт коэффициента дисконтирования

Обычно в формулах 3.18 и 3.20 время t берётся как целое число по годам (от куда и происходит термин «аннуитетный» – annual: годовой). В этом случае срок окупаемости определяется с точностью до года. Т.к. инфляция, девальвация и другие причины дисконтирования действуют постоянно, то процесс по формуле 3.18 можно представить как постоянный процесс интегрирования:

$$NPV = -Q_K + \int_0^T CF(t)(1+R)^{-t} dt, \quad (4.21)$$

где: Q_K – капитальные затраты на приобретение и внедрение АСТД.

В предлагаемой методике определения эффективности АСТД расчёт выполнен ежемесячно: вычисление NPV происходит по формуле:

$$NPV = -Q_K + \sum_{y=0}^{10} \sum_{m=1}^{12} (ZE_{ym} - ZT_{ym}) \cdot 1,1^{-(y + m/12)}, \quad (4.22)$$

где: y – цикл по годам с нулевого года по десятый: $y \in [0, 10]$;

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

ZE_{ym} и ZT_{ym} – полученный эффект и затраты в году y и месяце m .

В программе TEO [254], написанной на VBA, предложенная формула реализуется следующим образом:

```
NPVM = - CAPITAL ' Начальные капитальные затраты на внедрение АСТД
For y = 0 To YearMax ' Цикл по годам для расчёта затрат и экономии
  For m = 1 To 12 ' Цикл по месяцам
    s = s + 1 ' Очередная строка
    n = y + m / 12 ' Дробная степень для текущего месяца текущего года
    RM = 1 / ((1 + R) ^ n) ' Коэффициент дисконтирования
    ZT = ZATRATY ' Текущие месячные затраты на сопровождение АСТД
    ZE = EFFECTY ' Текущие месячные эффекты от внедрения АСТД
    NPVM = NPVM + RM * (ZE - ZT) ' Считаем по формуле NPV
  Next m
Next y ,
```

(4.23)

где CAPITAL, ZATRATY, EFFECTY – алгоритмы вычисления начальных капитальных затрат на внедрение АСТД (начальное значение NPV), текущих месячных затрат ZT и получаемых эффектов ZE. Описаны в следующем подразделе. В таблице 4.1 приведены ежемесячные значения коэффициента дисконтирования, получаемые в результате работы программы по алгоритму 4.23.

Переход на недельный и меньший период расчёта приведёт к большей погрешности расчётов. Годовой расчёт заглубляет точность расчёта. Поэтому ежемесячный расчёт признан оптимальным. Примером ежемесячного расчёта может служить ипотечный аннуитетный расчёт.

Таблица 4.1 – Значение коэффициента дисконтирования RRt по месяцам моделирования при ставке дисконтирования денежных потоков R = 0,1

y	m	R	y	m	R	y	m	R	y	m	R
0	0	1,000	3	5	0,722	6	10	0,521	10	3	0,376
0	1	0,992	3	6	0,716	6	11	0,517	10	4	0,373
0	2	0,984	3	7	0,711	6	12	0,513	10	5	0,371
0	3	0,976	3	8	0,705	7	1	0,509	10	6	0,368
0	4	0,969	3	9	0,699	7	2	0,505	10	7	0,365
0	5	0,961	3	10	0,694	7	3	0,501	10	8	0,362
0	6	0,953	3	11	0,688	7	4	0,497	10	9	0,359
0	7	0,946	3	12	0,683	7	5	0,493	10	10	0,356
0	8	0,938	4	1	0,678	7	6	0,489	10	11	0,353
0	9	0,931	4	2	0,672	7	7	0,485	10	12	0,350
0	10	0,924	4	3	0,667	7	8	0,482			
0	11	0,916	4	4	0,662	7	9	0,478			
0	12	0,909	4	5	0,656	7	10	0,474			
1	1	0,902	4	6	0,651	7	11	0,470			
1	2	0,895	4	7	0,646	7	12	0,467			
1	3	0,888	4	8	0,641	8	1	0,463			
1	4	0,881	4	9	0,636	8	2	0,459			
1	5	0,874	4	10	0,631	8	3	0,456			
1	6	0,867	4	11	0,626	8	4	0,452			
1	7	0,860	4	12	0,621	8	5	0,448			
1	8	0,853	5	1	0,616	8	6	0,445			
1	9	0,846	5	2	0,611	8	7	0,441			
1	10	0,840	5	3	0,606	8	8	0,438			
1	11	0,833	5	4	0,602	8	9	0,434			
1	12	0,826	5	5	0,597	8	10	0,431			
2	1	0,820	5	6	0,592	8	11	0,427			
2	2	0,813	5	7	0,587	8	12	0,424			
2	3	0,807	5	8	0,583	9	1	0,421			
2	4	0,801	5	9	0,578	9	2	0,417			
2	5	0,794	5	10	0,574	9	3	0,414			
2	6	0,788	5	11	0,569	9	4	0,411			
2	7	0,782	5	12	0,564	9	5	0,408			
2	8	0,776	6	1	0,560	9	6	0,404			
2	9	0,769	6	2	0,556	9	7	0,401			
2	10	0,763	6	3	0,551	9	8	0,398			
2	11	0,757	6	4	0,547	9	9	0,395			
2	12	0,751	6	5	0,542	9	10	0,392			
3	1	0,745	6	6	0,538	9	11	0,389			
3	2	0,739	6	7	0,534	9	12	0,386			
3	3	0,734	6	8	0,530	10	1	0,382			
3	4	0,728	6	9	0,526	10	2	0,379			

4.4.3 Расчёт пробега локомотива

Исходными данными для расчёта пробега локомотива LT является среднесуточный пробег локомотива без учёта его простоя на всех видах ТОиР LS . Месячный пробег локомотива LM определяется на условный месяц как:

$$LM = LS \cdot 365 / 12. \quad (4.24)$$

Предлагаемая приближённая формула 4.24 допустима для выполняемого имитационного моделирования. Аналогично определяется пробег за час $LH = LS / 24$, что необходимо для учёта потери пробега LTT за месяц при выполнении тех или иных ремонтов. Таким образом, общий пробег локомотива определяется как:

$$LT = \sum_{y=0}^{10} \sum_{m=1}^{12} (LM - LTT_{ym}), \quad (4.25)$$

где: LTT_{ym} – рассчитанный простой на ТОиР за месяц m года y .

Таким образом, программа последовательно для каждого месяца каждого года определяет месячный пробег локомотива за вычетом недопробега от простоя на выполняемых видах ТОиР, определяемого по среднесуточной скорости.

4.4.4 Порядок определения затрат

Начальные затраты (формула 4.23) CAPITAL (Q_K) складываются из затрат на покупку аппаратно-программного комплекса АСТД (Q_{K1}), затрат на подготовку рабочего места, включая прокладку Интернет, обучение, сопровождение внедрения (Q_{K2}). В программе эти расходы задаются как исходные данные одним числом в тыс. руб.

Эксплуатационные затраты ZATRATY (Q_3) на обслуживание локомотива определяются по следующим статьям расходов:

- зарплата диагностов в месяц с учётом выплат и налогов, тыс. руб. в месяц;
- аренда помещений и другие постоянные расходы, тыс. руб. в месяц;
- затраты на диагностирование как произведение продолжительности диагностирования в минутах на стоимость диагностирования в тыс. руб. в минуту: расход электроэнергии, материалов, топлива, масла и др.

В программе следует задать основные статьи расходов.

4.4.5 Порядок определения эффектов

Текущие месячные эффекты $EFFECTY(R)$ (формула 4.23) включают в себя в денежном выражении все эффекты, описанные в подразделе 4.2.

Для первого вида эффекта R_1 (сокращение парка локомотивов за счёт уменьшения простоя локомотива на ТОиР благодаря применению АСТД) необходимо задать процент сокращения времени простоя на ТР за счёт применения АСТД. Эффект достигается, когда общее сэкономленное на весь парк время простоя DP превысит годовой бюджет времени локомотива $DP_{Loco} = 365 \cdot 24$ часа. В программе принят условный ежемесячный эффект от сокращения парка в дробных частях локомотива. Такой подход корректен, т.к. число локомотивов на полигоне существенно выше числа локомотивов в одном депо.

Для второго вида эффекта R_2 (сокращение себестоимости ТОиР) следует задать сокращение себестоимости для каждого вида ремонта (в тыс. руб.). Если стоимость ТОиР возрастает, то задаётся отрицательное число.

Третий вид эффекта R_3 (сокращение неплановых ремонтов) предлагается учесть через первый как сокращение времени простоя локомотива на неплановых ремонтах аналогично плановым.

4.4.6 Расчёт продолжительности обслуживания

Для моделирования необходимо задать межремонтные периоды (в тыс. км) и продолжительность каждого вида ТОиР. Межремонтные пробеги строго регламентированы, т.к. перепробег локомотивов недопустим по условиям безопасности движения поездов, а недопробег приводит к дополнительным затратам на ТОиР. Поэтому в программе задаются нормативные межремонтные пробеги (таблица 4.2). Пробег до НР вычислен по интенсивности отказов на 1 млн км, а периодичность ТО-1 и ТО-2 в км пересчитана из часов по среднесуточному пробегу локомотива.

Таблица 4.2 – Межремонтные пробеги локомотивов для расчёта NPV

Серия	НР	ТО-1	ТО-2	ТО-3	ТО-4	ТР-1	ТР-2	ТР-3	СР	КР
ЭС5К	200	0,400	2,4	-	300	30	300	600	1200	2400
ЭС4К	180	0,200	1,67	-	300	30	300	600	1200	2400
ТЭ10МК	120	0,175	3,5	7,2	300	29	115	210	720	1420
2ТЭ25КМ	150	0,175	3,5	15	300	75	300	600	1200	2400

Простой локомотивов на всех видах ТОиР нормирован [135, 136, 377], но практически для всех серий и депо не соблюдаются. В п.2 приведены статистические расчёты для каждой серии локомотивов по каждому виду ремонта по данным АСОУП. Эти данные использованы при моделировании (таблицы 2.16 – 2.18).

4.4.7 Методика моделирования эффективности систем диагностирования

Для выполнения моделирования окупаемости АСТД NPV разработана программа на языке VBA в среде Excel согласно алгоритму по рисунку 4.5.

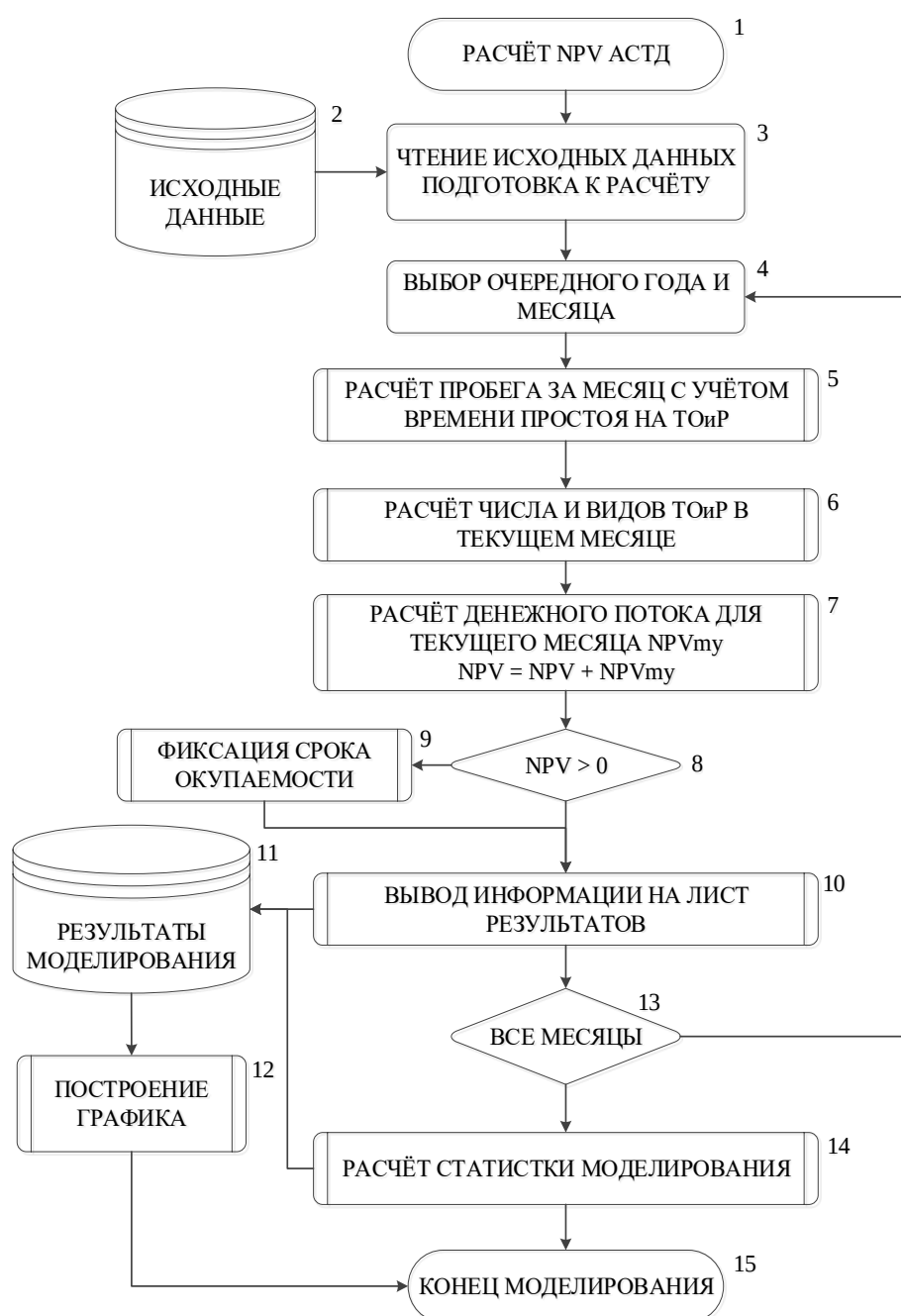


Рисунок 4.5 – Алгоритм расчёта NPV АСТД

Для каждого вида АСТД, для которой рассчитывается её эффективность, в среде Excel создаётся отдельный лист с исходными данными с уникальным именем *ListName*. В дальнейшем программа выводит результаты моделирования на предварительно созданный лист с именем *ResultList*:

$$ResultList = ListName + "R". \quad (4.26)$$

Исходные данные для моделирования вводятся согласно таблицам 4.3 (общие) и 4.4 (с привязкой к виду технического обслуживания и ремонта – ТОиР).

Таблица 4.3 – Первая таблица с исходными данными на листе *ListName* на примере бортовой диагностики МСУД (пример)

Статьи затрат	МСУД
Капитальные: Стоимость покупки и монтажа одной АСТД, тыс.руб.	200
Трудозатраты на сопровождение, обслуживание и метрологию, тыс.руб. в год	10
Зарплата диагностов (всех) с учётом всех выплат и налогов, тыс.руб. в месяц	182
Ежемесячная плата за аренду помещения и другие расходы, тыс.руб. в месяц	-
Расходы на диагностирование, тыс.руб./мин	0,001
Число диагностируемых локомотивов	250
Среднесуточный пробег локомотива, км	800
Цена нового локомотива, тыс.руб.	186 077

Таблица 4.4 – Вторая таблица с исходными данными на листе *ListName* (пример)

№	ТОиР	Периодичность, тыс. км	Простой, час	Диагностика, мин	Сокращение простоя, %	Экономия, тыс.руб.
1	ТО-1	0,400	0,20	5	0%	0
2	ТО-2	2,40	1,67	10	5%	0
3	ТО-3	0	0,00	0	0%	0
4	ТО-4	300	16,03	0	0%	0
5	ТР-1	30	40,75	20	5%	20
6	ТР-2	300	68,98	0	0%	0
7	ТР-3	600	118,83	0	0%	0
8	СР	1200	204,12	0	0%	0
9	КР	2400	204,12	0	0%	0
10	НР	200	16,07	30	25%	20

После ввода исходных данных на листе *ListName* (блок 2), следует, не выходя из этого окна, сочетанием клавиш *Alt-F8* запустить выполнение программы *ТЕО* (рисунок 4.6). Программа считывает исходные данные (блок 3), последовательно для 12 месяцев 11 лет (с 0 по 10) рассчитывает *NPV* (блоки 4 – 7) и выводит результаты расчета на лист *ResultList* (блоки 9, 11), на который по окончании расчётов

произойдёт автоматический выход (таблица 4.7). Вычисленный срок дисконтированной окупаемости выводится на лист *ResultList* (блок 11), а значение NPV – в таблицу, по которой автоматически строится график динамики NPV (рисунок 4.7).

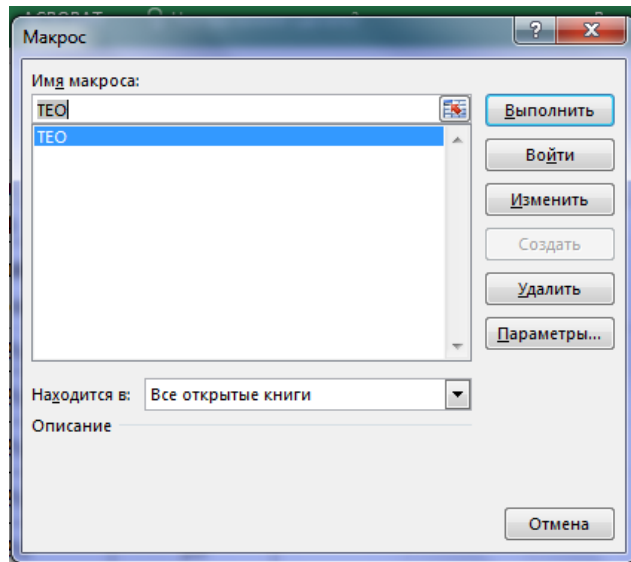


Рисунок 4.6 – Запуск выполнения программы

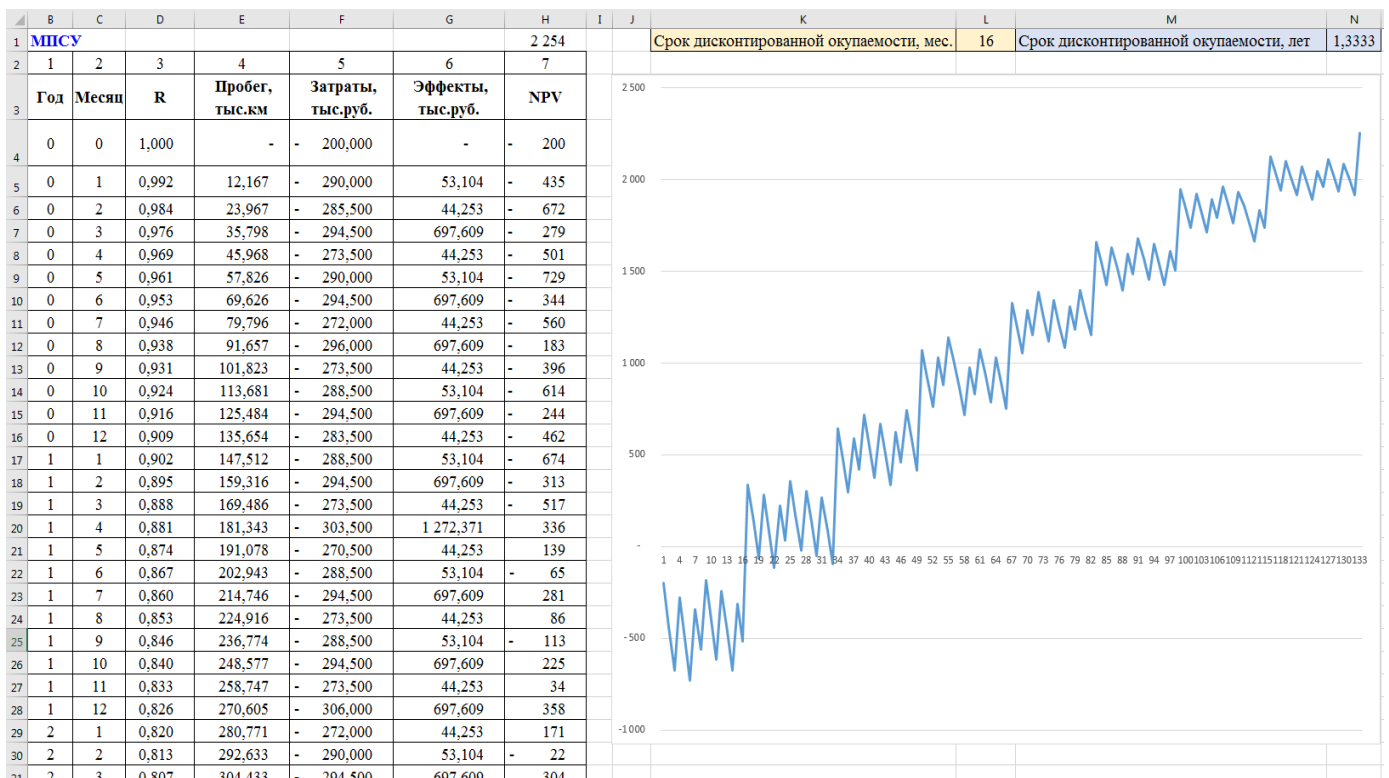


Рисунок 4.7 – Пример результатов моделирования и расчёта NPV

По предложенной методике и программному обеспечению в среде Excel выполнено имитационное моделирование с расчётом NPV для различных видов АСТД. Основные результаты приведены в следующем подразделе.

4.5 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

4.5.1 Бортовые системы диагностирования локомотивов

Бортовое диагностирование возможно с использованием микропроцессорных систем управления (МСУ), поэтому диагностическая функциональность является «бесплатной». Частичное удорожание возможно за счёт установки дополнительных датчиков и систем радиопередачи данных в режиме online. Капитальные затраты включают в себя создание автоматизированного рабочего места (АРМ) диагноста, его приобретение и обслуживание. Текущие затраты связаны, в основном, с заработной платой диагностов.

Эффект от бортовой диагностики возникает при приёмке локомотива локомотивной бригадой (ТО-1), на ПТОЛ (ТО-2). Эффект достигается за счёт диагностирования отказов и предотказов путём просмотра диагностических данных на бортовом компьютере (блоке индикации). При выполнении ТО-3 и ТР-1 проводится глубокая диагностика с целью выявления скрытых предотказных состояний. Для этого данные МСУ о работе локомотива вводятся в стационарный компьютер (по радиоканалу, с Flash-накопителя, по Wi-Fi и др.) для диагностирования с помощью специализированного программного обеспечения (АРМ МСУ): формируется план дополнительных работ. Таким образом, от использования данных бортовых МСУ объём ремонта увеличивается. На «тяжёлых» видах ТОиР диагностирование МСУ не требуется.

Эффект от МСУ достигается сокращением времени подготовки к ТОиР, а главное – за счёт предотвращения неплановых ремонтов за счёт устранения их на стадии предотказа. Основной денежный поток составляет экономия потребного для осуществления перевозок локомотивного парка. Основная эксплуатационная статья расходов – заработная плата диагностов и сопровождение АРМ МСУ.

Выполнено моделирование NPV для МСУ электровозов переменного тока (МСУД серий ЭС5К), электровозов постоянного тока (МПСУ серий ЭС4К) и тепловозов серии 2ТЭ25КМ (МСУ-ТП). Исходные данные для моделирования приведены в таблице 4.5. Стоимость новых локомотивов взята по ценам Рослокомотив 2020-го года. Считается, что в смену выходит один диагност и работает на специально приобретаемом АРМ МСУ.

Таблица 4.5 – Исходные данные для моделирования бортовых АСТД

ТОиР	Пробег, тыс.км	Простой, час	Диагностика, мин	Сокращение простоя, %	Экономия, тыс.руб.
<i>МСУД электровозов ЭС5К</i>					
ТО-1	0,4	0,20	5	5 %	0
ТО-2	2,4	1,67	10	5 %	-1
ТР-1	30	40,75	20	5 %	-5
НР	200	16,07	30	30 %	20
<i>МПСУ электровозов ЭС4К</i>					
ТО-1	0,25	0,20	5	5 %	0
ТО-2	2,5	1,67	10	5 %	-2
ТР-1	30	98,00	20	3 %	-5
НР	180	26,12	30	20 %	5
<i>МСУ-ТП тепловозов 2ТЭ25КМ</i>					
ТО-1	0,175	0,20	7	5 %	0
ТО-2	3,5	1,17	10	5 %	-5
ТО-3	15	30,22	10	5 %	-5
ТР-1	75	5,63	20	5 %	-50
НР	100	38,25	20	30 %	50

На рисунках 4.8 – 4.10 приведены результаты моделирования *NPV*. Резкие скачки вверх соответствуют экономии за счёт сокращения потребного локомотивного парка, оказавшегося главным эффектом. Дисконтированный срок окупаемости системы диагностирования на базе МСУ при создании в депо группы диагностики составил 8 – 10 месяцев. Наибольший эффект достигается у МСУ-ТП из-за высокой стоимости и низкой надёжности дизель-генераторной установки. Следует обратить внимание, что стоимость ТОиР при использовании диагностических данных МСУ увеличивается (график имеет отрицательный наклон). Эффект достигается за счёт экономии времени на ТОиР и, как следствие, сокращение потребного парка локомотивов для осуществления перевозочного процесса. При моделировании сокращение парка составило 2,8 % для электровозов и 3,3 % для тепловозов. На рисунках 4.11 – 4.13 показано влияние исходных данных на результаты моделирования. Низкий суточный пробег, небольшой обслуживаемый парк, малое сокращение числа неплановых ремонтов могут сделать АСТД нерентабельной.

Таким образом, условия эксплуатации АСТД влияют на её рентабельность.

NPV, тыс.руб.

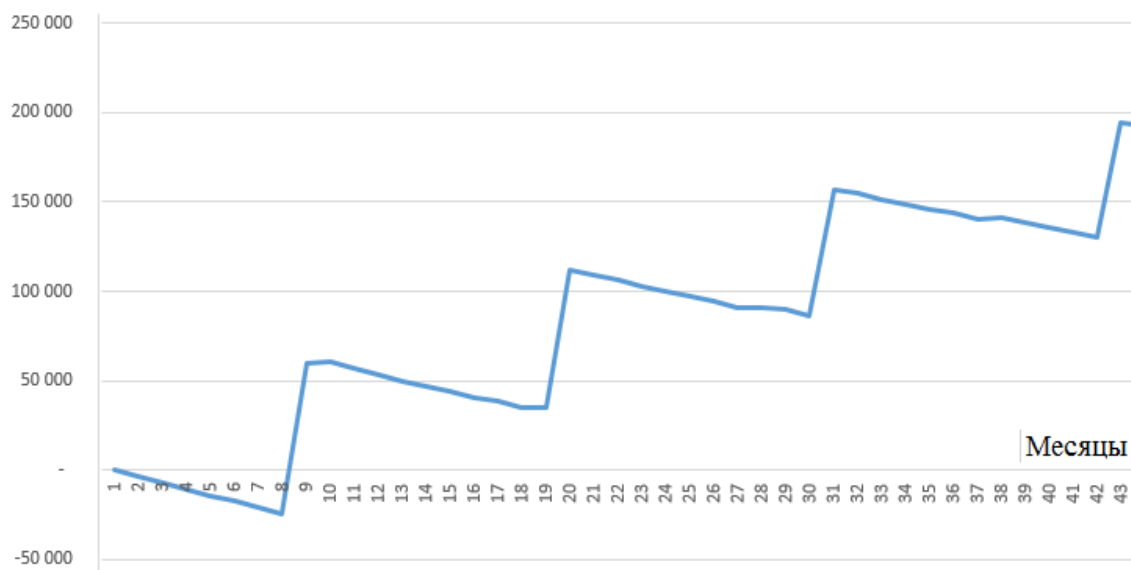


Рисунок 4.8 – Результаты расчёта для МСУД электровозов переменного тока серий ЭС5К

NPV, тыс.руб.

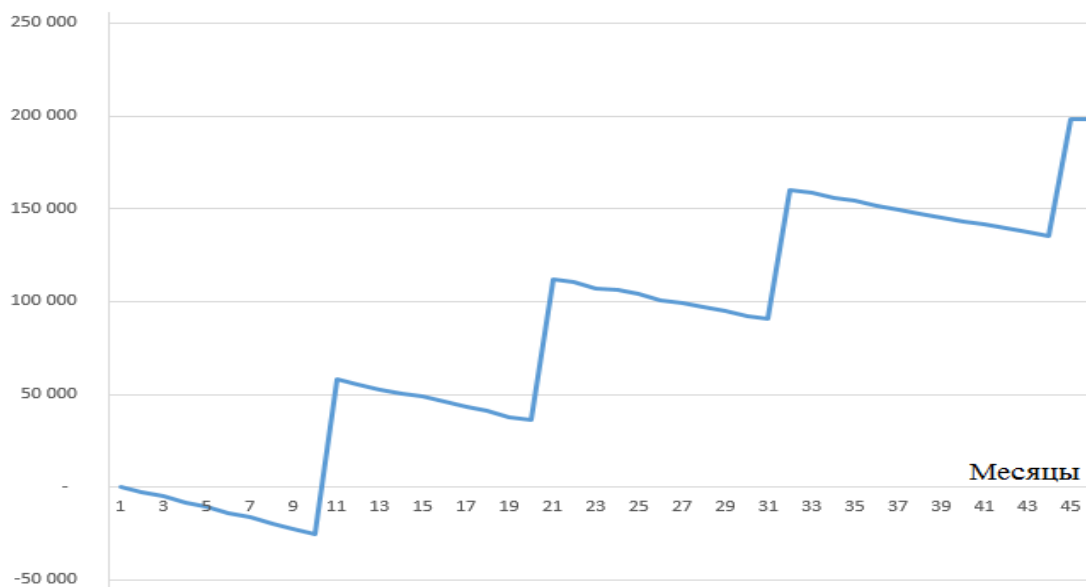


Рисунок 4.9 – Результаты расчёта для МПСУ электровозов постоянного тока серий ЭС4К

NPV, тыс.руб.

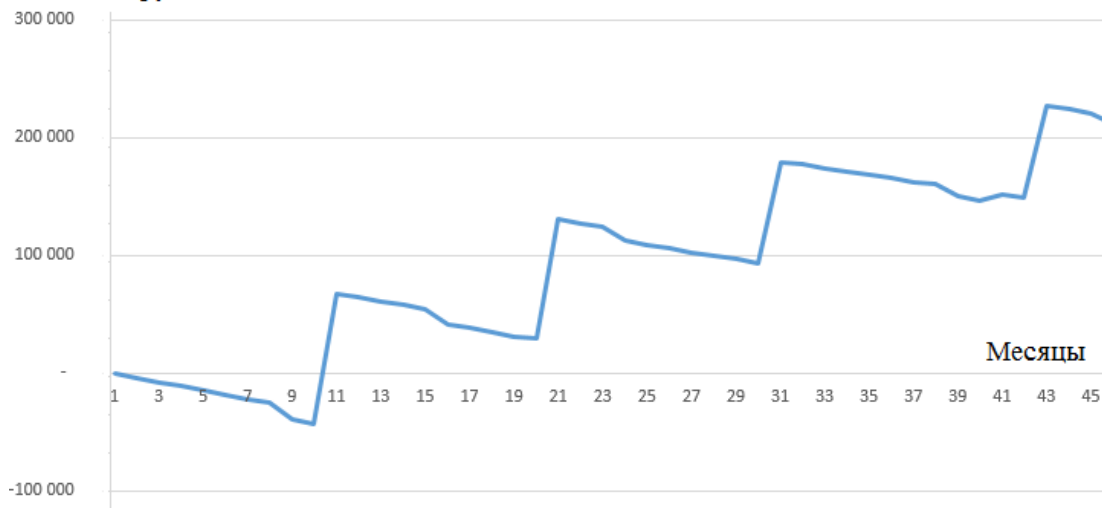


Рисунок 4.10 – Результаты расчёта для МСУ-ТП тепловозов серии 2ТЭ25КМ

NPV, тыс.руб.

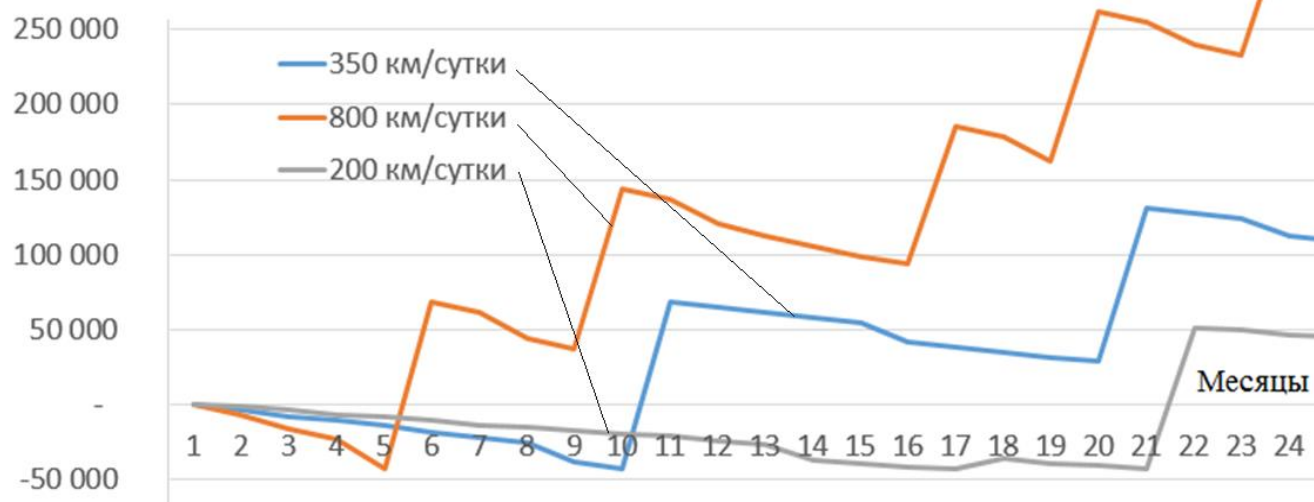


Рисунок 4.11 – Влияние среднесуточного пробега на NPV на примере МСУ-ТП

NPV, тыс.руб.

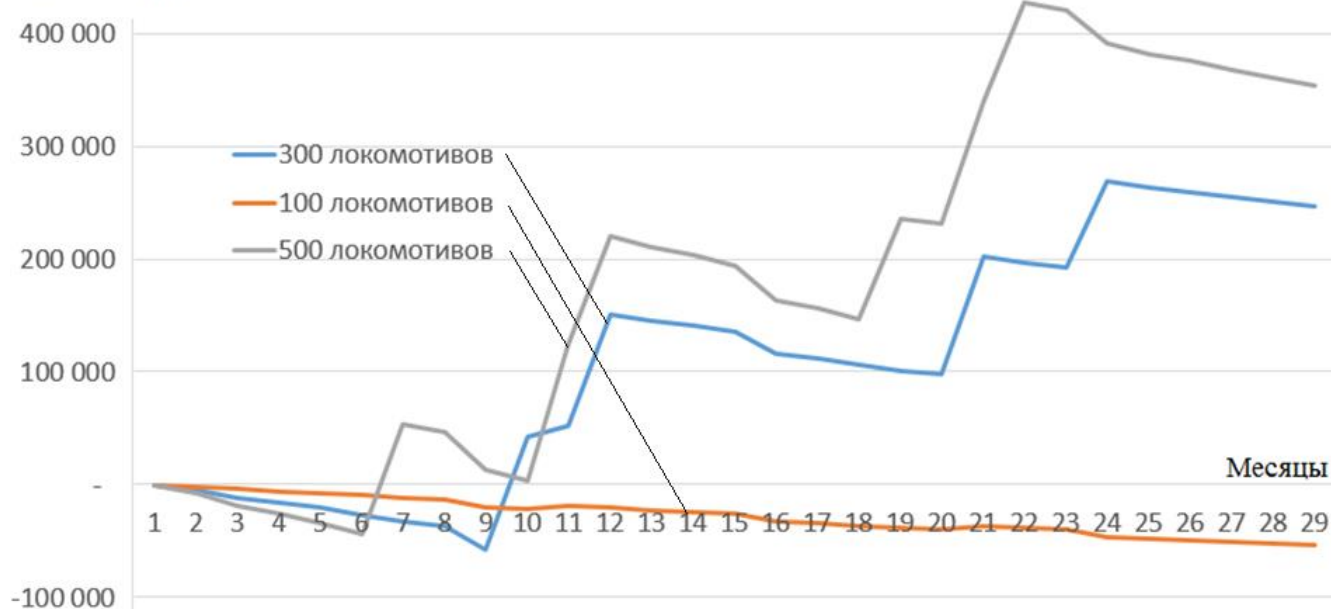


Рисунок 4.12 – Влияние парка локомотивов на NPV на примере МСУ-ТП

NPV, тыс.руб.

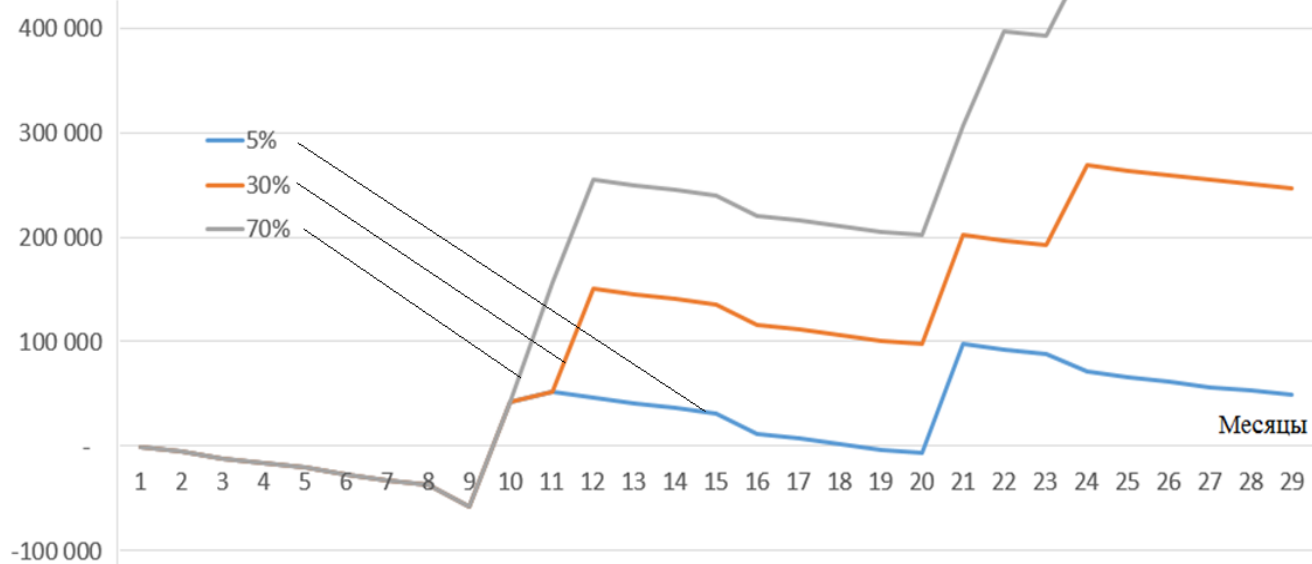


Рисунок 4.13 – Влияние числа отказов на 1 млн км на NPV на примере МСУ-ТП [271]

4.5.2 Бортовые системы учёта расхода топлива тепловозов

В предыдущем подразделе доказана эффективность АСТД на базе микропроцессорных систем управления [271]. В настоящем подразделе рассмотрена эффективность установки дополнительных специализированных систем диагностирования на примере аппаратно-программного комплекса (АПК) БОРТ, главным назначением которого является учёт топлива и диагностирование технического состояния дизель-генераторной установки (ДГУ) тепловоза (аналогично системам АСК, РПДА, АСК ВИС и др.). Главные особенности диагностирования АПК «Борт»: наличие больших начальных затрат на установку аппаратуры на локомотиве. Второе отличие – высокая стоимость восстановления работоспособности ДГУ, т.к. ремонту подлежит дорогостоящее оборудование: крышки цилиндров, форсунки, топливная и холодильная аппаратуры и др. Остальные параметры аналогичны МСУ-ТП.

На рисунке 4.14 показаны результаты моделирования. Срок окупаемости специализированной бортовой АСТД существенно выше, чем у АСТД на базе МСУ, и составляет 30 месяцев (2,5 года), что также является хорошим показателем. Имеется временный переход в зону некупаемости в период с 45-го по 54-й месяц. Но даже по этому периоду времени срок окупаемости будет 4,5 года. При этом главным назначением АПК «Борт» остаётся контроль расхода топлива.

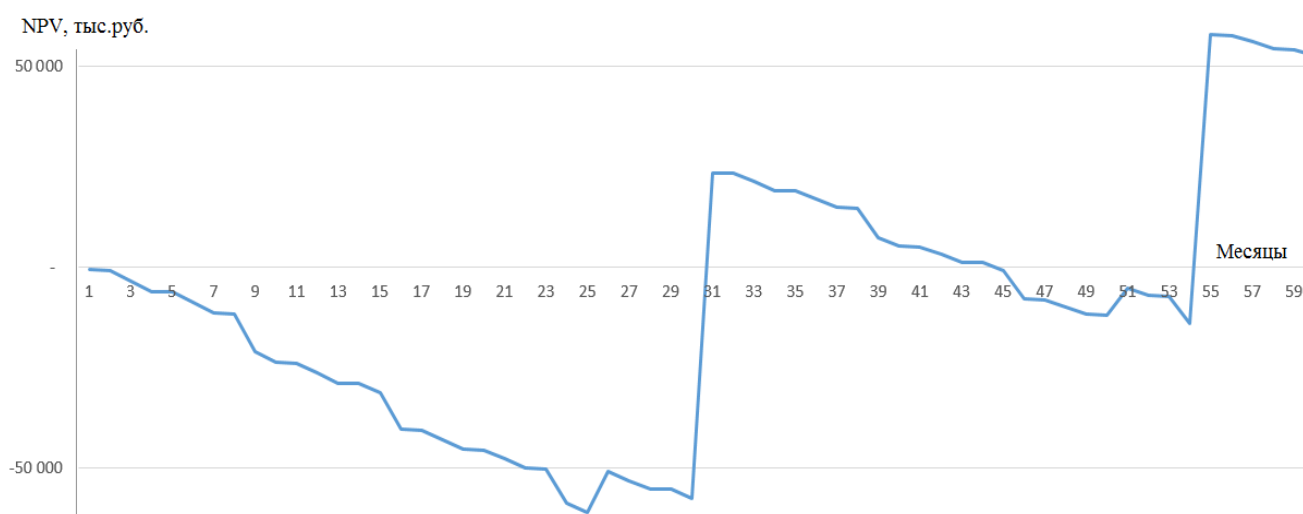


Рисунок 4.14 – Результаты расчёта NPV для АПК «Борт»

Таким образом, высокая окупаемость бортовых дополнительных АСТД имеет место для дорогостоящего оборудования при их низкой надёжности.

4.5.3 Станции реостатных испытаний

Станции реостатных испытаний устанавливаются во всех ремонтных депо для входного и выходного контролей исправности дизель-генераторной установки (ДГУ) тепловозов, регулировки и настройки ДГУ под нагрузкой. Реостатные испытания требуют капитальных затрат на приобретение водяных или сухих реостатов. Также следует отметить, что значительную часть эксплуатационных расходов наряду с заработной платой диагностов, составляет стоимость дизельного топлива для проведения испытаний.

Экономический эффект от реостатных испытаний определяется от обратного: определяются потери, которые понесёт локомотивное хозяйство в случае отсутствия выходного контроля качества ТОиР – реостатных испытаний: существенно возрастёт число неплановых ремонтов, затянется сдача локомотива после ТОиР из-за возврата локомотива в депо приёмщиком РЖД. Также следует отметить высокую стоимость одной минуты диагностирования из-за высокого расхода топлива – 200 руб./мин. (в расчетах не учитывается экономия топлива при правильной регулировке ДГУ).

В таблице 4.6 приведены исходные данные для моделирования. На рисунке 4.11 приведены результаты моделирования. Станции реостатных испытаний являются обязательным технологическим звеном ТОиР, поэтому на рисунке 4.11а приведён денежный поток при отсутствии эффектов, а на рисунке 4.11б – ожидаемый денежный поток. Срок окупаемости станции реостатных испытаний также короткий.

Таблица 4.6 – Данные для моделирования NPV станций реостатных испытаний

ТОиР	Пробег, тыс.км	Простой, час	Диагностика, мин	Сокращение простоя, %	Экономия, тыс.руб.
ТО-1	0,175	0,20	0	0%	0
ТО-2	3,5	1,35	0	0%	0
ТО-3	7,2	83,33	20	5%	-5
ТО-4	300	45,50	0	0%	0
ТР-1	29	149,52	60	5%	-5
ТР-2	115	320,50	120	5%	-10
ТР-3	210	488,25	120	5%	-30
СР	720	523,93	120	5%	-50
КР	1420	523,93	120	5%	-50
НР	100	35,77	30	30%	50

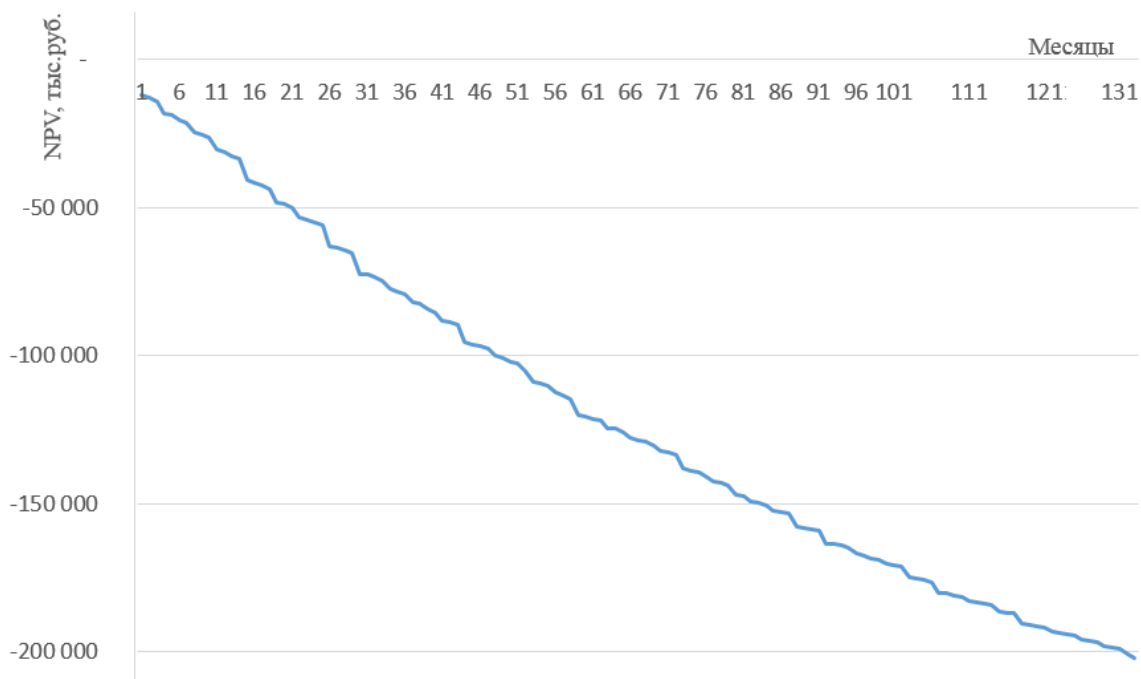


Рисунок 4.15 – NPV для станции реостатных испытаний при отсутствии эффектов

NPV, тыс.руб.

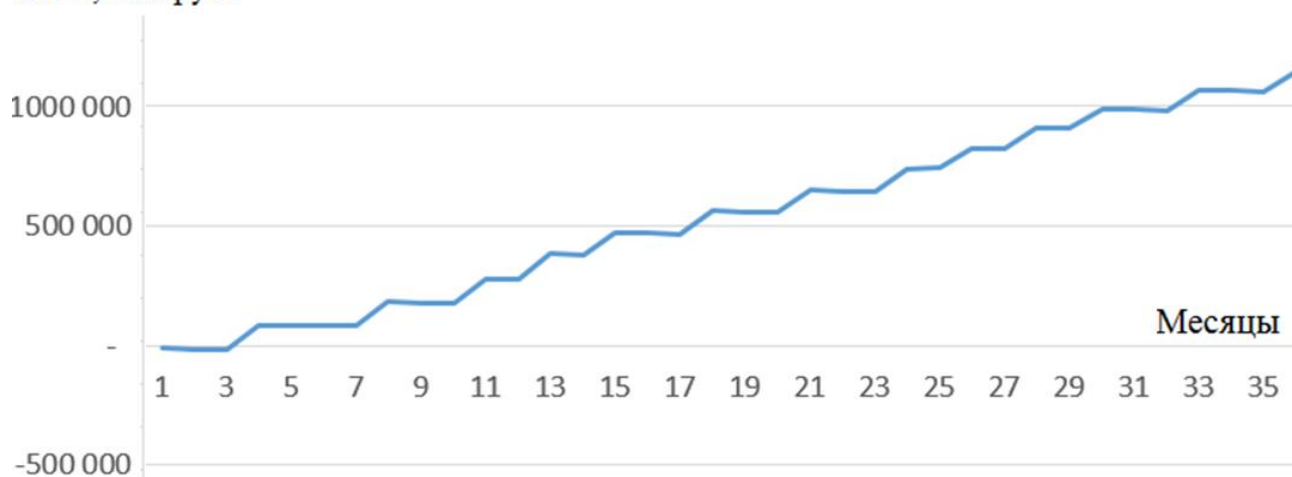


Рисунок 4.16 – NPV для станции реостатных испытаний при наличии сокращения простоя и числа отказов

На рисунках 4.17 – 4.19 приведены результаты анализа влияния исходных данных на NPV станции реостатных испытаний.

Таким образом, стоимость дополнительных работ по итогам реостатных испытаний существенно не влияет на окупаемость системы. Отсутствие сокращения простоя на ТОиР может сделать станции убыточными. Наибольшее влияние имеет наличие сокращения неплановых ремонтов, что достаточно очевидно. При отсутствии сокращения неплановых ремонтов станции реостатных испытаний не окупятся.

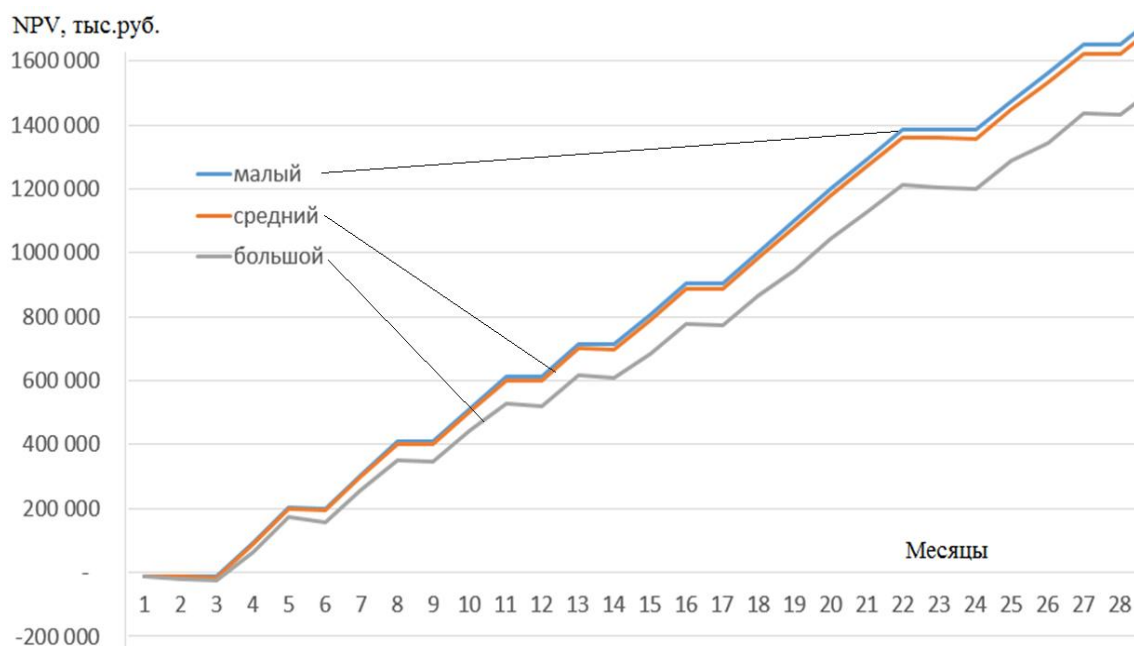


Рисунок 4.17 – Влияние объема дополнительных работ на NPV реостатных испытаний
NPV, тыс.руб.

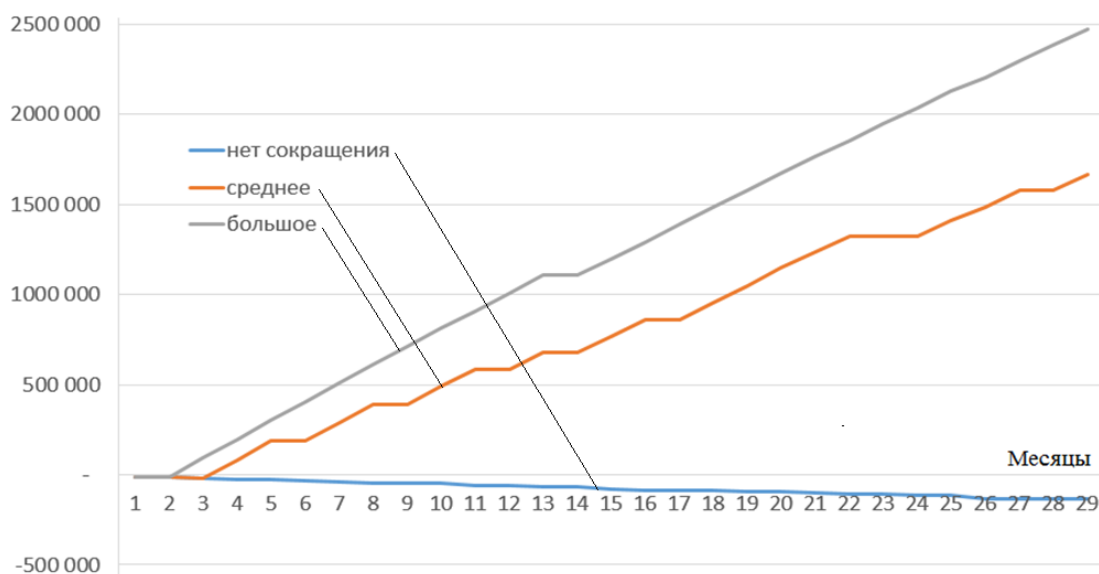


Рисунок 4.18 – Влияние сокращения продолжительности ТОиР на NPV реостатных испытаний

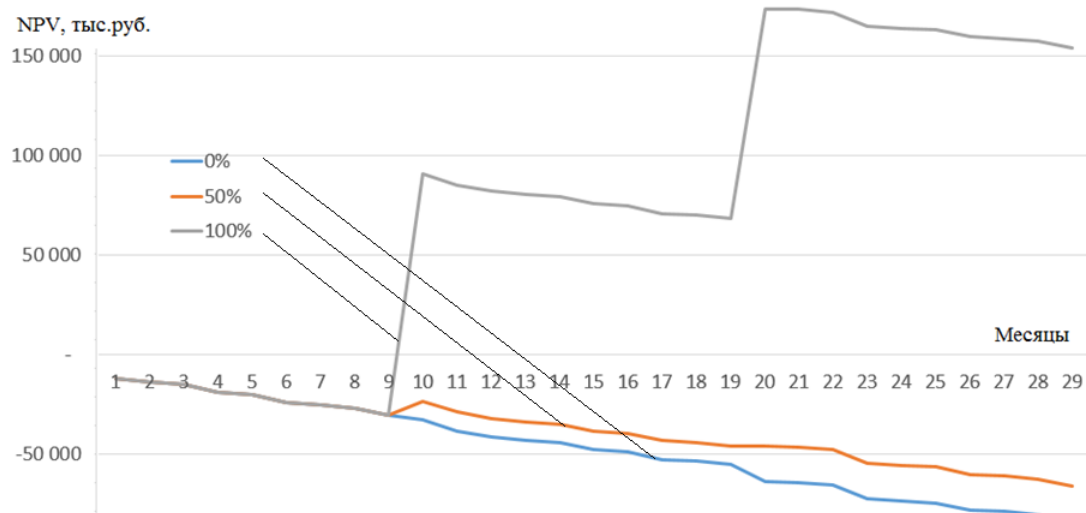


Рисунок 4.19 – Влияние сокращения неплановых ремонтов на NPV реостатных испытаний

4.5.4 Вибродиагностирование колёсно-моторных блоков

Для проведения вибродиагностирования колёсно-моторных блоков локомотивов необходимо оснастить специально выделенные канавы ремонтного депо домкратами и другим технологическим оборудованием, приобрести комплекс вибродиагностирования. Эксплуатационные расходы связаны с фондом заработной платы диагностов, необходимостью проводить метрологическую поверку оборудования. В таблице 4.7 приведены исходные данные для моделирования. Эффект от вибродиагностирования заключается в исключении неплановых ремонтов по отказам КМБ, сокращение объема текущих ремонтов при отсутствии замечаний по техническому состоянию КМБ.

Таблица 4.7 – Данные для моделирования NPV систем вибродиагностирования

ТОиР	Пробег, тыс.км	Простой, час	Диагностика, мин	Сокращение простоя, %	Экономия, тыс.руб.
ТО-1	0,4	0,20	0	0%	0
ТО-2	2,4	1,67	0	0%	0
ТО-3	0	0,00	0	0%	0
ТО-4	300	16,03	0	0%	0
ТР-1	30	40,75	60	5%	-20
ТР-2	300	68,98	0	0%	0
ТР-3	600	118,83	0	0%	0
СР	1200	204,12	0	0%	0
КР	2400	204,12	0	0%	0
НР	400	16,07	0	90%	20

Срок окупаемости систем вибродиагностирования при сокращении ТР-1 на 5 % и числа отказов на 90 % (рисунок 4.20) – меньше 1 года (11 месяцев). На рисунке 4.21 показано влияние сокращения числа неплановых ремонтов на эффективность вибродиагностирования. Очевидно, что отсутствие отказов механической части или, при их наличии, отсутствие сокращения числа отказов, сделает внедрение систем вибродиагностирования нецелесообразным.

Примечание: станции реостатных испытаний и вибродиагностирования дают эффект за счёт предотвращения отказов на линии, в отличие от ряда других АСТД, позволяющих определить остаточный ресурс.

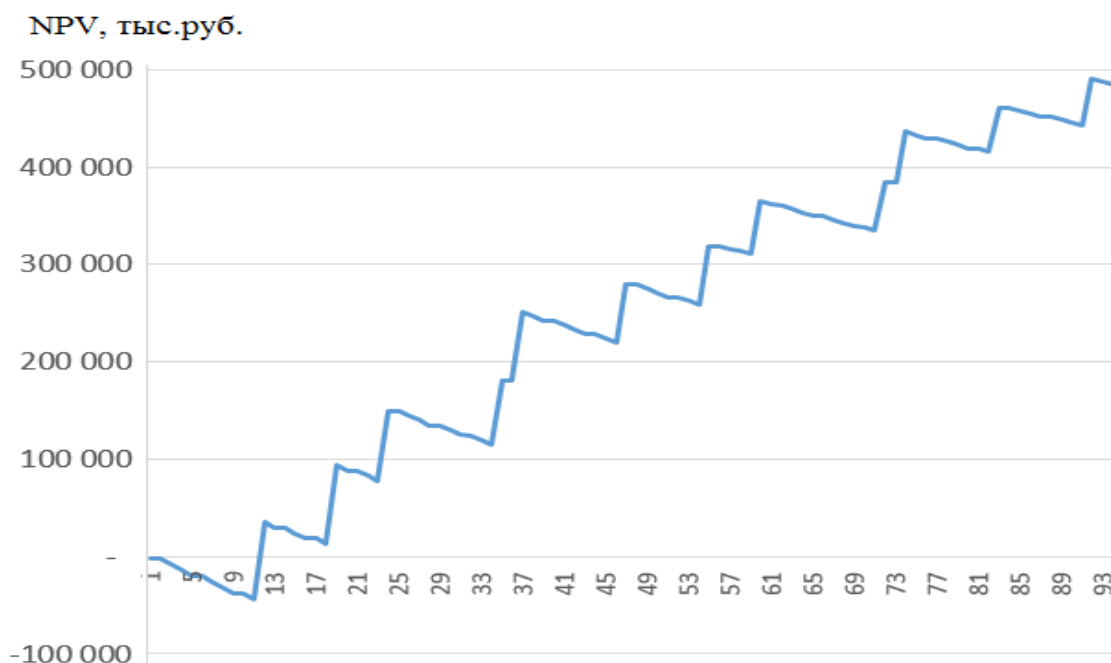


Рисунок 4.20 – Результаты расчёта NPV для АСТД вибродиагностирования

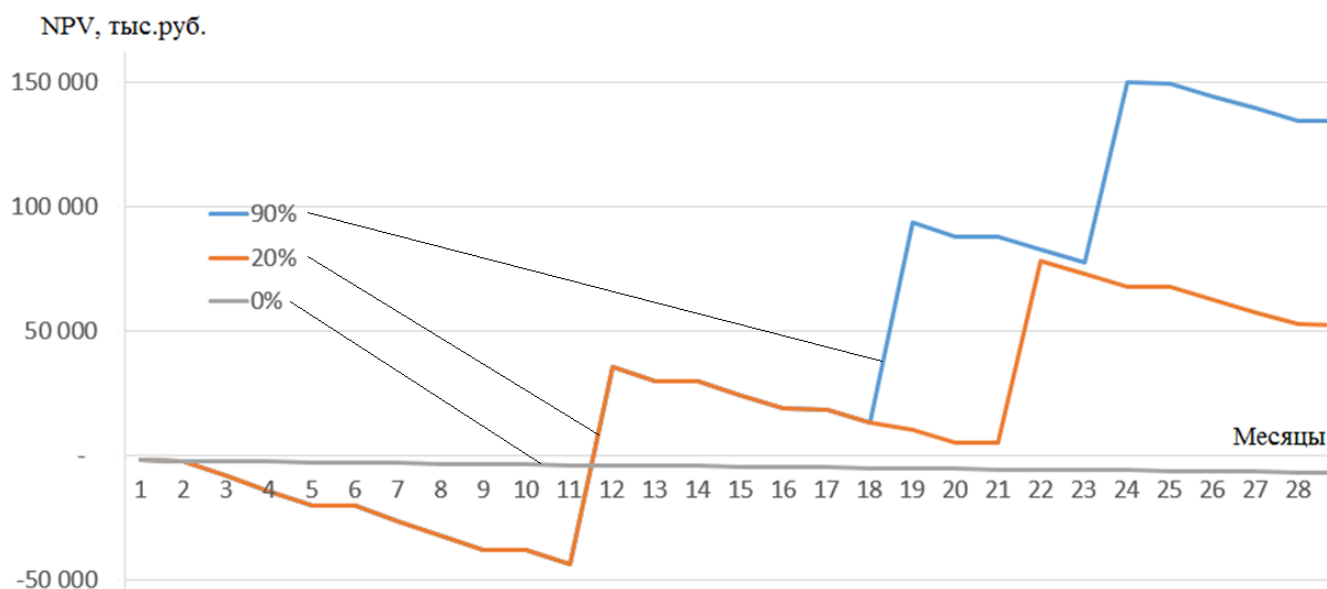


Рисунок 4.21 – Влияние сокращения числа отказов механического оборудования на NPV АСТД вибродиагностирования (при исключении других эффектов)

4.5.5 Станции испытания тяговых электродвигателей

Станции испытания тяговых электродвигателей (ТЭД) методом взаимной нагрузки используются после «тяжёлых» видов ремонта: ТР-3, СР и КР. Испытание двигателей позволяет проверить их исправность и исключить соответствующие отказы на линии. Кроме того, снятие характеристик ТЭД позволяет произвести их подбор и исключить дополнительные отказы по причине разброса характеристик ТЭД. В таблице 4.8 приведены исходные данные для моделирования.

Таблица 4.8 – Данные для моделирования NPV АСТД ТЭД

ТОиР	Пробег, тыс.км	Простой, час	Диагностика, мин	Сокращение простоя, %	Экономия, тыс.руб.
ТР-1	30	40,75	0	0 %	0
ТР-2	300	68,98	0	0 %	0
ТР-3	600	118,83	30	5 %	-15
СР	1200	204,12	30	5 %	-20
КР	2400	204,12	30	5 %	-30
НР	300	16,07	0	25 %	30

На рисунке 4.22 приведены результаты моделирования: дисконтированный срок окупаемости стенда для испытания ТЭД – 54 месяца. Эффект достигается за счёт сокращения неплановых ремонтов, влияние объёма которых показано на рисунке 4.23.

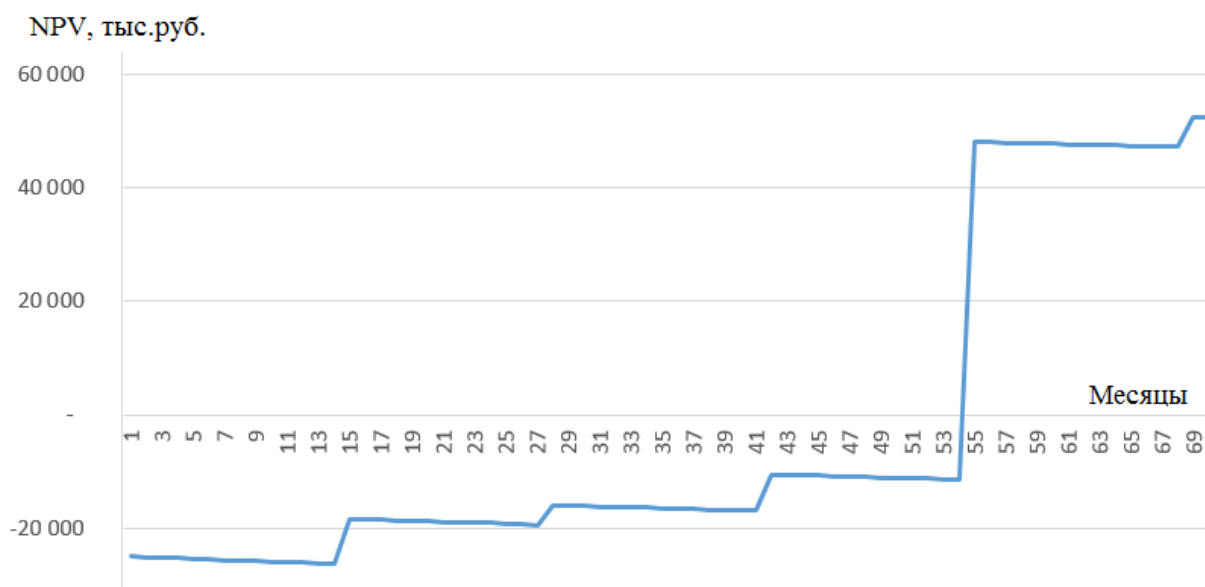


Рисунок 4.22 – Результаты расчёта NPV для стенда испытания ТЭД

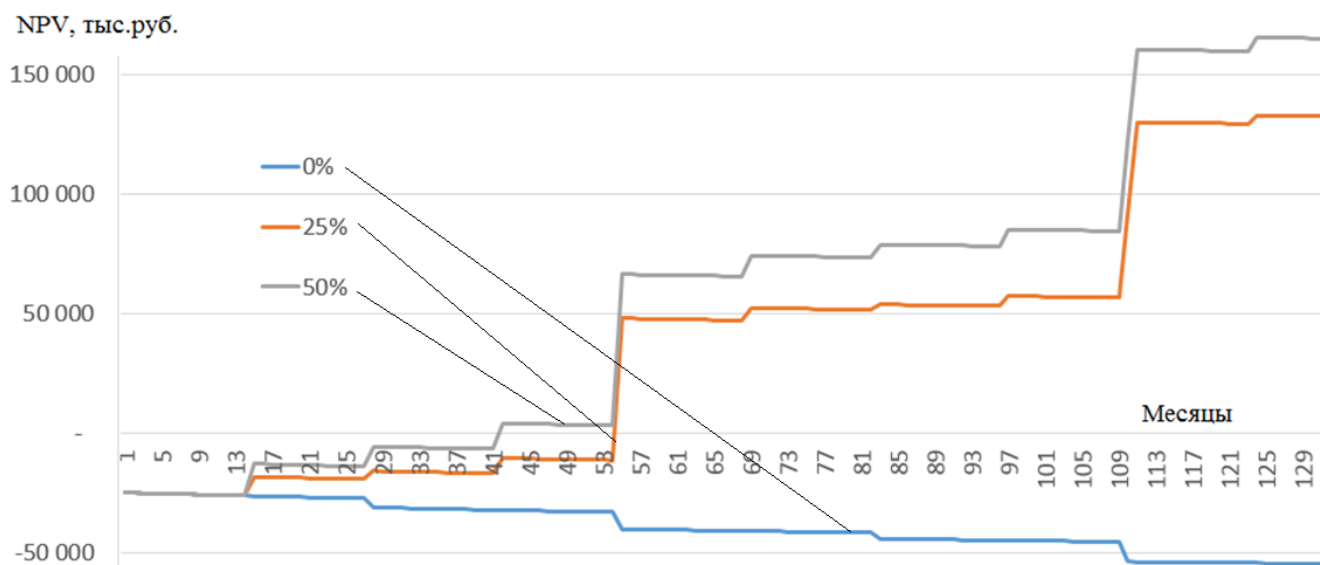


Рисунок 4.23 – Влияние сокращения числа отказов ТЭД на NPV АСТД ТЭД

4.5.6 Диагностика состояния профиля бандажей колёсных пар

В локомотивных депо рассматривается возможность внедрения автоматизированных систем контроля профиля бандажей колёсных пар (КП). Расчёты показали нецелесообразность внедрения этой АСТД. В данном случае АСТД сравнивается не с нулевым вариантом (нет ничего), а с существующей системой ручного замера бандажей: фонд заработной платы не изменяется. Исходные данные приведены в таблице 4.9. Результаты моделирования – на рисунке 4.24: АСТД профиля бандажа колёсных пар локомотивов себя не окупает.

Таблица 4.9 – Данные для моделирования NPV АСТД КП

ТОиР	Пробег, тыс.км	Простой, час	Диагностика, мин	Сокращение простоя, %	Экономия, тыс.руб.
ТО-1	0,4	0,20	0	0%	0
ТО-2	2,4	1,67	0	0%	0
ТО-3	0	0,00	0	0%	0
ТО-4	300	16,03	10	3%	0
ТР-1	30	40,75	10	3%	0
ТР-2	300	68,98	0	0%	0
ТР-3	600	118,83	0	0%	0
СР	1200	204,12	0	0%	0
КР	2400	204,12	0	0%	0
НР	400	16,07	10	0%	0

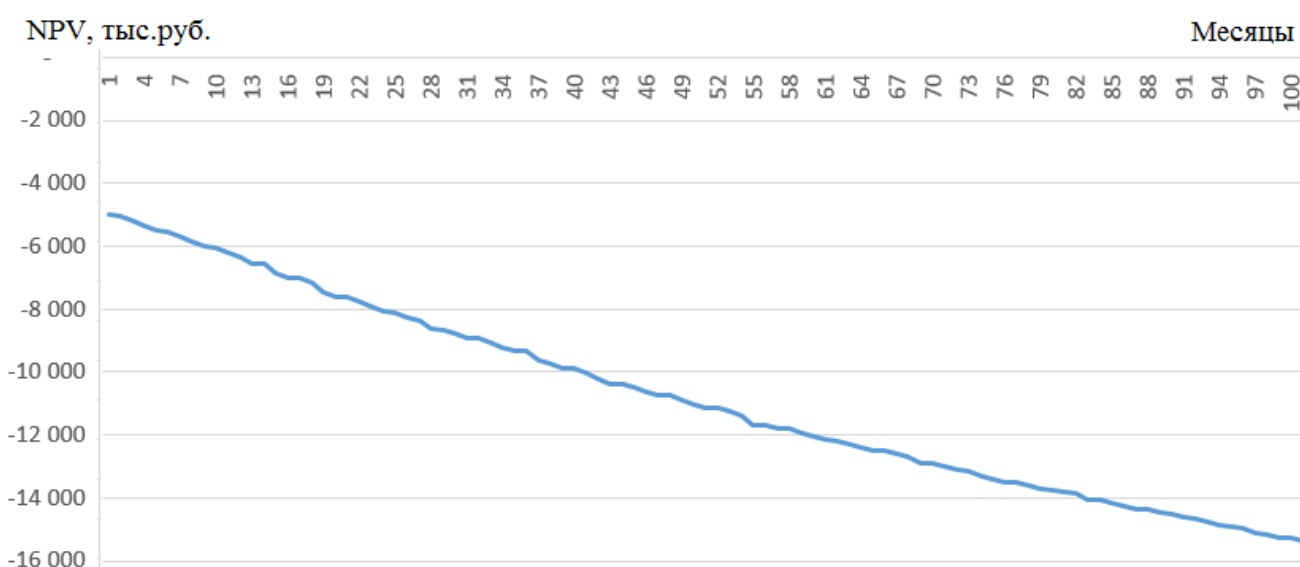


Рисунок 4.24 – Результаты расчёта NPV для АСТД профиля бандажей КП пар

4.5.7 Системы диагностирования отдельных видов оборудования

В НИИТКД разработан комплект диагностических систем «Доктор» [191], позволяющий диагностировать практически все виды оборудования локомотивов. Моделирование показало, что эффективность их применения существенно зависит от наличия сокращения неплановых ремонтов. В качестве примера рассмотрен переносной прибор «Доктор» для диагностирования электрических аппаратов локомотива, которые составляют существенную долю в общем числе отказов локомотива, хотя стоимость восстановления работоспособности достаточно низкая. На рисунке 4.18 показаны результаты моделирования. При большом потоке отказов (2,5 отказа на 1 млн км) и 50-процентом их сокращении система диагностирования электрических аппаратов себя окупает за 32 месяца. При уменьшении процента снижения отказов срок окупаемости растёт, а при определённом значении (10 % на рисунке 4.25) система становится не окупаемой.

NPV, тыс.руб.

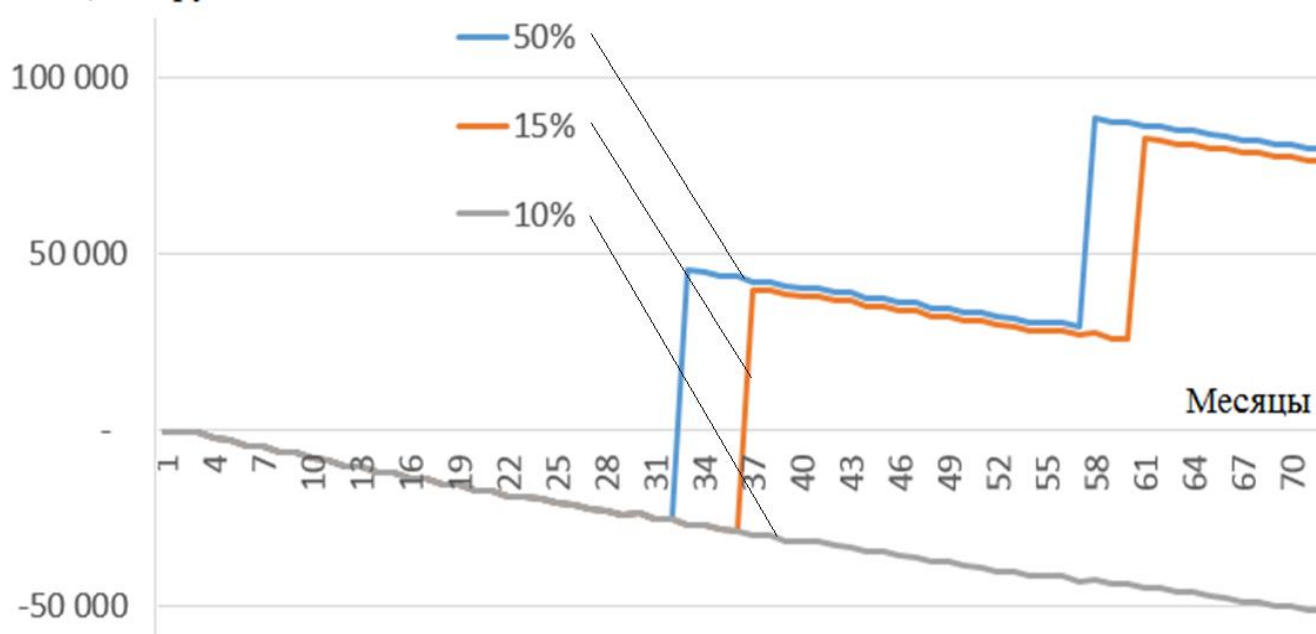


Рисунок 4.25 – Результаты расчёта NPV для АСТД «Доктор» при различных процентах сокращения отказов

Таким образом, эффективность применения АСТД для различных видов оборудования локомотивов надо проверять индивидуально с учётом имеющего место потока отказов, ожидаемого их сокращения и стоимости восстановления.

4.6 ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ

В диссертации по разработанным методам и методике выполнен анализ влияния интенсивности отказов λ (отказов на 1 млн км пробега) на окупаемость различных АСТД. Для этого расчёт по предложенной программе (подраздел 4.4) последовательно выполнен для различных значений интенсивности λ со значения 0,1 с эмпирически подобранным шагом:

$$\lambda = \lambda + \lambda \cdot 0,2. \quad (4.27)$$

На рисунке 4.26 приведены результаты моделирования для бортовых систем при условии отсутствия эффекта на плановых ТОиР. Эффективность бортовых АСТД существенно зависит от интенсивности отказов: у МСУД при интенсивности отказов менее $\lambda < 6,6$ отк./млн км, у МПСУ при $\lambda < 9,5$ отк./млн км, у МСУ-ТП и МСУ-ТЭ при $\lambda < 3,8$ отк./млн км и у АПК «Борт» при $\lambda < 3,8$ отк./млн км окупаемость за 11 лет наблюдения не наступает.

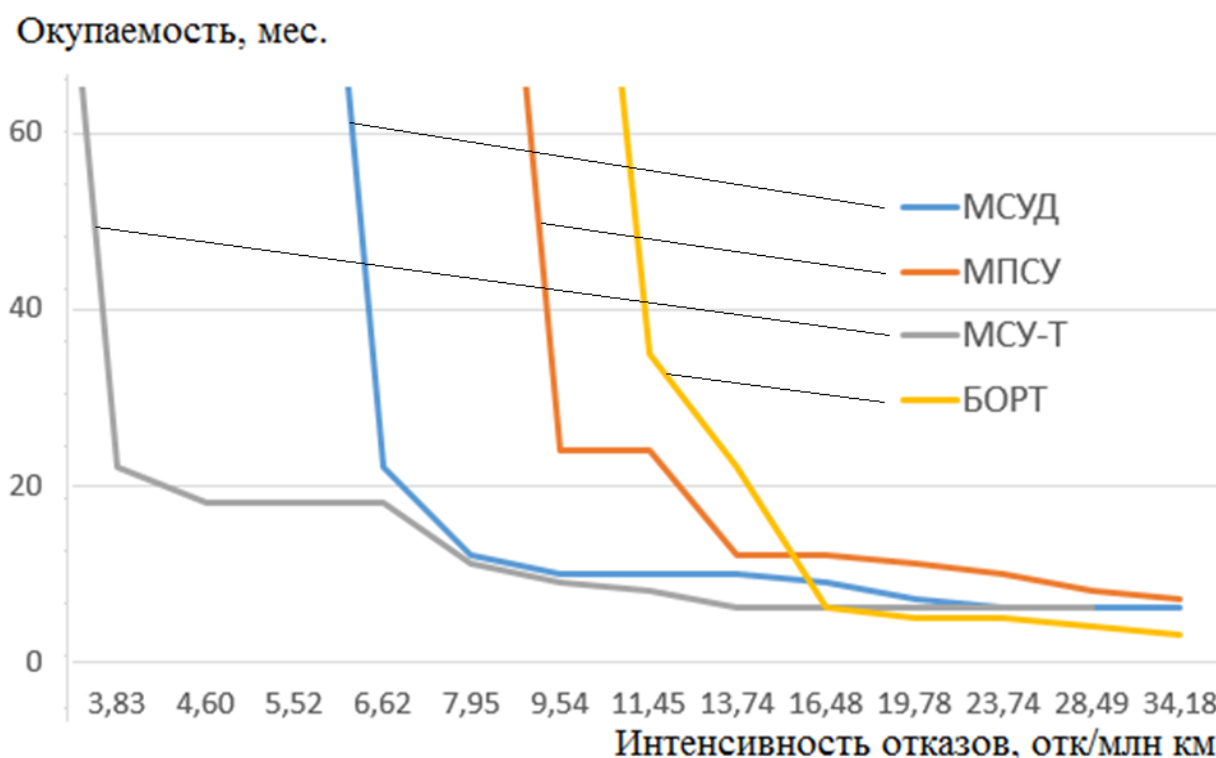


Рисунок 4.26 – Влияние интенсивности отказов на эффективность бортовых АСТД на базе МСУ

На рисунке 4.27 приведены зависимости окупаемости стационарных АСТД в зависимости от интенсивности отказов при условии отсутствия эффекта на плановых ТОиР. Окупаемость АСТД также наступает при низкой надёжности – высокой интенсивности отказов.

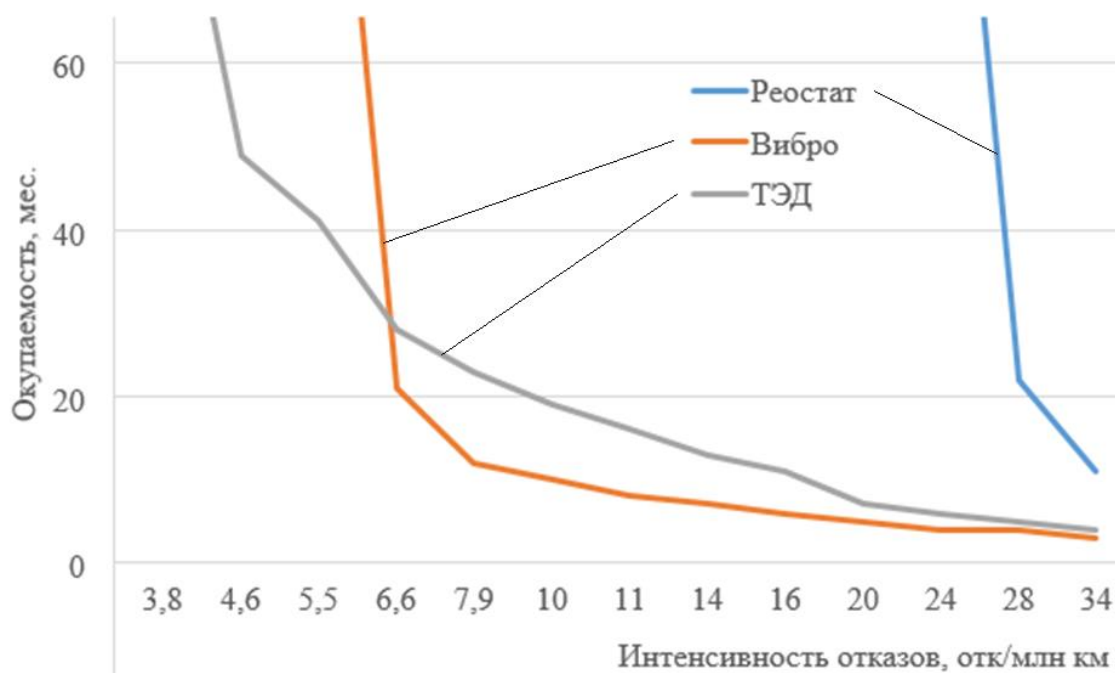


Рисунок 4.27 – Влияние интенсивности отказов на эффективность АСТД

Таким образом, АСТД эффективны при низкой надёжности оборудования. Верно и обратное утверждение: изготовление надёжных локомотивов снижает потребность в применении АСТД.

Примечание: изменение эффекта происходит скачками, т.к. основной эффект достигается от сокращения эксплуатируемого парка в штуках.

На рисунке 4.218 приведены результаты моделирования влияния процента сокращения простоя на ТР-1 (для тепловозов – и на ТО-3) на окупаемость бортовых АСТД. На рисунке 4.29 – аналогично для стационарных АСТД.

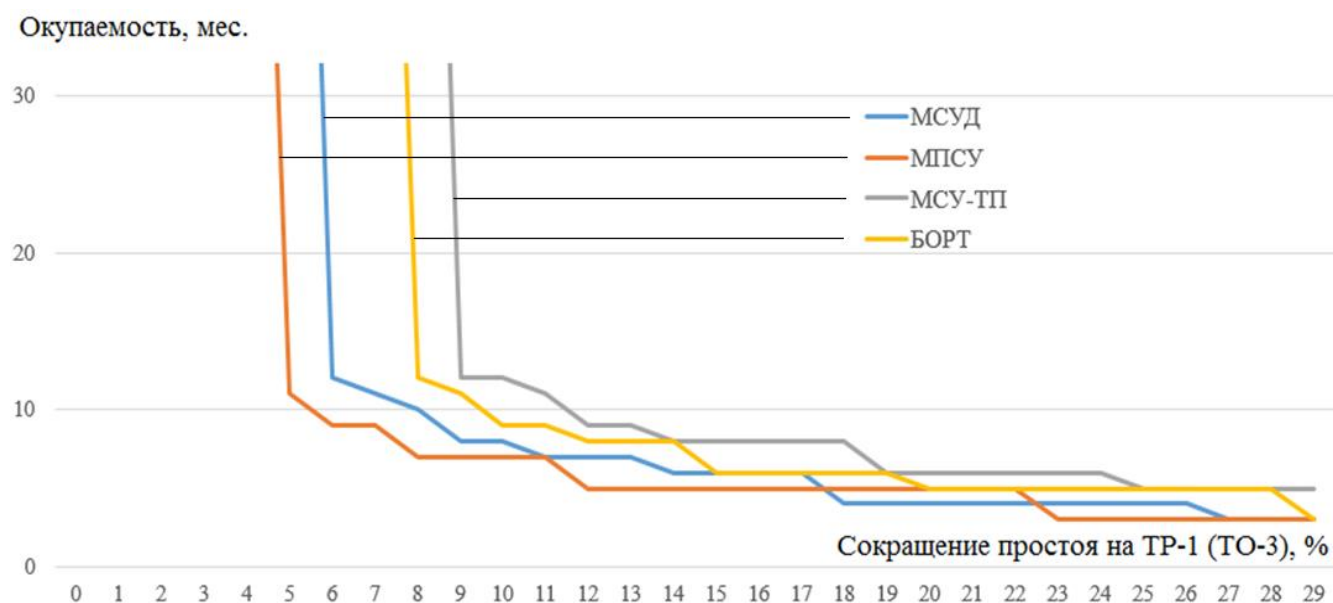


Рисунок 4.28 – Влияние сокращения простоя на ТР-1 на эффективность применения бортовых АСТД на базе МСУ

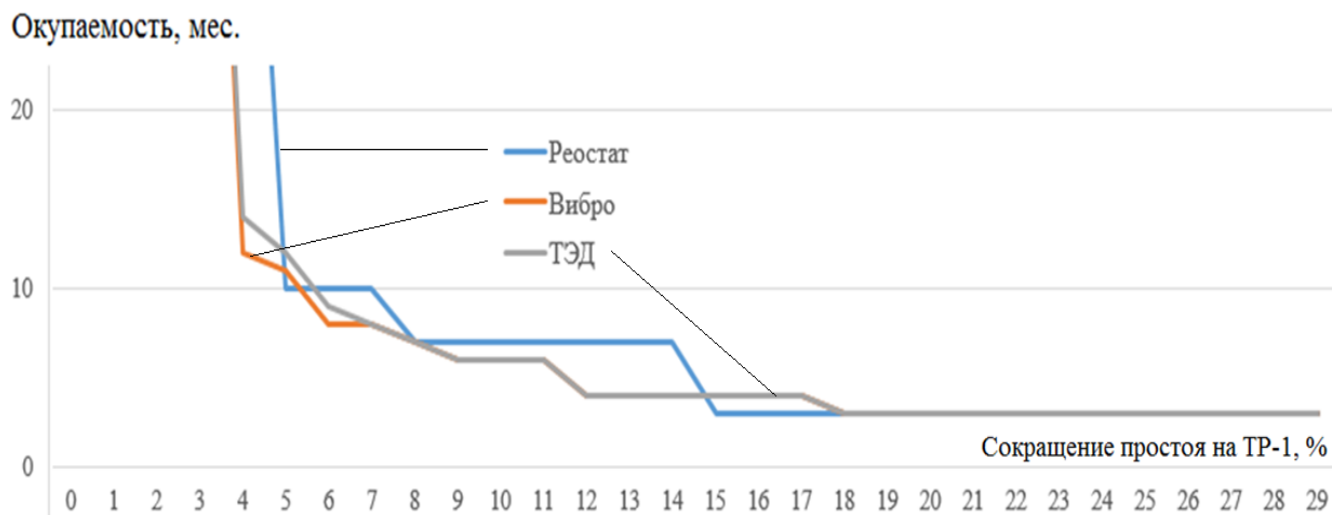


Рисунок 4.29 – Влияние сокращения простоя на ТР-1 на эффективность применения стационарных АСТД

Окупаемость бортовых АСТД наступает при 5 – 10 процентном сокращении времени простоя на ТР-1 (ТО-3) при условии отсутствия сокращения отказов. У стационарных – аналогичный показатель: 4 – 5 месяцев.

На рисунке 4.30 приведены результаты моделирования влияния среднесуточного пробега на эффективность АСТД: окупаемость диагностики существенно зависит от среднесуточного пробега.

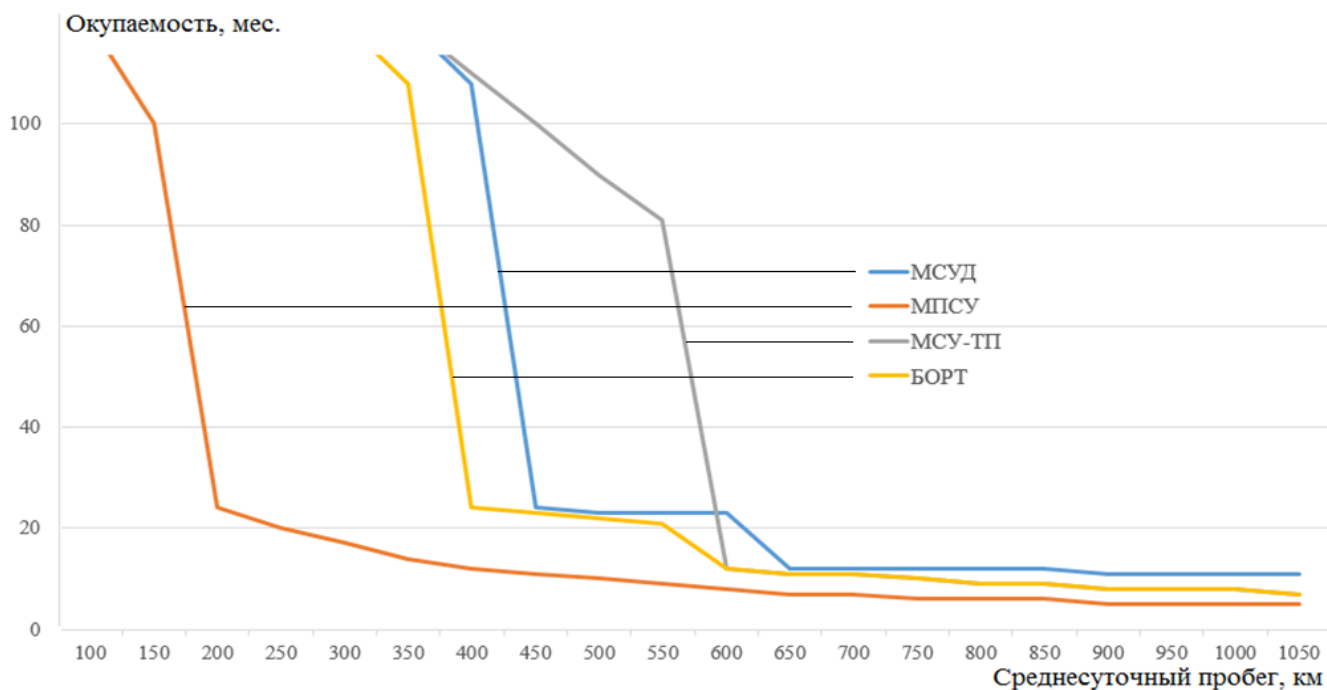


Рисунок 4.30 – Влияние среднесуточного пробега на эффективность АСТД

Таким образом, при моделировании с целью определения эффективности АСТД необходимо точно определиться с параметрами эксплуатации АСТД, т.к. от их правильного задания существенно зависит результат моделирования. Главным

видом эффекта при внедрении АСТД является сокращение эксплуатируемого парка локомотивов (таблица 4.10) за счёт сокращения объёма плановых и неплановых ТОиР (таблицы 4.11 и 4.12).

Таблица 4.10 – Процент сокращения парка локомотивов при применении АСТД

АСТД	Серия локомотива	Сокращение парка, %
Бортовая АСТД на базе МСУД (МСУД)	ЭС5К	2,8 %
Бортовая АСТД на базе МПСУ (МПСУ)	ЭС5К	2,8 %
Бортовая АСТД на базе МСУ-ТП (МСУ-ТП)	2ТЭ25КМ	3,3 %
Бортовая АСТД на базе АПК «Борт»	2ТЭ25КМ, 2ТЭ116У, ТЭ10МК	1,0 %
Станция реостатных испытаний (Реостат)		12,5 %
Вибродиагностирование КМБ (Вибро)	ЭС5К	3,0 %
Стенд испытаний ТЭД (ТЭД)	ЭС5К	0,5 %
Система замера профиля бандажа колёсных пар (КП)	ЭС5К	0,0 %
Доктор	ЭС5К	0,7 %

Таблица 4.11 – Процент от общего эффекта от сокращения времени простоя на ТОиР при применении АСТД [368]

АСТД	ТО-1	ТО-2	ТО-3	ТО-4	ТР-1	ТР-2	ТР-3	СР	КР	НР
МСУД	16,6 %	23,1 %			44,8 %					15,5 %
МПСУ	20,3 %	16,9 %			49,4 %					13,4 %
МСУ-ТП	19,6 %	5,7 %	34,4 %		1,3 %					39,0 %
АПК «Борт»			67,9 %		2,5 %					29,6 %
Реостат			48,4 %		21,6 %	11,6 %	7,8 %	2,1 %		8,6 %
Вибро					65,9 %					34,1 %
ТЭД							26,3 %	22,5 %	11,3 %	39,9 %
КП				3,6 %	96,4 %					

Таблица 4.12 – NPV АСТД на одно депо с парком 200 – 300 локомотивов

АСТД	Срок окупаемости, мес.	Срок окупаемости, лет	NPV за 3 года, млн руб.	NPV за 6 лет, млн руб.
МСУД	8	0,67	141	251
МПСУ	10	0,83	150	266
МСУ-ТП	10	0,83	162	357
Реостат	3	0,25	1 144	2 020
Вибро	11	0,91	251	385
ТЭД	14	1,17	6	75
КП	-	-	-10	-13
Доктор	32	2,67	43	80

4.7 ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 4

- 1 Практически для каждого вида оборудования локомотива имеется техническое решение её автоматизированной системы технического диагностирования (АСТД) [271], однако практическое применение АСТД по каждому виду оборудования требует технико-экономического обоснования (ТЭО), т.к. внедрение комплекса АСТД локомотива окупается более 20 лет.
- 2 При выборе типа АСТД предпочтение следует отдавать бортовым и встроенным системам. В случае их нецелесообразности – переносным и стационарным. Выбор типа АСТД по каждому виду оборудования следует осуществлять согласно ТЭО.
- 3 Разработан метод оценки технико-экономической целесообразности внедрения различных видов АСТД, разработана соответствующая методика и программное обеспечение на алгоритмическом языке VBA в среде MS Excel для расчёта окупаемости АСТД по показателю NPV. Произведено моделирование окупаемости основных видов АСТД с факторным анализом влияния различных параметров (размер парка, среднесуточный пробег, интенсивность отказов, сокращения числа отказов и др.).
- 4 Моделирование показало, что экономически целесообразно применение следующих видов АСТД:
 - бортовая АСТД на базе штатных микропроцессорных систем управления;
 - специализированные бортовые АСТД диагностирования дизель-генераторных установок для тепловозов без МСУ;
 - станции реостатных испытаний дизель-генераторных установок тепловозов;
 - вибродиагностирование колёсно-моторных блоков (КМБ);
 - диагностирование и испытание тиристоров ВИП;
 - переносные системы диагностирования электрического оборудования.
- 5 Моделирование показало отсутствие экономического эффекта от внедрения ряда АСТД, в т.ч. автоматической проверки профиля бандажа.
- 6 Существенное влияние на эффективность АСТД оказывает сокращение времени ремонта, особенно неплановых. Относительно низкое влияние оказывает стоимость восстановления работоспособности и начальная стоимость АСТД.

5 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ВЫДАЧИ ЛОКОМОТИВОВ ПОСЛЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ

5.1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В разделе 1 на основании литературного обзора показано, что всеобщей тенденцией является переход на систему ремонта с использованием предварительно полученных диагностических данных (прежде всего – от встроенных и бортовых систем): планово-предупредительная система ремонтов дополняется предиктивным ремонтом. В разделе 2 показано на основании вероятностно-статистического анализа надёжности отечественных локомотивов, что задача актуальна для ОАО «РЖД». В разделе 3 доказано, что существующих бортовых систем диагностирования недостаточно: необходимо применение депокских стационарных и переносных автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД). В разделе 4 обоснована технико-экономическая целесообразность применения АСТД на этапе эксплуатации и ТОиР жизненного цикла локомотивов. Но переход на ТОиР с использованием АСТД имеет одно важное последствие: время выдачи локомотива после ТОиР нельзя нормировать заранее: составление индивидуального сетевого графика ремонта с учётом индивидуальных особенностей технического состояния оборудования локомотива требует разработки метода прогнозирования времени выдачи локомотива на линию [368, 374], т.к. локомотивы, поставленные на депокской ремонт (ТР-1, ТР-2, ТР-3), заранее планируются под поезда. Решение задачи определения времени окончания ремонта предлагается через имитационное моделирование в режиме online – «Цифровой двойник производства».

«Цифровые двойники» [21, 128, 150, 277] – это динамическая симуляция изделий, процессов их изготовления и эксплуатации, «виртуальная реплика реального физического актива в форме интегрированной мультимедийной системы симуляции, которая отражает жизненный цикл и реальные условия эксплуатации актива» [278].

При конструировании автомобилей необходимо провести ряд дорогостоящих crash-тестов с целью определения прочности конструкции при аварийном столкновении, наличие опасности для жизни человека. В настоящее время

физические испытания производят после многочисленного моделирования аварии на компьютере. Аналогично на цифровых двойниках производится испытание всех сложных узлов, прежде всего – самолётов и ракет. При проектировании механического оборудования локомотивов обязательно производится моделирование нагрузки узлов на цифровых двойниках с использованием метода конечных элементов (МКЭ) [9]. Цифровой двойник позволяет существенно сократить сроки разработки новых изделий, повысить их надёжность и долговечность, избежать отказов при эксплуатации [278].

Другой пример цифрового двойника – это моделирование поездной обстановки на полигоне для управления движением поездов. Этот цифровой двойник используется не только при разработке графиков движения поездов, но и в режиме online для оперативного диспетчерского управления движением поездов, особенно при возникновении нестандартных ситуаций [5, 11, 123], например, ремонт пути. Применение цифровых двойников перевозочного процесса позволяет существенно повысить пропускную способность участков, избежать сбоев движения из-за человеческого фактора [278].

Цифровые двойники широко используются при организации производственных процессов. Разработаны специальные программы для моделирования [359]. Цифровой двойник позволяет предварительно смоделировать производственные процессы, выбрать оптимальный вариант расположения оборудования, заранее определить пропускную способность производственных линий. Причём моделирование можно проводить как на этапе разработки производственных цехов, так и в процессе самого производства, например, при смене выпускаемой продукции [278].

Таким образом, технология «Цифровой двойник стала неотъемлемой частью программного набора проектировщиков, так и входит в повседневную жизнь оперативного персонала. Таким образом, одно из направлений повышения эффективности локомотивного комплекса в целом и его локомотиворемонтной составляющей – это создание цифровых двойников выпускаемых изделий (локомотивов и локомотивного оборудования), производственных процессов (локомотивостроительных и локомотиворемонтных заводов, сервисных локомотивных депо) и многое другое [278].

Анализ литературных источников показал, что наиболее распространенное применение цифрового двойника на производстве – это оптимизация последовательности производственных процессов [322]. Применительно к жизненному циклу локомотива – это реализация принципа постоянного улучшения по циклу PDCA Эдварда Деминга [15, 101, 177, 351] с целью повышения надёжности локомотива [182, 183], снижения стоимости жизненного цикла локомотивов, сокращения времени простоя на ТОиР [271] в СЛД (рисунок 5.1): на основании статистических данных ТОиР (в ЛокоТех – это АСУ ТОиР «Сетевой график») формируются данные для Цифрового двойника ТОиР. На основании этого моделирования определяются недостатки системы тяги с точки зрения обеспечения надёжной эксплуатации локомотива. В результате принимаются корректирующие мероприятия для улучшения качества управления жизненным циклом локомотива. Функция цифрового двойника, связанная с управлением циклом постоянного улучшения, в настоящем труде не рассматривается, т.к. работа посвящена этапу эксплуатации и ТОиР жизненного цикла локомотивов.

Система ТОиР локомотивов построена таким образом, что ещё при постановке на ТОиР под локомотивы уже планируются конкретные поезда. Поэтому задержка ТОиР приводит к сбою движения поездов. Из-за этого при ТОиР строго следят за графиком выдачи локомотивов, даже, к сожалению, в ущерб качеству ТОиР. При комплексном использовании АСТД и индивидуальных графиках ремонта ситуация с определением времени выдачи локомотива после ТОиР ухудшается: задержка выдачи с ТОиР приводит к срыву графика движения поездов, а ранняя выдача с ТОиР – к непроизводительному простоя исправного локомотива. Поэтому одной из самых актуальных задач цифрового двойника является моделирование технологических процессов ТОиР с прогнозированием времени T выдачи локомотива с ТОиР и риски невыдачи локомотива в ожидаемое время [259].

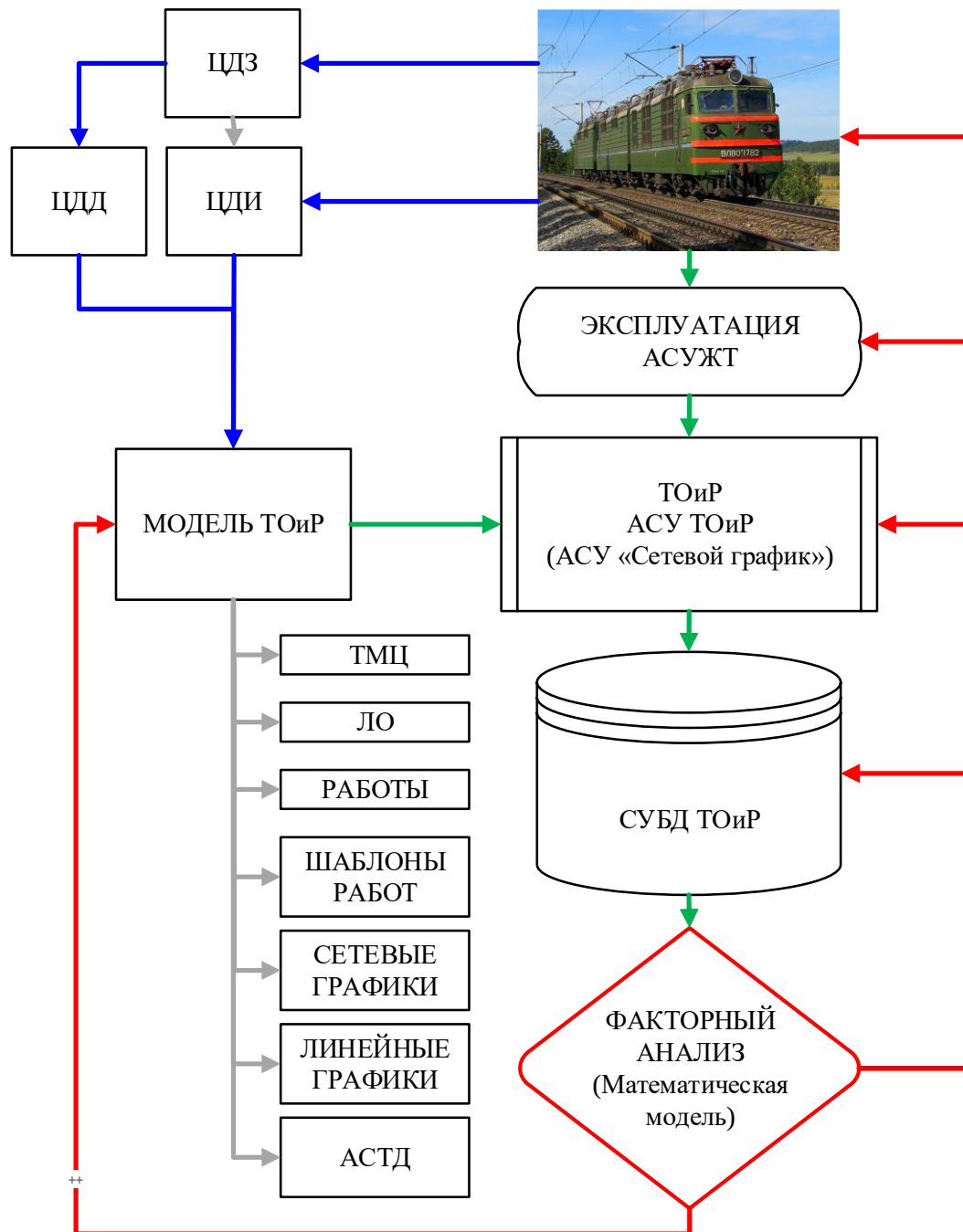


Рисунок 5.1 – Цифровой двойник в системе ТОиР локомотивов для реализации цикла постоянного улучшения PDCA [278]

В 85-и сервисных локомотивных депо (СЛД) группы компаний «ЛокоТех» внедрена автоматизированная система управления технологическими процессами технического обслуживания и ремонта (ТОиР) локомотивов АСУ «Сетевой график» (АСУ СГ) [1, 152, 161, 208, 209, 235, 278, 281]. АСУ обеспечивает декадное и трёхсуточное планирование постановки локомотивов на ТОиР, выявление и регистрацию замечаний по техническому состоянию локомотивов, планирование объёма и обеспечение ресурсами ремонта, собственно управление процессом ремонта. АСУ охватывает все основные этапы ТОиР и все элементы управления

СЛД: анализ работы локомотивов (по данным информационных систем ОАО «РЖД» – АСУЖТ [271]). АСУ СГ является очень важной частью системы автоматизированного управления жизненным циклом локомотива [298], затраты на который существенно превышают затраты на изготовление самого локомотива. Описание АСУ СГ приведено в первом разделе.

Таким образом, по технологии «Цифровой двойник ТОиР» следует моделировать процесс ТОиР с целью прогнозирования времени выдачи локомотива на линию (рисунок 5.2) [278].



Рисунок 5.2 – Место Цифрового двойника в системе оперативного управления ТОиР локомотивов [271, 278]

Далее предложена вероятностно-статистическая модель.

5.2 ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

При ТОиР локомотива диагностируется его техническое состояние (подраздел 5.1 и блок 1 на рисунке 5.3, после чего формируется посекционный линейный график ТОиР (блок 2), который включает функциональные модули из базы данных АСУ СГ (блок 3) с накоплением статистики времени выполнения операций (блок 5). По составленному сетевому графику (блок 2) и статистике продолжительности работ (блок 5) оперативно (в режиме online) формируется Цифровой двойник ТОиР (блок 4) [280, 281, 287].



Рисунок 5.3 – Алгоритм вероятностно-статистического моделирования ТОиР

Имитационная модель ТОиР (цифровой двойник) использует оперативно составленный линейный график (блок 6) с целью вероятностно-статистического расчёта продолжительности ТОиР. При этом используются методы имитационного моделирования, для чего запускается «генератор случайных чисел» (Randomize), позволяющий по заранее определенным параметрам законов распределения случайных времён выполнения каждой из операций ТОиР смоделировать процесс ремонта. Многократное моделирование (более 1000 раз) процесса ремонта с

использованием цифрового двойника позволяет получить вероятностное распределение ожидаемого времени ремонта [280, 278].

Если полученные в результате данные (блок 6) устраивают (блок 7), то приступают к ремонту. Иначе производят при возможности корректировку линейного графика: перераспределение или привлечение новых трудовых, инструментальных, энергетических ресурсов, применение обходных решений и др. Производится повторное моделирование. Возможна и корректировка графика подвязки локомотивов (блок 8) [281].

Технологический процесс ТОиР состоит из последовательности функциональных блоков F_i , каждый из которых обладает своими вероятностными характеристиками времени выполнения операции ΔT_i . Эксплуатация АСУ ТОиР позволяет накопить исходные статистические данные, обработка которых определяет закон распределения этой случайной величины и его параметры. В модели рассмотрены следующие законы распределения [25, 26, 34, 278].

1. **Дискретное значение** времени выполнения операции: время выполнения операции постоянно.

$$\Delta T_1 = const. \quad (5.1)$$

На практике такое распределение встречается редко, т.к. всегда имеет место вероятность отклонения от заданного времени выполнения операции. В цифровом двойнике используется при отсутствии статистики реальной продолжительности операции или при несоизмеримо малом среднеквадратичном отклонении σ для ускорения моделирования.

2. **Нормальное распределение времени $f(x)$ выполнения операции** [77, 280]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma_x^2}\right), \quad (5.2)$$

где: x – случайное значение времени выполнения операции Δt ;

m_x – математическое ожидание времени выполнения операции:

$$m_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (5.3)$$

σ_x – среднеквадратичное отклонение времени выполнения операции:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2}. \quad (5.4)$$

Этот тип распределения будет рассматриваться в качестве основного.

3. Экспоненциальное распределение времени выполнения операции [77, 280]:

$$f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda t), \quad (5.5)$$

где λ – интенсивность: $\lambda = 1/m_x$.

Этот тип распределения также является достаточно распространенным.

4. Логнормальное распределение времени выполнения операции:

распределение времени выполнения операции подчиняется логнормальному закону распределения случайной величины:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{\left(\ln\left(\frac{t}{m}\right)\right)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (5.6)$$

где:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln x_i, \quad (5.7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln x_i - \mu)^2}, \quad (5.8)$$

$$m = \exp\left(\mu - \frac{\sigma^2}{N}\right). \quad (5.9)$$

При моделировании времени Δt_i выполнения операции i используется генератор случайных чисел VBA с его инициализацией командой **Randomize** [39, 373, 280]. Случайное число R вычисляется командой **Rnd**:

$$R_i = \text{Rnd}, \text{ где } R \in [0, 1]. \quad (5.10)$$

Нормальное распределение: событие R_2 рассчитывается по формуле:

$$R_2 = \sum_{k=1}^{12} R_k - 6. \quad (5.11)$$

Время операции ΔT_2 будет:

$$\Delta T_2 = M + S \cdot R_2. \quad (5.12)$$

где: M – математическое ожидание времени операции;

S – среднеквадратическое отклонение времени операции.

Экспоненциальное (показательное) распределение можно смоделировать с использованием обратной функции [280, 287]:

$$R_3 = -(1/\lambda) \cdot \ln(1 - R_i). \quad (5.13)$$

Логнормальное распределение можно смоделировать с использованием обратной функции. Моделирование значений случайной величины с логнормальным распределением (с параметрами μ , σ) проводится по формуле $X = \text{Exp}(Y)$, где Y имеет нормальное распределение с теми же параметрами [280, 287].

Выше описано моделирование работы функционального модуля в штатном режиме, подчиняющемся одному из возможных законов распределения случайной величины. Но при этом возможно появление форс-мажорных обстоятельств: отсутствие запасных частей, отсутствие маневрового локомотива, невыход слесаря на работу и др. Форс-мажорные обстоятельства J могут появляться случайным образом с вероятностью P_J , которая также определяется из статистики работы депо [280, 287]:

$$P_J = N_F / N_\Sigma, \quad (5.14)$$

где: N_F - число операций, при которых произошёл форс-мажор;

N_Σ - общее число выполнения операции за рассматриваемый период.

Устранение форс-мажора также подчиняется одному из возможных законов распределения случайной величины, описанных выше. Таким образом, для задания в модели возможного форс-мажора J следует указать вероятность его появления P_J , закон распределения времени его устранения Z и параметры этого закона [280, 287].

В модели предусмотрено появление любого числа форс-мажорных обстоятельств, по каждому из которых происходит моделирование. В программе предусмотрено до 12-и форс-мажоров. После моделирования выбирается максимальное время устранения форс-мажора. Алгоритм моделирования функционального элемента показан на рисунке 5.4 (function *Zakon*). Запускается генератор случайных чисел *Random* (блок 2) для генерации случайных чисел $R_i = \text{Rnd}$. Использование случайных чисел зависит от выбранного закона

распределения случайной величины (блоки 3 – 4). Функция *Zakon* возвращает смоделированное случайное время выполнения очередной операции [280].

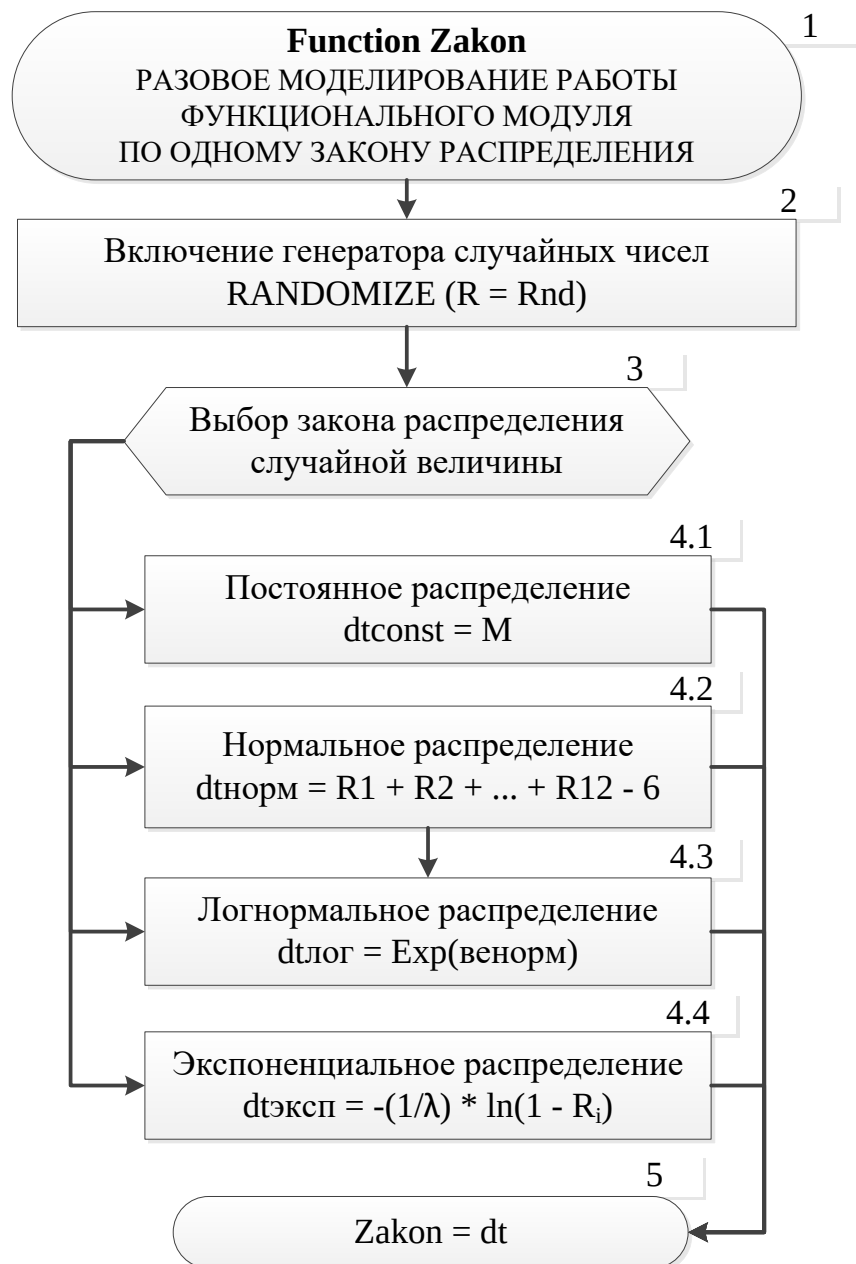


Рисунок 5.4 – Моделирование работы функционального элемента по одному закону распределения случайной величины

Полностью работа функционального модуля моделируется функцией FFF, учитывающей наличие форс-мажорных обстоятельств (рисунок 5.5). Вначале рассчитывается случайная продолжительность основного процесса Δt (блок 2), затем – каждого из заданных форс-мажорных обстоятельств Δt_i с выбором максимального времени $\Delta t_{\text{фм}} = \text{Max}(\Delta t_i)$ (блоки 3 – 5). Смоделированное время работы функционального элемента складывается из двух $\Delta t = \Delta t + \Delta t_{\text{фм}}$ [280].

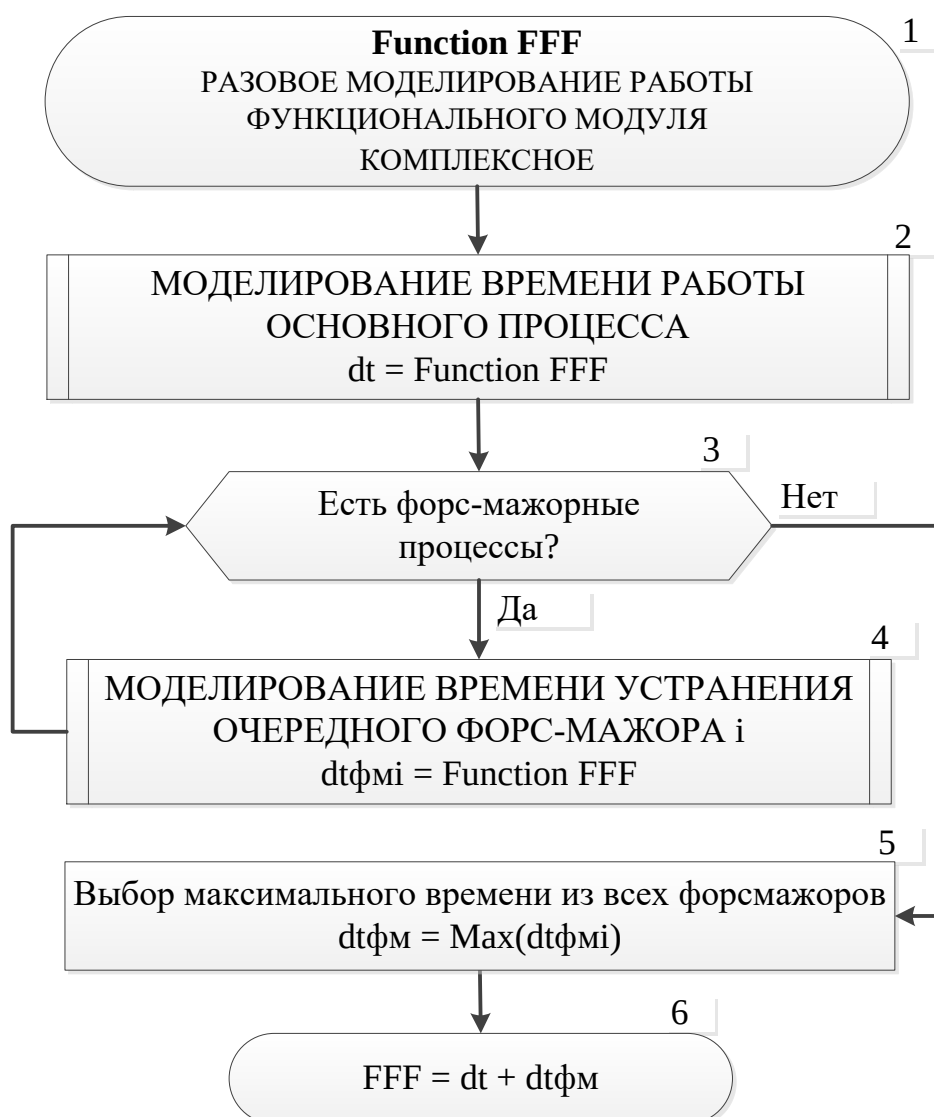


Рисунок 5.5 – Моделирование работы функционального элемента с учётом возможных форс-мажорных обстоятельств

Алгоритм математического моделирования ТОиР в целом приведён на рисунке 5.6. После считывания параметров Цифрового двойника и числа заданных итераций $N_{MAX} > 20$ (блок 2) программа последовательно N_{MAX} раз (блоки 3 – 8) моделирует работу цифрового двойника (блоки 5 – 8) с расчётом N_{MAX} раз случайного времени выполнения ТОиР T_N . В результате формируется база данных о N_{MAX} случайных временах выполнения ТОиР T_N [280, 287].

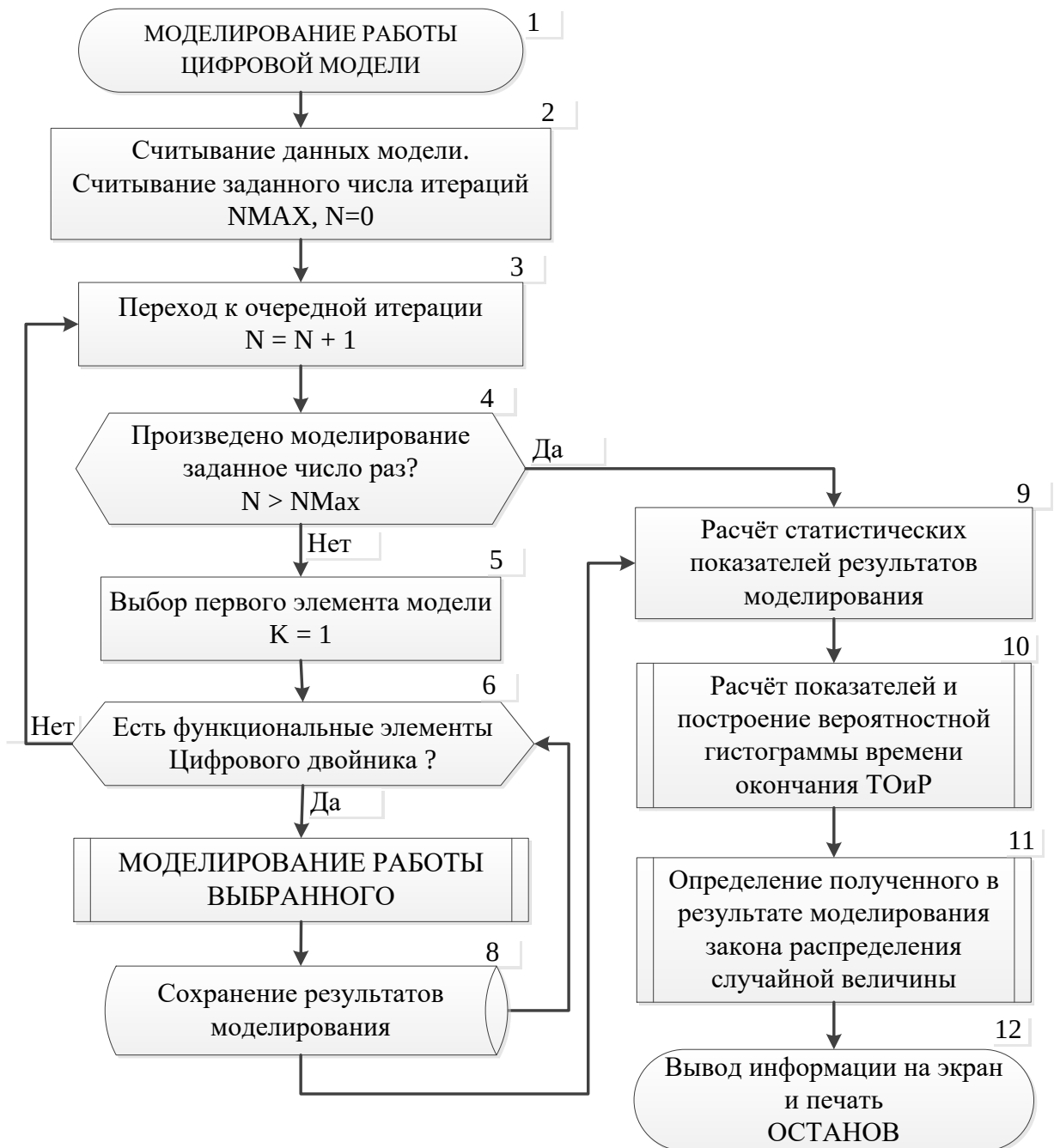


Рисунок 5.6 – Моделирование с использованием цифрового двойника ТОиР

По результатам моделирования в объёме N_{MAX} производится статистическая обработка массива данных времён выполнения ТОиР T_N , где $N \in [1, N_{max}]$ с определением математического ожидания времени ТОиР T_{cp} , среднеквадратичного отклонения σ (СКО), минимального T_{min} и T_{max} максимального значений времени выполнения ТОиР из N_{MAX} итераций моделирования (блок 10) [280, 287, 281].

$$T_{cp} = \sum_{n=1}^{N_{max}} T_n / N_{max} . \quad (5.15)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_{max}-1} \sum_{n=1}^{N_{max}} (T_n - T_{cp})^2} . \quad (5.16)$$

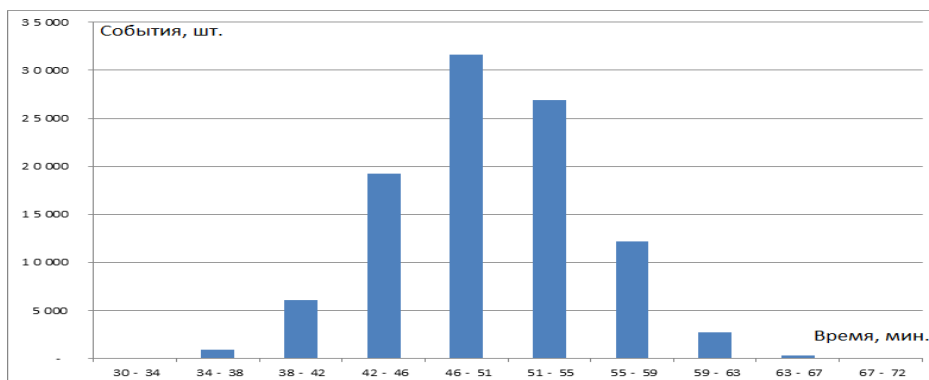
Далее строится гистограмма распределения времени работы цифровой модели, для чего диапазон от T_{min} до T_{max} разбивается на заданное число участков K (по умолчанию $K = 10$) с шагом $\Delta N = (T_{max} - T_{min})/K$. Рассчитывается число попаданий N_K в каждый из участков. В результате вероятность P_K того, что время выполнения операции за время T_K будет соответствовать периоду K будет [281]

$$P_K = N_K / N_{MAX}. \quad (5.17)$$

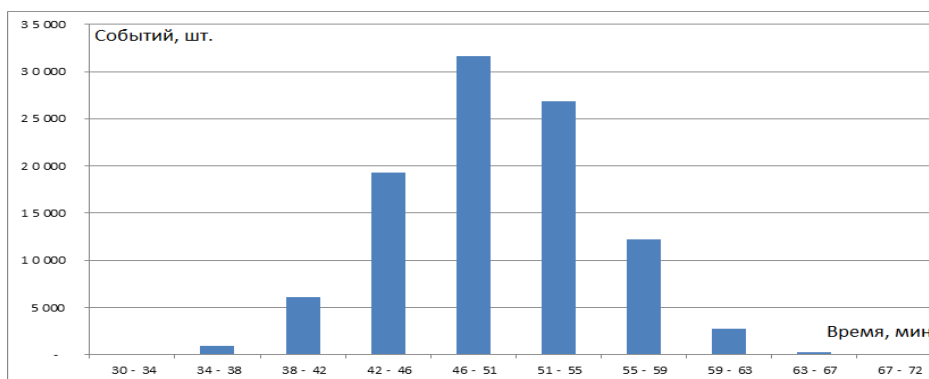
Вероятность $P_{<K}$ выполнения ремонта за время $< T_K$ составит [280]:

$$P_{<K} = \sum_{k=1}^K P_k. \quad (5.18)$$

По итогам моделирования полученная гистограмма распределения ожидаемого времени выполнения проверяется на унимодальность через соответствие одному из возможных законов распределения случайной величины. Предлагается проверку произвести двумя способами: по критерию согласия Пирсона и по критерию Колмогорова-Смирнова, принцип работы с которыми описан в разделе 2. На рисунке 5.7 приведены примеры моделирования работы элементов с автоматическим расчётом вероятности соответствия закону распределения случайной величины.



а - $N_{MAX} = 10000, P = 0,95$



б - $N_{MAX} = 100000, P = 0,95$

Рисунок 5.7 – Смоделированный нормальный закон при $M = 50, \sigma = 5$ с заданным числом циклом N_{MAX} и полученной в результате расчёта вероятностью P соответствия закону

5.3 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ

Моделирование цифрового двойника ТОиР выполнено в среде Excel с использованием встроенного языка Visual BASIC for Applications (VBA) [373]. Для записи исходных данных модели создаётся лист с именем *Name*, а для записи результатов моделирования – лист *Name_R*. Число таких пар листов соответствует числу моделей [280, 287, 281]. Стартовать программу моделирования следует из нужного окна с именем *Name*.

Функциональные элементы, моделирование которых описано в предыдущем подразделе, складываются в линейный график. На рисунке 5.8 приведён пример цифрового двойника сетевого графика, состоящий из 10 функциональных элементов. Для моделирования работы такой модели следует задать законы распределения случайных величин каждого из функциональных элементов и взаимодействие блоков между собой [280, 281, 284, 285, 287, 290].

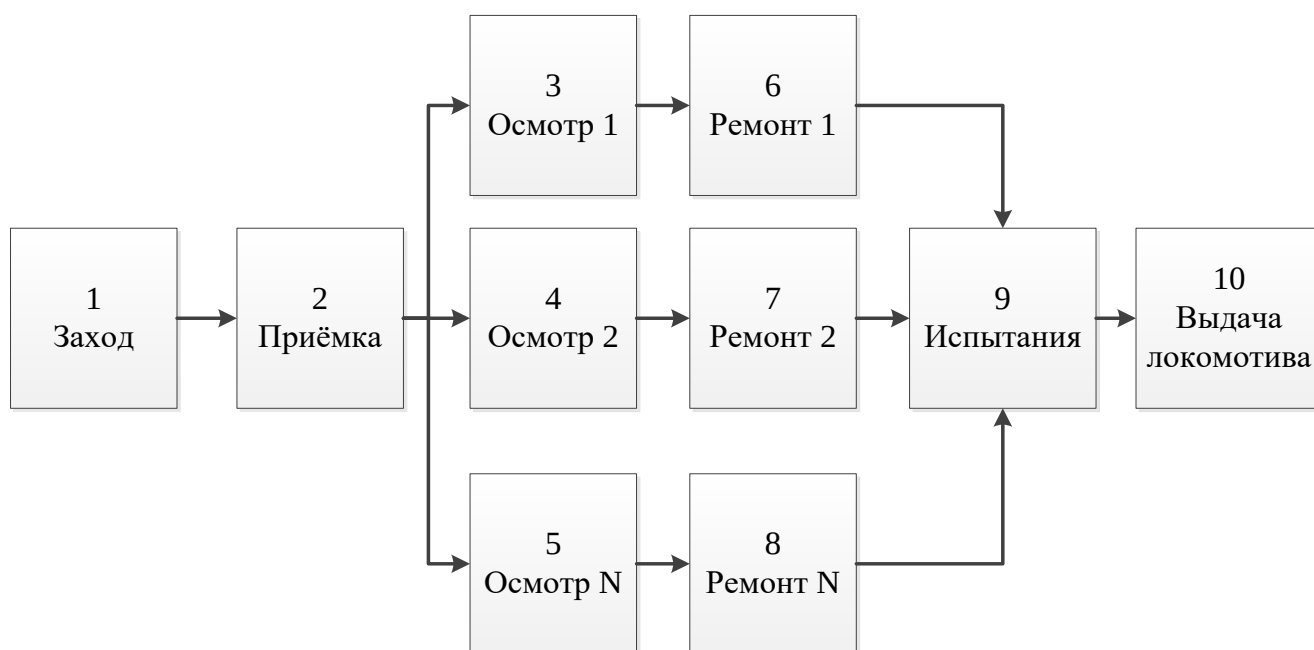


Рисунок 5.8 – Линейный график, состоящий из элементов с вероятностными характеристиками, рассчитанными по данным статистики (пример)

Каждая строка листа с именем *Name* соответствует одному функциональному элементу Линейного графика. Структура строки элемента приведена в таблицах 5.1 и 5.2. В столбце «№» указывается уникальный номер элемента (при моделировании отсутствие номера воспринимается как конец списка элементов. В столбце «Наименование» указывается название процесса. По рисунку 5.8, например,

функциональный элемент № 9 называется «Испытания». В столбцах «1» ... «12» указываются входы элемента. Например, у элемента № 9 таких входов 3. В столбце «@@@» указывается максимальное время из всех входов. В столбце « Δt , мин.» сохраняются результаты моделирования работы данного функционального элемента, а в столбце «Т, мин.» - суммарное время ремонта, начиная с первого элемента до данного.

Таблица 5.1 – Модель функционального элемента Линейного графика (первая часть таблицы функционального элемента)

		РЕЗУЛЬТАТ			ВХОДЫ								
№	Наименование	Δt, мин.	Т, мин.	@@@	1	2	3	4	5	6	7	8	9 ... 12

Таблица 5.2 – Модель функционального элемента Линейного графика (вторая часть таблицы функционального элемента)

ОСНОВНОЙ ПРОЦЕСС			ФОРС-МАЖОР 1					ФОРС-МАЖОР 2				
Z	M	σ	Название	P	Z	M	σ	Название	P	Z	M	σ

Далее в строке указываются вероятностные параметры распределения времени самого процесса и имеющих место форс-мажорных событий. Где P – вероятность возникновения форс-мажора, M – математическое ожидание времени события, σ – среднеквадратичное отклонение M , а Z – закон распределения случайной величины:

- 1 – Const;
- 2 – Нормальный закон;
- 3 – Экспоненциальный закон;
- 4 – Логнормальный закон.

Применительно к примеру по рисунку 5.8 описание модели приведено в таблице 5.3. А результаты моделирования – в таблице 5.4. Совокупность форс-мажоров и законы распределения задаются в модели один раз. При практическом применении модели параметры законов распределения постоянно уточняются по мере накопления статистики времени выполнения каждой из операций. Таким образом, модель является самообучающейся в части уточнения параметров распределения случайной величины – времени выполнения каждой операции [390].

Таблица 5.3 - Исходные данные модели цифрового двойника

№	Наименование	ОСНОВНОЙ ПРОЦЕСС			ФОРС-МАЖОР 1					ФОРС-МАЖОР 2					ФОРС-МАЖОР 3				
		Z	M	σ	Название	P	Z	M	σ	Название	P	Z	M	σ	Название	P	Z	M	σ
1	Заход локомотива в СЛД	3	10		Нет маневрового локомотива	0,1	3	30		Нет машиниста	0,01	3	15	5	Заняты пути	0,1	3	60	10
2	Приёмка локомотива на ТОиР	4	30	10	Нет представителя РЖД	0,1	3	20		Нет представителя ПДО	0,8	3	10						
3	Осмотр 1 Экипажная часть	2	25	5	Нет специалиста цеха	0,2	3	15											
4	Осмотр 2 ДГУ	2	30	5	Нет специалиста цеха	0,2	3	15											
5	Осмотр 3 Электрическая часть	2	35	4	Нет специалиста цеха	0,2	3	15											
6	Ремонт 1 Экипажная часть	4	500	30	Нет запасных частей	0,01	3	200		Отвлечение слесаря	0,2	4	20	5					
7	Ремонт 2 ДГУ	4	500	30	Нет запасных частей	0,02	3	300		Отвлечение слесаря	0,3	4	40	6					
8	Ремонт 3 Электрическая часть	4	500	30	Нет запасных частей	0,03	3	300		Отвлечение слесаря	0,4	4	15	4					
9	ИСПЫТАНИЯ	4	60	10	Занята станция	0,1	4	60	10	Устранение замечаний	0,5	4	20	3					
10	Выдача локомотива	3	10		Нет представителя РЖД	0,1	3	20		Нет представителя ПДО	0,8	3	10		Устранение замечаний	0,5	4	20	3

Таблица 5.4 – Результаты моделирования № 321 из 1000 заданных

[illegible]

Программа последовательно моделирует процесс ТОиР заданное число раз [371]. В примере по таблице 5.4 – это 1000 итераций. По результатам каждой итерации рассчитывается случайное время. Например, при моделировании 321-й раз (таблица 5.5) время ТОиР получилось равным 891-й минуте. А, например, функциональный блок № 5 «Осмотр 3. Электрическая часть» имел продолжительность 37 минут при математическом ожидании в 35 минут. Результаты расчётов (случайное время ТОиР) последовательно сохраняются на Листе «Name_R» [287, 280].

Таблица 5.5 – Результаты первых 15 из 1000 моделирований

№ п/п	Время, мин.
1	819,96
2	977,04
3	847,15
4	791,06
5	848,07
6	1069,25
7	859,93
8	890,69
9	1011,90
10	830,93
11	832,89
12	927,49
13	1025,69
14	910,59
15	904,631

По окончании моделирования (в рассматриваемом примере – это 1000 раз) рассчитываются математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение и другие параметры процесса (таблица 5.6) [287, 280].

Таблица 5.6 – Результаты 1000 моделирований

ПАРАМЕТРЫ	Результаты
Число данных	1000
Математическое ожидание	870,5
СКО	133,6
МИН	645,7
МАКС	2051,6

На заключительном этапе моделирования рассчитываются вероятностные параметры процесса и строится гистограмма (таблица 5.7 и рисунок 5.9). В верхней левой ячейке задаётся число столбцов гистограммы. В столбцах «MIN» и «MAX» указываются расчётные пределы диапазонов столбцов. В столбце «N» – число попаданий в диапазон ($\Sigma N = 1000$). В столбце «P» приводится вероятность попадания в этот диапазон, а в столбце « ΣP » – вероятность нарастающим итогом, что ремонт будет выполнен до этого времени. Например, вероятность того, что ремонт будет выполняться 14 часов будет 0,492, а вероятность того, что время ремонта не превысит 14 часов – 75 %. А вероятность того, что ремонт продлится более суток (24 часа) составит 0,6 % [280, 287, 283].

Таблица 5.7 – Вероятностные результаты моделирования при 1000 итераций

	MIN	MAX	Средние часы	N	P	ΣP
1	455	588,5	9	367	0,367	36,7 %
2	588,5	722	11	450	0,45	81,7 %
3	722	855,5	13	105	0,105	92,2 %
4	855,5	989	15	41	0,041	96,3 %
5	989	1122,5	18	14	0,014	97,7 %
6	1122,5	1256	20	12	0,012	98,9 %
7	1256	1389,5	22	02	0,002	99,1 %
8	1389,5	1523	24	04	0,004	99,5 %
9	1523	1656,5	26	03	0,003	99,8 %
10	1656,5	1790	29	02	0,002	100 %

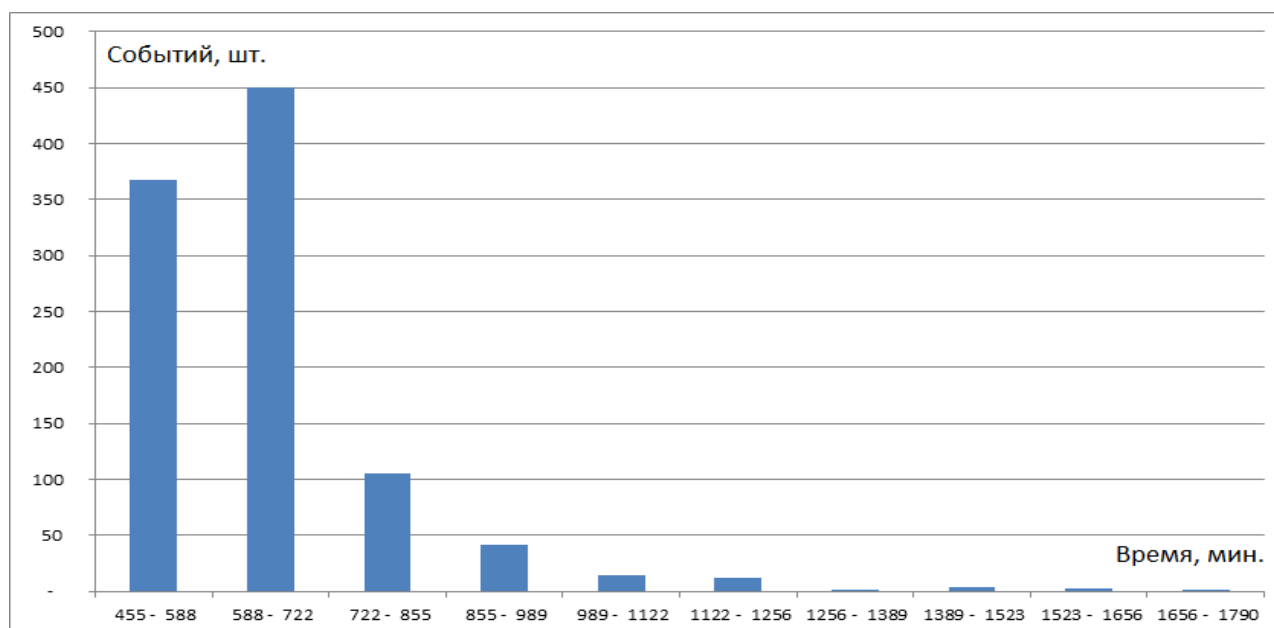


Рисунок 5.9 – Распределение ожидаемого времени выполнения ТОиР

В таблице 5.8 приведено соответствие результатов моделирования по рисунку 5.9 законам распределения случайной величины по критерию Колмогорова-Смирнова [278]. Наличие соответствия одному из возможных законов распределения случайной величины свидетельствует об унимодальности результатов моделирования, что повышает их достоверность и возможность использования на практике.

Таблица 5.8 – Вероятность соответствия примера законам распределения по критерию Колмогорова-Смирнова

Закон распределения	λ	Вероятность Р
Нормальный	3,344	0
Экспоненциальный	1,608	0,006
Логнормальный	0,403	0,964

Таким образом, по итогам моделирования (рисунок 5.9 и таблица 5.9) можно оценить, на сколько полученное распределение времени выполнения ТОиР соответствует ожиданиям и с какой вероятностью. Если результат не устраивает, то следует изменить сетевой график ремонта, использовать обходные решения, увеличить объём используемых ресурсов или принять другие меры для повышения вероятности выполнения ТОиР в заданный период времени.

5.4 АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК СИСТЕМЫ ОБСУЖИВАНИЯ

В предыдущих подразделах описана модель ТОиР, позволяющая по известным законам распределения случайной величины времени выполнения каждой операции и возможных форс-мажорных событий рассчитать вероятность выполнения ТОиР в заданные сроки. При практическом использовании модели могут возникнуть трудности при определении закона распределения случайной величины, особенно при проверке по критерию согласия. В этом случае возможен альтернативный подход, когда моделирование выполняется без определения закона распределения случайной величины с использованием гистограммы распределения, построенной по накопленной в базе данных статистике [280].

У каждого процесса заранее известно нормативное время его выполнения, которое условно можно принять за математическое ожидание $M(T_{cp})$. Также

примерно известен возможный разброс этого времени, который можно оценить по среднеквадратичному отклонению (СКО) по правилу шести сигм 6σ (для надёжности можно принять как 8σ). Тогда весь диапазон возможных времён выполнения операции можно разбить на N диапазонов (обычно $N = 10$), длительность каждого из которых Δt будет [280]:

$$\Delta t = ((M + 3\sigma) - (M - 3\sigma)) / N = 6\sigma / N. \quad (5.26)$$

Изначально в каждом из N диапазонов ΔN_i имеется ноль попаданий $\Delta N_i = 0$ (счётчики). Искусственно задаётся одно попадание в диапазон, соответствующий математическому ожиданию $\Delta N_M = 1$. Общее число статистических данных также равно 1: $Max = 1$ [280].

По мере эксплуатации АСУ СГ накапливается статистика фактического времени выполнения операции T_j . При попадании очередного значения в один из возможных диапазонов, его счётчик увеличивается на единицу [280]:

$$\Delta N_j = \Delta N_j + 1. \quad (5.27)$$

Также на единицу увеличивается и общее число статистических данных:

$$Max = Max + 1. \quad (5.28)$$

В этом случае вероятность P_i попадания в диапазон i составит:

$$P_i = \Delta N_{ui} / Max, \quad (5.29)$$

тогда при моделировании работы объекта необходимо задать случайное число $R = Rnd \in [0, 1]$ и сопоставить его одному из чисел, входящих в диапазон Max [280]:

$$Z = 1 + Int(R \cdot Max). \quad (5.30)$$

Выбирается диапазон времени $i+1$, в который попадает это число Z , если просуммировать предыдущие данные при выполнении условия [280]:

$$Z \geq \sum_{k=1}^i \Delta N_k. \quad (5.31)$$

Если диапазон $i+1$ нулевой, то выбирается первый ненулевой диапазон.

Остальное моделирование выполняется аналогично. При предлагаемом альтернативном подходе к моделированию форс-мажорные обстоятельства отдельно учитывать не надо, т.к. они уже входят в общую статистику [280].

Рассмотрим пример, аналогичный рассмотренному в подразделе 5.3, состоящий из $N = 10$ связанных элементов. В таблице 5.9 приведены исходные

данные, заданные в виде распределения. В столбцах «min» и «max» приведены минимально и максимально ожидаемые значения времени выполнения операции. В столбце «dt» автоматически рассчитан шаг времени по столбцам Δt . В столбцах «1», «2», ... «10» указано число попаданий в диапазон ΔN_i , которое на практике накапливается в результате функционирования АСУ ТООР. В столбце « Σ » рассчитывается общая сумма данных в столбцах 1 – 10: $\sum_{k=1}^{10} \Delta N_i$. В таблице 5.9 приведено промежуточное значение расчётов, аналогичное приведённому в подразделе 5.3. В таблицах 5.10 – 5.11 и рисунке 5.10 – результаты расчётов.

Таблица 5.9 – Исходные данные для тестового моделирования

№	Наименование	ОСНОВНОЙ ПРОЦЕСС													
		dt	min	max	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ
1	Заход локомотива в депо	1	10	20	1	4	100	70	50	30	15	2	0	0	272
2	Приёмка локомотива на ТООР	6	60	120	1	1	4	20	30	80	70	30	28	8	272
3	Осмотр 1 Экипажная часть	2	10	30	1	2	8	40	45	50	40	30	30	26	272
4	Осмотр 2 ДГУ	2,4	8	32	0	5	10	30	70	70	40	30	15	2	272
5	Осмотр 3 Электрическая часть	1,6	12	28	0	1	40	50	60	65	30	20	6	0	272
6	Ремонт 1 Экипажная часть	21	480	690	1	2	4	40	50	55	55	40	20	5	272
7	Ремонт 2 ДГУ	20	600	800	0	0	1	34	50	65	60	31	30	1	272
8	Ремонт 3 Электрическая часть	18	450	630	1	2	20	40	90	55	40	23	1	0	272
9	ИСПЫТАНИЯ	2,5	55	80	1	5	45	45	45	50	45	30	6	0	272
10	Выдача локомотива	5	40	90	0	0	5	15	55	55	55	40	30	17	272

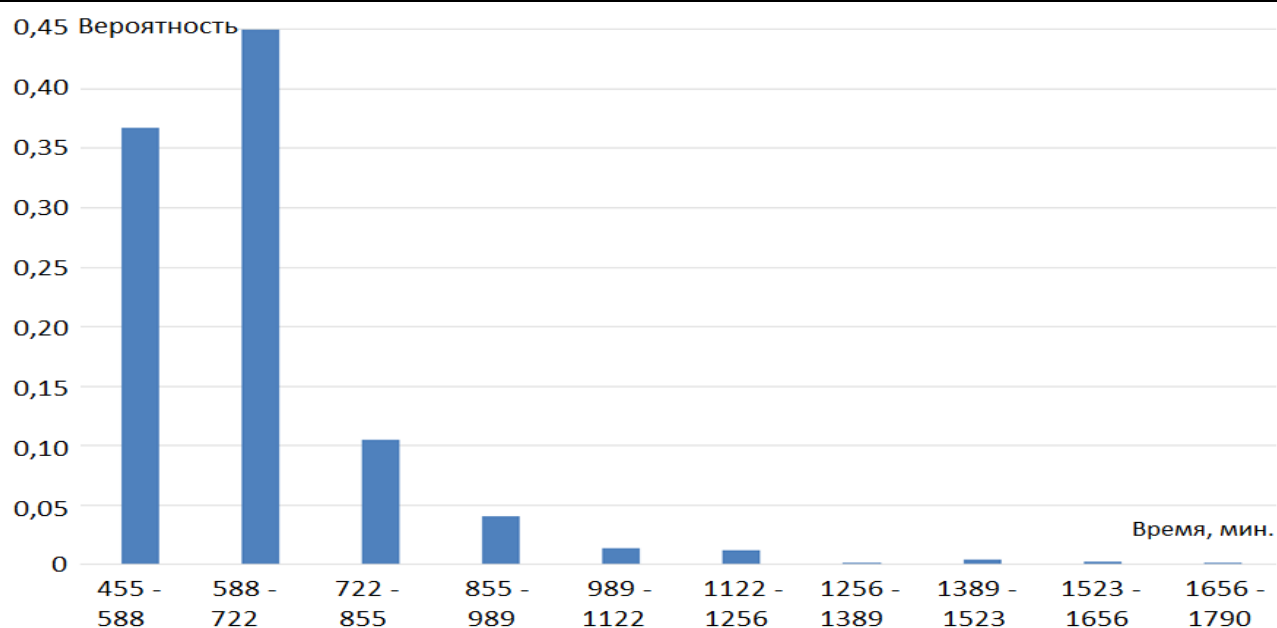


Рисунок 5.10 – Гистограмма ожидаемого времени ремонта

Таблица 5.10 – Результат тестового моделирования 561-й итерации из 1000

1000	561	РЕЗУЛЬТАТЫ		ВХОДЫ					
№	Наименование	Δt, мин.	T, мин.	@ @ @	1	2	3	4	5
1	Заход локомотива в СЛД	12,00	12,00	0					
2	Приёмка локомотива на ТОиР	72,00	84,00	12	12				
3	Осмотр 1 Экипажная часть	20,00	104,0	84	84				
4	Осмотр 2 ДГУ	17,60	101,6	84	84				
5	Осмотр 3 Электрическая часть	20,00	104,0	84	84				
6	Ремонт 1 Экипажная часть	543,00	647,0	104	104				
7	Ремонт 2 ДГУ	700,00	801,6	101,6	102				
8	Ремонт 3 Электрическая часть	522,00	626,0	104	104				
9	ИСПЫТАНИЯ	65,00	866,6	801,6	647	802	626		
10	Выдача локомотива	70,00	936,6	866,6	867				

Таблица 5.11 – Результаты тестового моделирования 1000 итераций

10	MIN	MAX	Диапазон (Min-Max)	N	P	ΣP
1	872	890,7	872 - 890	2	0,002	0,20 %
2	890,7	909,4	890 - 909	30	0,03	3,20 %
3	909,4	928,1	909 - 928	95	0,095	12,70 %
4	928,1	946,8	928 - 946	144	0,144	27,10 %
5	946,8	965,5	946 - 965	214	0,214	48,50 %
6	965,5	984,2	965 - 984	209	0,209	69,40 %
7	984,2	1002,9	984 - 1002	154	0,154	84,80 %
8	1002,9	1021,6	1002 - 1021	100	0,1	94,80 %
9	1021,6	1040,3	1021 - 1040	43	0,043	99,10 %
10	1040,3	1059	1040 - 1059	9	0,009	100,00 %

5.5 ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 5

- 1 При переходе на ТОиР с элементами предиктивного ремонта по данным АСТД необходимо решить задачу прогнозирования выдачи локомотива после его ремонта по индивидуальному сетевому графику. Задачу можно решить с применением технологии «Цифровой двойник» путём вероятностно-статистического моделирования в режиме online времени выдачи локомотива на линию после ТОиР [281].
- 2 Разработана вероятностно-статистическая модель ТОиР, позволяющая по мере накопления статистических данных о законах распределения и их параметрах операций ТОиР, а также после формирования в АСУ ТОиР сетевого графика ремонта конкретного локомотива (с учётом параметров его диагностической карты) моделировать процесс ТОиР, результатом которого является вероятностное распределение ожидаемого времени ремонта [281].
- 3 Разработана альтернативная модель имитационного моделирования, позволяющая не определять законы распределения времени выполнения операций [278, 281].
- 4 Достоинство первого метода имитационного моделирования – математическая точность и доказательность, возможность выявления редко встречающихся форс-мажорных обстоятельств. Вторая модель более проста в использовании, однако даёт удовлетворительный результат при накоплении большого объёма статистики.
- 5 Разработанные имитационные модели отлажены и испытаны на алгоритмическом языке VBA в среде MS Excel и могут быть перенесены в АСУ ТОиР для практического использования. Получено свидетельство на программное обеспечение для ЭВМ.

6 РАЗРАБОТКА КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЛОКОМОТИВОВ

6.1 ВНЕШНЯЯ ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ЛОКОМОТИВА

6.1.1 Киберфизические производственные системы и интероперабельность

Одно из базовых направлений повышения эффективности работы промышленных предприятий – внедрение цифровых технологий [300]. Часто даже говорят о цифровой трансформации [137, 357, 359, 278]. Фактически – это современный этап внедрения информационных технологий – автоматизированных систем управления (АСУ). Современный этап информатизации часто называют «Индустрия 4.0» или правильней «Киберфизические производственные системы» (Cyber-Physical Production Systems, CPPS) [89, 152, 235, 359, 299, 278]. Первоначально компания Siemens вкладывала в это понятие автоматизированную централизованную перенастройку станков с числовым программным управлением (ЧПУ) единого конвейера под нужное изделие. Основным смыслом CPPS остался прежним: комплексное автоматизированное управление производственными процессами, объединяющее в себя все местные АСУ, автоматизированные рабочие места (АРМ), станки и технологическое оборудование с микропроцессорным управлением, датчики в оборудовании и цехах, системы мониторинга и другое [299].

Главная специфика CPPS – это объединение в единую АСУ разрозненных систем, которые создавались в разное время различными разработчиками на различных аппаратно-программных платформах. На этапе третьей промышленной революции это не мешало техническому прогрессу, более того, позволяло конкурировать различным техническим решениям. На этапе CPPS разрозненность автоматизированных систем стала большой проблемой, для преодоления которой введено понятие – «Интероперабельность» ('интер – опе'рабельность): по сути – это функциональная совместимость [84, 299].

Интероперабельность – это способность различных информационных систем к обмену информацией и её совместному использованию [288]. Внедрение

информационных технологий на железнодорожном транспорте имело наряду с централизованными разработками и инициативные: не зависимо друг от друга создавались автоматизированные рабочие места (АРМ: нарядчика, дежурного по депо, диспетчера, мастера и др.), автоматизированные компьютерные системы технического диагностирования (АСТД), бортовые микропроцессорные системы управления локомотивами (МСУ), внедрялись станки с ЧПУ и др. После появления сервисных локомотивных депо дополнительно появились АРМ, АСУ, ERP- и MES-системы сервисных компаний. CPPS предполагает объединение всех информационных систем локомотивного хозяйства в единую АСУ (внутренняя интероперабельность) и её стыковка с АСУ сетевого уровня (внешняя интероперабельность): АСУТ, АСОУП, Цифровая железная дорога и др. [299, 288].

В планах отечественной стандартизации наряду со стандартами в области Интернета вещей, больших данных и др., есть и стандарты в области Умного производства и киберфизических систем [214], публичное обсуждение которых начато в 2019-м году [241]. Готовятся стандарты и на интероперабельность [318]. Унифицируется построение открытой информационной системы согласно требованиям [87]. Подготовлен проект национального стандарта «Умное производство. Унифицированная архитектура OPC» (Open Platform Communications) [217], который устанавливает общую концепцию и общие положения унифицированной архитектуры (Unified Architecture) в промышленных сетях и в семействе программных технологий OPC. Определён порядок межсервисного взаимодействия. Подготовка стандарта продолжается. В серии «Информационные технологии. Умное производство» планируются дополнительные стандарты по элементам системы.

Таким образом, в рамках киберфизической технологии управления предприятием проработана и доведена до уровня проектов национальных стандартов информационная составляющая АСУ, согласно которым должна строиться и АСУ ТОиР с АСТД. При этом технологическое содержание самой CPPS в этих стандартах не рассматривается и должна разрабатываться отдельно в соответствии со спецификой технологических процессов, в т.ч. организации технического обслуживания и ремонта локомотивов с использованием средств технического диагностирования.

6.1.2 Внешняя интероперабельность системы управления жизненным циклом локомотив

Обеспечение интероперабельности важно для управления жизненным циклом локомотива: различные автоматизированные системы десятилетиями развивались независимо друг от друга как в локомотивном комплексе, так и в локомотивных депо. На рисунке 6.1 приведена структура внешней интероперабельности системы управления жизненным циклом локомотива, описанная в следующих подразделах [299, 298].

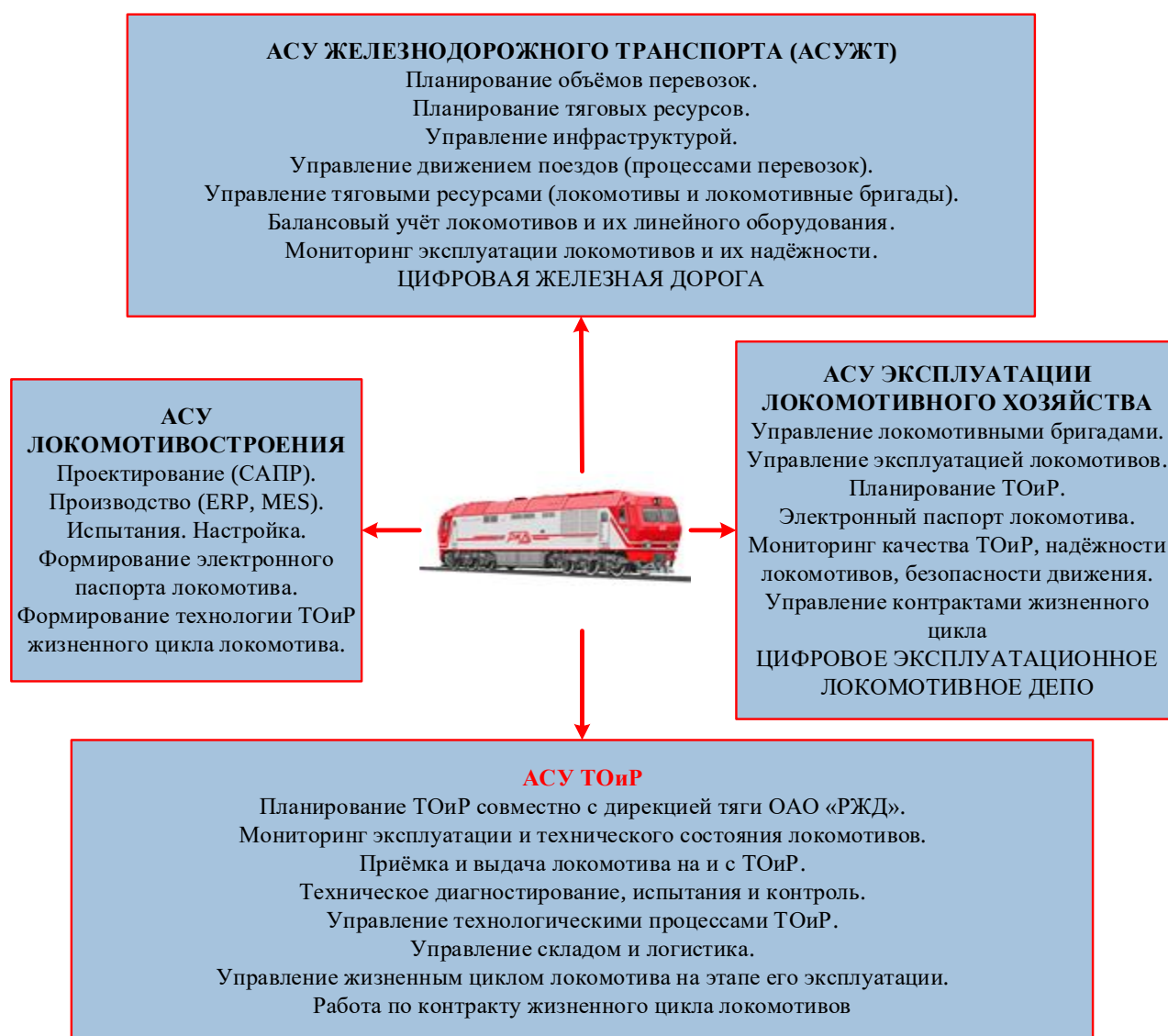


Рисунок 6.1 – Внешняя интероперабельность управления жизненным циклом локомотивов

Примечание: на рисунке 6.1 не показаны типовые функции управления предприятием и производством: экономическое и бухгалтерское управление, бюджетирование и отчётность, планирование, склад, трудовые ресурсы и др. (ERP, MES и др.) [299].

6.1.3 Информация этапа проектирования

Жизненный цикл локомотива (серии) начинается с его проектирования и проектирования его оборудования, для чего используются специфические системы автоматизации проектирования (САПР), системы моделирования, в т.ч. методом конечного элемента (МКЭ). Проектирование заканчивается формированием спецификаций оборудования и локомотива в целом, которые являются функциональным звеном между проектированием и производством [299].

На этапе проектирования должны закладываться требования к обслуживанию элементов, узлов и оборудования в целом: периодичность и объём ТОиР, требования к технологической оснастке, должна разрабатываться конструкторская, технологическая, эксплуатационная, ремонтная и другие виды документации, требования к технологическому оборудованию и другие требования к системе эксплуатации и ТОиР локомотивов. К сожалению, в настоящее время процесс разработки оборудования локомотива и его системы ТОиР не связаны: традиционно за разработку системы ТОиР, оснастки и технологического оборудования отвечало ПКБ ЦТ. После разделения функциональности локомотивного комплекса эта функция из бюро практически ушла (в основном, остались функции согласования), а на заводах-изготовителях не появилась. Необходимо ещё на этапе проектирования закладывать технологию ТОиР каждого узла локомотива.

Примечание: многие общие для серии локомотива или типа оборудования данные можно вынести в отдельную базу данных, но на практике требования к эксплуатации и ТОиР могут меняться от локомотива к локомотиву. Например, при наличии различных поставщиков оборудования на одну позицию, при модернизации оборудования, например, применении нового класса изоляции и др.

Таким образом, на этапе конструирования закладывается типовая модель паспорта серии, указываются виды оборудования на одну позицию: могут стоять разные типы электрических аппаратов, бортовых компьютеров, форсунок и др. Поэтому собственно ЭПЛ формируется на этапе изготовления локомотива при покупке (изготовлении) и монтаже оборудования [299].

6.1.4 Информация локомотивостроительных заводов

Завод-изготовитель имеет собственную АСУ, автоматизирующую ERP, MES и другие «классические» функции управления предприятием. В процессе производства появляется информация о номерах установленного на локомотив оборудования и поставщиках, даты изготовления, результаты испытаний и др. В результате формируется паспорт изделия: «эксплуатационный документ, содержащий в себе данные об основных параметрах и характеристиках продукта, а также сведения о его сертификации и утилизации» [50, 55]. В соответствии с ГОСТ 2.601-2006 [55] паспорт содержит разделы: основные технические данные, комплектность, требования к эксплуатации и хранению, ресурс, срок службы и хранения, гарантии изготовителя (поставщика), консервация, свидетельство о приемке, сведения об упаковывании, движение изделия в эксплуатации, ремонт и учет работы по бюллетеням и указаниям, сведения об утилизации. Дополнительно в паспорте указываются данные о составе продукта и исходное сырье, технические и эксплуатационные характеристики изделия, особенности использования в различных условиях, в т.ч. для определения взрыво- и пожароопасности изделия и других его свойств. Значительную часть паспорта относится к этапу проектирования и может храниться отдельно для всех локомотивов одновременно [299].

Современный паспорт локомотива согласно CPPS должен формироваться в электронном виде. Поэтому следует создавать электронный паспорт локомотива – ЭПЛ. Сразу возникает вопрос о формате ЭПЛ: это может быть документ в формате Word или Excel, что удобно для просмотра документов, но не удобно для автоматизации управления жизненным циклом. Возможно создание в формате одной из систем управления базами данных (СУБД), но тогда надо определить порядок взаимодействия различных подсистем автоматизации управления жизненным циклом локомотива (рисунок 6.1). Но не должен быть формат САПР как мало распространённый и требующий оплаты каждого нового рабочего места.

Таким образом, информация жизненного цикла локомотива начинает формироваться на этапе проектирования, после чего на этапе изготовления дополняются конкретные данные о каждом экземпляре локомотива и его оборудовании.

6.1.5 Информация этапа эксплуатации локомотивов

Парк локомотивов ОАО «РЖД» обеспечивает перевозочный процесс услугами тяги. Управление движением поездов осуществляется в рамках второго рассматриваемого комплекса АСУ (рисунок 6.1) – АСУ железнодорожного транспорта (АСУЖТ), принцип организации которой подробно описан академиком А. П. Петровым [215] – основоположником АСУЖТ. С позиций управления жизненным циклом локомотива главной подсистемой АСУЖТ является автоматизированная система оперативного управления поездами – АСОУП (раздел 2) [288], в которой, наряду с другими параметрами перевозочного процесса, фиксируются дислокация локомотивов, их перемещение, выполненная тонно-километровая работа и пробег, текущий статус (тяга, ожидание работы или ремонта, ТОиР и др.), техническое состояние (исправен/неисправен) и др. Таким образом в АСОУП есть полная информация об эксплуатации локомотива [299].

Таким образом, из АСОУП в СУБД ЖЦЛ должна поступать информация о выполненной каждым локомотивом работе: пробег (тыс. км), перевезённый груз (10 тыс. тонно-км брутто), а также время нахождения в различных состояниях (в голове поезда, ожидание работы или ТОиР, ТОиР, пересылка и др.) по классификатору АСОУП [299].

Главной рабочей АСУ управления перевозочными процессами в настоящее время является АСУ «График исполненного движения» (ГИД «Урал»), фактически автоматизировавшая управление движением поездов и ручную технологию ведения графика исполненного движения. Управление движением ведётся из дорожных диспетчерских центров (ДЦУП). Но база данных по-прежнему остаётся в АСОУП, реализованная с использованием СУБД DB-2. Поэтому отдельно взаимодействие с АСУ «ГИД Урал» не нужно. В НИИАС создаётся глобальная СУБД ИСУЖТ, аккумулирующая информацию о движении поездов из всех доступных источников. Поэтому в перспективе возможно взаимодействие с ИСУЖТ [299].

Центральная дирекция управления движением поездов – филиал ОАО «РЖД» (ЦД) – управляет движением поездов, планирует и анализирует эксплуатационную работу, отвечает за безопасность движения поездов и др. В 2014 году для управления локомотивами и локомотивными бригадами при ЦД созданы Центры

управления тяговыми ресурсами (ЦУТР) на полигонах Московской (г. Москва) и Октябрьской (г. Санкт-Петербург) железных дорог, на Северо-Западном (г. Екатеринбург), Юго-Западном (г. Самара) и Восточном (г. Иркутск) полигонах. В задачи ЦУТР входит планирование эксплуатационной работы локомотивов и постановки на ТОиР (пункт 1.7.5). ЦУТР используют информацию АСОУП, ГИД «Урал», ИСУЖТ, АСУТ. Новой информацией ЦУТР является прогнозный трёхсуточный график постановки локомотивов на ТОиР [298]. Фактическое время постановки локомотива в состояние ожидание ТОиР и сам ТОиР (раздел 2) можно взять из АСОУП. Но для повышения качества управления ТОиР интересно сравнивать плановое и фактическое времена (перевод локомотива в состояние «неисправное» и обратно в «исправное»). Поэтому целесообразно из системы ЦУТР или через АСУТ по данным ЦУТР вводить в СУБД ЖЦЛ плановый график постановки локомотивов на ТОиР [299, 288].

Таким образом, взаимодействие системы управления жизненным циклом локомотивов с АСУЖТ должно идти через центры управления тяговыми ресурсами (ЦУТР), как раз задуманные для управления локомотивами на полигоне [299].

Все эксплуатируемые в ОАО «РЖД» локомотивы находятся на балансе компании. Поэтому имеется типовая бухгалтерская информация о депо приписки локомотивов, их исходной и текущей стоимости. Аналогично и с линейным оборудованием локомотивов, технологическим оборудованием депо. Вся эта информация хранится в информационной системе ЕК АСУФР, созданной на информационной платформе SAP R/3 [196]. Информация обладает высокой достоверностью, т.к. связана с финансовой отчётностью ОАО «РЖД» перед государственными органами. Стоимостные показатели эксплуатируемого парка важны для технико-экономического управления стоимостью жизненного цикла локомотивов и должны поступать в СУБД ЖЦЛ [299, 298].

Таким образом, основными источниками информации об эксплуатации локомотивов являются две информационные системы: «автоматизированная система оперативного управления поездами» (АСОУП) и «Единая комплексная автоматизированная система управления финансами и ресурсами» (ЕК АСУФР) [288]. Дополнительным источником о планируемых ремонтах могут стать ЦУТР.

6.1.6 Информация локомотивного хозяйства

АСОУП – это АСУ оперативного управления перевозочными процессами. Информация АСОУП импортируется в АСУ локомотивного хозяйства – АСУТ, главная функция которой – управление работой локомотивных бригад и эксплуатацией локомотивов, особенно на этапе их захода в локомотивное депо. В локомотивных депо создаётся новая информация при переводе локомотива в состояние «Ожидание ремонта» и «Ремонт» и обратно (т.н. 230-е сообщения АСОУП, которые передаёт дежурный по депо или диспетчер). Информация сразу поступает в АСОУП, поэтому следует выбрать один источник информации об эксплуатации локомотивов: АСОУП или АСУТ [299].

Важный и достаточно самостоятельный элемент АСУТ – это «Электронный паспорт локомотива» (ЭПЛ) разработки ПКБ ЦТ, в котором указывается пономерной состав оборудования локомотива и ТОиР, производившейся как с локомотивом в целом, так и с линейным оборудованием. ЭПЛ ПКБ ЦТ был задуман как самодостаточный источник информации о жизненном цикле локомотива, но на сегодняшний день не является таковым, т.к. принадлежит Дирекции тяги ОАО «РЖД» – одной из заинтересованных сторон, а наличие локомотивостроительных и локомотиворемонтных заводов, сервисных компаний предполагает наличие у этих компаний коммерческой тайны. Специалисты ОАО «РЖД» с этим не согласны, требуя раскрытие всей информации, например, через проект «Доверенная среда». Однако мировой опыт свидетельствует об обратном. Например, эксплуатируемые в депо «Иваново» тепловозы серии 2ТЭ116УД с дизелями компании General Electric (GE) имеют гарантийный ТОиР этих дизелей компанией-изготовителем. GE устраняет все отказы, проводя анализ причин отказов как непосредственно в депо, так и на заводе: отказавший узел тщательно исследуется, даже разрезается на части. Но при этом информация о причине отказа для ОАО «РЖД» не раскрывается. Также обстоит ситуация на БАМ с дизелями GE на тепловозах 3ТЭ25К2М. Аналогичная ситуация с электропоездами Сапсан, обслуживаемыми компанией Сименс на базе электродепо «Металлострой»: вся информация о причинах отказов является коммерческой тайной компании-изготовителя [299].

Восьмой из четырнадцати ключевых принципов управления предприятием Эдварда Деминга «Изгоняйте страхи» предполагает, что полноценная система не

может функционировать при наличии риска у работников быть наказанными за отрицательную информацию, без которой, с другой стороны, нельзя реализовать принцип постоянного улучшения (цикл PDCA). В сервисных локомотивных депо есть ряд проблем, многие из которых достались «по наследству»: несоблюдение технологии ТОиР, завышенное время простоя на ТОиР, низкая надёжность, отсутствие полноценного снабжения и др. Все эти проблемы постепенно решаются, для чего нужна достоверная исходная информация. Субъективная заинтересованность отдельных специалистов и руководителей может приводить к проблемам с использованием ЭПЛ ПКБ ЦТ в качестве центральной СУБД [299].

С ЭПЛ ПКБ ЦТ есть ещё проблемы. Исходная информация в систему вводится в заданном объёме на локомотивостроительных и локомотиворемонтных заводах, в сервисных локомотивных депо вручную [278]. Попытки автоматизировать процесс взаимодействия с ЭПЛ ПКБ ЦТ искусственно блокируются под предлогом информационной безопасности: нарушается принцип интероперабельности. Если расширить объём информации до необходимого для управления жизненным циклом локомотива [298], то ручной ввод станет невозможным. Есть проблемы и с получением информации из ЭПЛ ПКБ ЦТ. Например, типовую выборку о наличии в парке локомотивов оборудования со сроком службы более 10 лет получить принятым в мировой практике SQL-запросом (Structured Query Language) невозможно: придётся делать запрос по каждому локомотиву отдельно [299].

Таким образом, в локомотивном хозяйстве дополнительной к АСОУП и ЕК АСУФР информацией является СУБД «Электронный паспорт локомотива» (ЭПЛ), в котором хранится информация о составе оборудования на каждом локомотиве, его пробеге и выполненных ремонтах. После выделения в 2014 году функции сервисного технического обслуживания и ремонта (ТОиР) в отдельную вертикаль управления информация в ЭПЛ о выполняемом ТОиР стала неполной. Необходима синхронизация данных жизненного цикла локомотива с ЭПЛ и АСУТ в целом.

6.1.7 Информация сервисных компаний и локомотиворемонтных заводов

Главная информация о надёжности локомотивов, стоимости и продолжительности ТОиР формируется в настоящее время сервисными компаниями в их АСУ ТОиР (описана в подразделе 1.7.4 на примере информационной системы группы компаний «ЛокоТех» АСУ «Сетевой график» – АСУ СГ) [281], где налажен учёт отказов через сверхцикловые работы с регистрацией длительности их исполнения, трудовых затратах и используемых запасных частях и материалах: удалось перейти от малоинформативного и неполноценного учёта отказов по показателю «Число отказов на 1 млн км» [271] к полноценному анализу с автоматизированным диагностированием по данным бортовых и ряда деповских информационных систем, единой точкой входа которых является электронный журнал замечаний по техническому состоянию локомотива – аналог бумажного журнала учёта ремонтов формы ТУ-28 [278]. Дополнительно в АСУ СГ при ремонте линейного оборудования налаживается их пономерной учёт, что является важной предпосылкой управления жизненным циклом всех видов оборудования, включая стоимость их жизненного цикла [299].

Информация систем диагностирования используется в АСУ СГ, но храниться только сам диагноз и рекомендации по дополнительному ТОиР: объём информации АСТД должен быть ограничен, т.к. исходные файлы могут быть очень объёмными, в т.ч. с бортовых АСТД, вибродиагностики, реостатных испытаний и др. На сколько необходимо в СУБД ЖЦЛ хранить исходные файлы – отдельная задача для исследования. Видимо, к разработчикам АСТД необходимо предъявлять требования определения достаточного объёма информации для управления жизненным циклом оборудования. Кроме того, ряд разработчиков, сопровождающих свои АСТД ведут собственные базы данных для совершенствования алгоритмов диагностирования, отслеживания динамики изменения параметров. Например, фирма GE по дизелям, компании ВАСТ и НИИТКД по вибродиагностике механической части локомотива, НИИТКД по реостатным испытаниям, ВНИКТИ, ЛЭС, ЛокоТех и СТМ-Сервис по данным бортовых АСТД [299].

Таким образом, информация сервисных компаний является основным источником данных о техническом обслуживании и ремонте локомотивов.

6.1.8 Информация локомотиворемонтных заводов

Дополнительно к информации АСУ сервисных компаний есть информация АСУ локомотиворемонтных заводов, осуществляющих средний (СР) и капитальный (КР) ремонты (в ТУ на оборудование ещё сохранились альтернативные сокращения КР-1 и КР-2). Эта информация должна использоваться аналогично информации сервисных компаний. Но есть существенная специфика.

СР и КР предполагают полную разборку локомотива и его оборудования. Производится замена ряда изношенных узлов. Более того, отремонтированный узел может попасть на другую позицию и даже другой локомотив. Возникает вопрос: на сколько правильно выпущенный с капитального ремонта локомотив считать этим же локомотивом и продолжать вести учёт его жизненного цикла далее? Автору представляется это нецелесообразным: предлагается локомотив после КР считать новым локомотивом (например, добавлять к его номеру литеру «К») и вести управление жизненным циклом от КР до КР (от СР до КР, от изготовления до СР). Пример: выпрямительно-инверторный преобразователь ВИП-4000М должен служить «не менее 15 лет», что примерно соответствует пробегу до КР. При этом входящие в состав ВИП 64 тиристора служат «не более 100 тыс. часов», что примерно соответствует тому же пробегу. Другие вспомогательные электронные элементы также имеют срок службы до 100 тыс. часов. Таким образом, от ВИП остаётся только каркас и его заводской номер. На сколько правильно этот ВИП считать тем же, что до КР? Автору представляется нецелесообразным считать его новым типом ВИП-4000М-**КР** со старым номером и заново вести управление его жизненным циклом. Аналогично обстоит ситуация с тяговыми двигателями, электрическими аппаратами, цепями управления. А секции холодильника дизеля вообще не имеют номеров и ставятся на тепловоз в произвольном порядке. Кроме того, после первого СР меняется ответственный за надёжность локомотива: с локомотивостроительного на локомотиворемонтный завод. Отдельно следует установить порядок бухгалтерского и финансового учёта этого локомотива и его оборудования в ЕК АСУФР ОАО «РЖД» [299].

Таким образом, информация локомотиворемонтных заводов является неотъемлемой частью информации жизненного цикла локомотивов.

6.1.9 Схема взаимодействия информационных систем

В результате рассмотрения схемы интероперабельности данных жизненного цикла локомотивов (рисунок 6.1) сделан вывод о целесообразности создания единой межплатформенной системы управления базами данных (СУБД) [298] на базе одной из известных СУБД (DB-2, Oracle, SQL-Server и др.) жизненного цикла локомотивов – СУБД ЖЦЛ, собирающей данные от всех участников процесса: проектировщиков и изготовителей локомотивов и их оборудования, организаций, эксплуатирующих локомотивы (ОАО «РЖД» и др.), локомотивного хозяйства ОАО «РЖД», сервисных компаний и локомотиворемонтных заводов. Информация СУБД ЖЦЛ формируется по данным причастных АСУ и СУБД согласно таблице 6.1 по интероперабельной схеме, пример реализации которой показан на рисунке 6.2 [299].

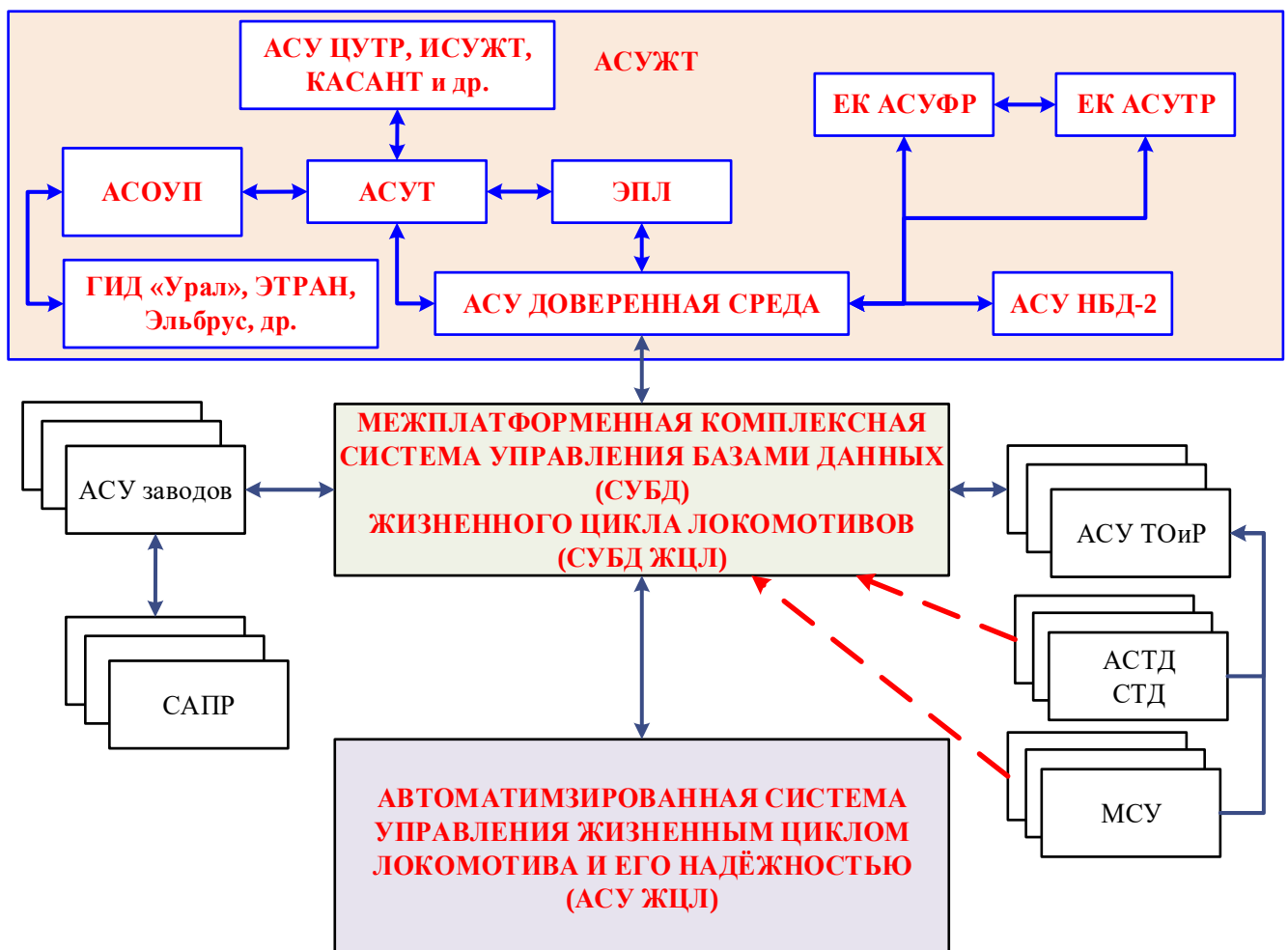


Рисунок 6.2 – Возможная структура интероперабельного взаимодействия информационных систем при управлении жизненным циклом локомотивов

Таблица 6.1 – Информация СУБД ЖЦЛ и её источники

№ п/п	Наименование информации	Источник информации
1	Структура оборудования каждой серии локомотива.	Системы автоматизированного проектирования локомотивов и их оборудования (САПР)
2	Уникальные номера оборудования, информация о производителе и дате изготовления, результаты испытаний	АСУ локомотиво-строительных заводов
3	Технологические карты ТОиР оборудования и локомотива в целом, с указанием периодичности, объёма и стоимости ТОиР	САПР, АСУ заводов-изготовителей
4	Работа локомотива с указанием пробега, тонно-километровой работы, полигона работы, при возможности расхода энергии в кВт·ч, типа вагонов в поездах; также желательно указать время нахождения локомотива в различных состояниях согласно классификатору АСОУП	АСУЖТ: АСОУП или АСУТ
5	Прогнозный график постановки локомотивов на ТОиР	АСУЖТ: АСУТ, АСУ ЦУТР или АСУЖТ
6	Фактические даты и время постановки локомотивов на ТОиР	АСУЖТ: АСОУП или АСУТ
7	Замечания по техническому состоянию локомотива	Журнал замечаний АСУ ТОиР, МСУ, КАСАНТ и др.
8	Диагностические данные	СТД, АСТД, АСУ ТОиР
9	Объём ТОиР с указанием видов выполненных работ, трудовых затрат, использованного оборудования, материалов и запасных частей.	АСУ ТОиР, электронные технологические карты локомотивов.
10	Номера демонтированного и установленного на локомотив линейного оборудования (материалов повторного использования)	АСУ ТОиР сервисных компаний и локомотиворемонтных заводов
11	Исходная и остаточная стоимость оборудования и локомотива в целом. Другие бухгалтерские и финансовые данные по локомотиву.	АСУЖТ: ЕК АСУФР
12	Окончание жизненного цикла. Списание. Утилизация.	АСУЖТ: ЕК АСУФР

Важное свойство предлагаемой схемы – все приведённые информационные системы могут развиваться независимо друг от друга, иметь собственные аппаратно-программные платформы. Интероперабельность обеспечивается договорённостью сторон о формате данных и правами пользования ими.

В АСУЖТ ОАО «РЖД» создаётся АСУ «Доверенная среда», которая аккумулирует и обеспечивает безопасный обмен данными между системами АСУЖТ, находящимися в независимой от Интернет системе передачи данных компании (СПД) и системами, работающими в Интернет (АСУ заводов, поставщиков оборудования, АСУ сервисных компаний и локомотиворемонтных заводов).

Из АСУЖТ в АСУ «Доверенная среда» попадает информация прежде всего из АСУТ и ЭПЛ ПКБ ЦТ, а также бухгалтерская информация из ЕК АСУФР. Информация других информационных систем АСУЖТ попадает в Доверенную среду напрямую или через АСУТ (тип информации указан в таблице 6.1).

На заводах-изготовителях функционируют собственные АСУ, обеспечивающие автоматизированное управление производственными процессами. Доступ к этой информации в режиме online не нужен: нужны только данные для СУБД ЖЦЛ, структурированные согласно требованиям проектной документации, поступающей из САПР.

Наибольший объём информации жизненного цикла связан с выполненном ТОиР, информация о которых находится в АСУ сервисных компаний и АСУ локомотиворемонтных заводов. Часть этой информации поступает из СТД, АСТД, из бортовых АСТД после их обработки. Возможен вариант создания системы сбора диагностических данных с передачей их непосредственно в электронный паспорт, откуда она уже будет поступать в АСУ ТОиР. Такой подход может поднять объективность оценки технического состояния локомотивов.

Необходима разработка аналитических функций, соответствующего программного математического и программного обеспечения для управления жизненным циклом локомотивов – АСУ управления жизненным циклом локомотивов (АСУ ЖЦЛ).

6.1.10 Результаты анализ внешней интероперабельности

- 1 При управлении жизненным циклом локомотивов необходимо комплексно использовать информацию АСУ локомотивостроительных заводов, эксплуатирующей локомотивы организации (в т.ч. ОАО «РЖД»), сервисных компаний, осуществляющих ТОиР, и локомотиворемонтных заводов [299].
- 2 Создание единой АСУ для всех участников процесса управления жизненным циклом локомотива затруднено как в силу исторических особенностей создания АСУ и специфики решаемых функциональных задач, так и из-за необходимости соблюдения коммерческой тайны каждого участника процесса. Необходимо обеспечить интероперабельность АСУ.
- 3 Для обеспечения интероперабельности АСУ по п.1 необходимо создать единую межплатформенную систему управления базами данных (СУБД) управления жизненным циклом локомотивов [298] – СУБД ЖЦЛ, в которой будет аккумулироваться информация о локомотиве с момента его проектирования и постройки и до капитального ремонта или утилизации. Доступ к базе данных должен быть ограничен правами пользователя. При этом в СУБД должны быть встроенные логически защищённые процедуры ввода и вывода информации, фоновый анализ и формирования периодических отчётов, выдачи тревожных сообщений [299].
- 4 В АСУЖТ (в АСУТ) имеется СУБД «Электронный паспорт локомотива» (ЭПЛ) разработки ПКБ ЦТ, собирающий информацию о локомотиве. Однако полную информацию в ЭПЛ ПКБ ЦТ хранить затруднено из-за проблем ОАО «РЖД» автоматизации процесса ввода исходной информации и отсутствия возможности SQL-запросов. Также есть проблема с конфиденциальностью информации, представляющей коммерческую тайну участников процесса. Тем не менее с позиций управления жизненным циклом локомотива АСУЖТ является самой подготовленной. Главные подсистемы АСУЖТ для управления жизненным циклом локомотива – ЕК АСУФР, АСОУП, АСУТ, ЭПЛ [298].
- 5 Межплатформенная система управления базами данных (СУБД) жизненного цикла локомотивов (ЖЦЛ) – СУБД ЖЦЛ – должна содержать информацию согласно таблице 6.1 [298].

6.2 МЕТОДЫ ЧЕТВЁРТОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ РЕВОЛЮЦИИ

При описании технических составляющих, используемых при реализации технологии CPPS (пункт 6.1.1) часто используют термин «Индустрия 4.0» (Четвёртая промышленная революция), введенный в Германии в 2011-м году (Industry 4.0) как обозначение одного из десяти направлений развития немецкой промышленности [364]. По сути – это набор технических, технологических и аппаратно-программных решений, на базе которых решаются задачи CPPS. Все эти направления предоставляют возможность в большей или меньшей степени повышения эффективности технического обслуживания и ремонта (ТОиР) локомотивов [278]. В этом подразделе с позиций АСУ ТОиР выполнен анализ основных элементов технологии «Индустрия 4.0».

6.2.1 Аппаратно-программные платформы

На рисунке 6.3 показана технологическая структура АСУ жизненного цикла локомотивов. Аппаратно-программную основу составляют стандартные системные аппаратно-программные технические решения. На втором уровне находятся стандартные технические решения. На третьем – специализированные технические решения, главным из которых следует считать бортовые, деповские стационарные и переносные автоматизированные системы технического диагностирования (АСТД) [298, 296], которые являются одним из объектов рассмотрения настоящей работы. Не менее важным элементом этого уровня являются бортовые микропроцессорные системы управления (МСУ) локомотивов – один из основных источников информации о техническом состоянии локомотивов. Сюда же входят смежные АСУ, описанные в подразделе 6.1. В качестве специализированного интернета вещей в эту группу входит специализированное технологическое оборудование с аппаратно-программным обеспечением для работы в киберфизической системе.

По эмпирическому закону Мура каждые два года плотность транзисторов на кристалле удваивается. Каждые 18 месяцев удваивается производительность микропроцессоров. В геометрической прогрессии растёт объём энергонезависимой и оперативной динамической памяти. Ожидается появление квантовых

компьютеров. В результате даже на 10 лет вперёд невозможно предсказать перспективы развития компьютерных технологий.



Рисунок 6.3 – Технологическая структура АСУ жизненного цикла локомотивов и её аппаратно-программные средства

Таким образом, система управления жизненным циклом локомотив, в т.ч. АСУ ТОиР и АСТД должны соответствовать текущему уровню развития информационных технологий (на практике АСУ предприятий из-за инерционности процесса их разработки и внедрения отстают на 1 – 2 поколения в своём развитии).

Главный тренд современных информационных технологий – работа в Интернет: всемирная система объединённых компьютерных сетей для хранения и передачи информации. С момента появления в 1969 году до 21 века Интернет стал неотъемлемой частью информационных систем. В конце 20 века было ещё понятие Интранет – внутренняя сеть предприятия. Сейчас это только характеристика сегмента сети, полностью или частично отделённого от Интернета программными и реже аппаратными средствами. Например, банковские системы, военные, сеть ОАО «РЖД» (СПД). Аппаратные средства Интернет могут быть разных производителей, но их интерфейс и протоколы обмена унифицированы. Первыми

протоколами были TCP/IP. Сейчас самый популярный способ обмена данными – облачные технологии с Web-интерфейсом.

Рабочие места работников имеют в основе типовые компьютеры, планшетные компьютеры и даже Smart-телефоны, подключаемые к Интернет по проводному или беспроводному каналу. Выбор типа компьютера для автоматизированного рабочего места (АРМ) определяется спецификой выполняемых работ. Например, слесарю удобно использовать промышленный компьютер с сенсорным экраном в виде терминала или Smart-телефона. Мастеру специализированного цеха – стационарный компьютер, мастеру цеха периодических ремонтов – планшет.

Внутри Интернет активно используют облачные технологии (Cloud Computing), ставшие стандартом «де-факто». Запрос и получение ответа с результатом происходит через Web-браузер на локальном компьютере. При этом программное обеспечение и данные находятся на удалённом сервере. Облачные технологии автоматически обеспечивают аппаратно-программную совместимость, позволяют обращаться к базе данных пользователя с различных рабочих мест, снижают требования к компьютеру АРМ, снижаются требования к лицензированию и многое другое. Главный существенный недостаток – это остановка технологического процесса в случае отсутствия или медленной работы («зависания») Интернет. Например, при внедрении АСУ «Сетевой график» в депо «Амурское» (г. Комсомольск-на-Амуре) медленная работа Интернет сдерживала использование системы. Аналогичная ситуация была в депо Сургут и ряде других. Поэтому необходимо обращать самое пристальное внимание на обеспечение устойчивости работы Интернет и его кибербезопасности. Облачные технологии предполагают самые высокие требования к информационной культуре.

Главный риск при организации кибербезопасности – это не погубить систему самой этой системой безопасности, когда по непонятным причинам система не даёт когда можно или даёт когда нельзя доступ к данным. Абсолютно защищённых информационных систем в Интернет нет. При этом следует не забывать, что есть два принципиально разных подхода к безопасности: Security – защита от внешней угрозы (вирусы, хакеры, конкуренты) и Safety – защита от собственных ошибок. Борьба с внешней угрозой осуществляется стандартными средствами. С внутренней – разработкой логических защит в программном обеспечении самой АСУ. Несмотря

на огромные достижения в области развития компьютерной безопасности – риск сбоя системы в Интернет достаточно высок. Следует уделять большое внимание кибербезопасности.

Примечание: копирование информации на бумагу не является эффективным средством защиты информации: в случае сбоя её будет физически тяжело восстановить. Гораздо эффективней копирование на другие электронные и магнитные носители.

Следующий признак современного Интернета – это работа с большими объёмами данных (Big Data). Имеется в виду не только размеры базы данных, но и способы обработки информации: системы управления базами данных (СУБД, Database Management System, DBMS). СУБД стали активно развиваться параллельно с развитием Интернет. Наиболее популярными стали реляционные СУБД, на базе которых создан ряд типовых системных программных продуктов: DB-2, Oracle, SQL-сервер и др. СУБД содержат ядро, процессор языка баз данных, подсистему поддержки времени исполнения, сервисные программы. Важно отметить, что СУБД позволяют программировать т.н. хранимые процедуры, защищающие базу данных от ошибок при вводе и выводе информации. Технология Big Data является альтернативной идеологии СУБД, осуществляя обработку данных горизонтально масштабируемым программным обеспечением. Технология Big Data позволяет существенно ускорить выборку данных из их общего числа в сравнении с технологией SQL-запросов. Big Data – это типовые аппаратно-программные решения, используемые совместно с Интернет.

СУБД ЖЦЛ будет содержать информацию до 100 тысяч секций локомотивов с относительно небольшим объёмом информации об их эксплуатации. Гораздо больше информации формируется при ТОиР. Реально большой объём информации создают АСТД). В полном объёме в настоящее время хранятся только диагнозы. Технология Big Data позволяет хранить и исходные данные, что может позволить существенно повысить эффективность диагностирования за счёт рассмотрения диагностических параметров в динамике, применении сложного математического аппарата распознавания образов. Предлагается разделить СУБД ЖЦЛ (включая диагнозы АСТД) и СУБД различных АСТД. Например, хранить коды ошибок и основные параметры бортовых МСУ в СУБД ЖЦЛ, а исходные файлы, считанные

с локомотива отдельно. Например, в группе компаний «ЛокоТех» в АСУ «Сетевой график» хранится информация о ТОиР более 20 тыс. секций локомотивов, в т.ч. замечания по техническому состоянию локомотивов [278]. Один из источников информации – СУБД расшифровки данных МСУ – АРМ «Умный локомотив» разработки компании «Кlover Групп», где и хранятся исходные данные.

Таким образом, построение аппаратно-программной платформы системы управления жизненным циклом локомотивов следует осуществлять общепринятыми динамически развивающимися методами, аппаратно-программными средствами, доступными на рынке информационных технологий. В качестве платформы, с учётом объёма данных жизненного цикла всех локомотивов (ЖЦЛ), предлагается применить типовую СУБД, например, Oracle.

6.2.2 Искусственный интеллект

На рисунке 6.3 показана технологическая структура АСУ жизненного цикла локомотивов, вершиной которой являются интеллектуальные технологии. Первые три уровня – это аппаратно-программная платформа АСУ (подраздел 3.1). Следующий уровень – это собственно сама АСУ, как она рассматривается в настоящей работе: структура системы, алгоритмы и регламенты её работы, специализированное программное обеспечение, организация СУБД и внутренней интероперабельности. Вершиной пирамиды технологий АСУ являются её интеллектуальные системы управления, представляющие собой программное обеспечение с использованием сложных логических и математических вычислений с целью реализации системы поддержки принятия решений (СППР), фоновый мониторинг с выдачей тревожных сообщений в режиме on-line, формированием отчётов: периодически или по запросу, стандартных или по системе фильтров (SQL-запросов). Интеллектуальная составляющая рассмотрена в подразделе 6.3.

6.2.3 Интернет вещей

В разделе 2 показано, что АСУ – это, прежде всего, система с обратной связью, для реализации которой необходимы датчики. Применительно к АСТД и МСУ – это датчики в электрических цепях локомотива, датчики температуры, давления, числа оборотов, виброускорений дизеля и др. Применительно к АСУ технологических процессов (АСУ ТП – к ним относится и АСУ ЖЦЛ) – это системы

диагностирования и все остальные элементы, входящие в понятие киберфизических систем. Т.к. информация от датчиков всех видов поступает на сервер АСУ через Интернет (в отличие от датчиков внутри локомотива), то их совокупность получила в литературе название «Интернет вещей».

Интернет вещей является неотъемлемым элементом любой АСУ [288], т.к. обеспечивает систему исходными данными о состоянии объекта управления. Применительно к локомотивному комплексу – это, конечно, сам локомотив: знание о его техническом состоянии, местонахождении, скорости движения, выполняемой работе – основа управления хозяйством. Поэтому наличие на локомотиве микропроцессорной системы управления и диагностирования (МСУ) – основа технологии Интернета вещей в цифровом депо. МСУ локомотива, опрашивая датчики скорости, напряжения, скорости, давления, температуры и др., не только управляет приводом и осуществляет автоматическую тягу поездов, но и формирует исходную информацию для дальнейшей организации технического обслуживания и ремонта локомотивов (ТОиР) [288].

В самом депо интернет вещей – это, прежде всего, автоматизированные системы технического диагностирования (АСТД), станки с цифровой системой управления (ЧПУ). Также важно автоматизировать контроль инфраструктуры: температура в помещениях, состояние дверей и ворот, давление и температура воды в системе отопления и много другое. В Интернете вещей важную роль играют и системы передачи данных от датчиков до сервера АСУ. Эта связь может быть как беспроводной, так и проводной. Интернет вещей – естественная и неотъемлемая часть АСУ при максимальном использовании типовых технических решений [288].

6.2.4 Компьютерное зрение

Это одно из самых прорывных направлений современных IT-технологий, позволяющее по данным цифровых видеокамер распознавать объекты: лица людей, предметы, номера автомобилей и многое другое. На железнодорожном транспорте – это распознавание подвижного состава, его типа и номеров, контроль занятости участков пути, в т.ч. для управления локомотивом без машиниста, и многое другое. Часто используются термины «Машинное зрение», «Промышленное зрение» и др., имеющие аналогичные функции. В локомотиворемонтном комплексе

компьютерное зрение может найти полезное применение при диагностировании локомотива. В настоящее время приёмка локомотива в ремонт и выдача после ремонта – слабое место системы сервисного ТОиР. Осмотр локомотива и его оборудования с распознаванием оборудования и его технического состояния могло бы сыграть большую роль в повышении эффективности ТОиР. Ещё раз следует отметить, что компьютерное зрение уже вошло в достаточно массовое использование. Одно из них: распознавание лиц и предметов, распознавание номеров автомобилей. На железнодорожном транспорте отлажена технология распознавания профиля бандажа колёсной пары и диагностирование его технического состояния. Развиваются технологии распознавания типов подвижного состава. Именно с развитием компьютерного зрения связаны разработки беспилотных локомотивов [288].

6.2.5 Дополненная реальность

Это вторая технология, применение которой совместно с компьютерным зрением могло бы дать большой эффект. Выглядело бы это примерно так: работник депо в специальных очках или с планшетным компьютером, но в любом случае со встроенной видеокамерой, подходит к локомотиву. Компьютер автоматически распознаёт номер и серию локомотива и выводит на экран планшета или специальные очки дополненной реальности план действий, оборудование, которое надо осмотреть. Когда оборудование распознано, может появиться подсказка, как и какие замеры надо произвести. Возможна демонстрация типовых неисправностей. При внедрении этой технологии существенно повысится качество и объективность приёмки локомотива, снизятся требования к квалификации персонала. Возможно использование технологии компьютерного зрения и дополненной реальности и в процессе самого ремонта в виде подсказок что делать, какой инструмент использовать, какие параметры должны быть выставлены. В настоящее время совокупность технологий компьютерного зрения и дополненной реальности уже используется в промышленности, в т.ч. при техническом обслуживании самолётов. Активно развиваются эти технологии для военных. Есть все предпосылки для внедрения этой технологии в локомотиворемонтных депо [288].

6.2.6 Автоматизированная система идентификации оборудования

Прикрепляемые к оборудованию метки (Radio Frequency Identification и их разновидность Near Field Communication) уже нашли широкое применение в промышленности и торговле для идентификации отдельных объектов или групп объектов [288]. Принцип действия RFID и NFC меток достаточно прост: стационарная или переносная антенна посылает радиосигнал, который наводит ЭДС в RFID-метке, полученным напряжением запитывается микросхема (радиоответчик), которая шлёт в ответ свою информацию. Радиус действия RFID-меток – десятки метров, NFC-меток до 10 см. С 2000-го года RFID-метки используются и на подвижном составе, известные как система автоматической идентификации подвижного состава (САИПС, по-прежнему часто используется первое название этих меток «Пальма»). На НЭВЗ RFID-метки временно крепятся на остовы тяговых электродвигателей (ТЭД), что позволяет контролировать наличие изготавливаемого оборудования в цехе или на складе. Для депо применение RFID-меток неудобно, т.к. велика вероятность ложной идентификации оборудования, находящегося рядом с нужным. Гораздо удобней использовать NFC-метки, радиус действия которых ограничен несколькими сантиметрами. Использование обычных штрих-кодов затруднено из-за их неустойчивости к климатическим условиям эксплуатации. NFC-метки имеют самые разные исполнения, что делает их применение очень технологичным. Используемые в депо АСУ на базе пакета программ 1С уже имеют функцию автоматического ввода уникального номера изделия в систему [288].

6.2.7 Дистанционные средства связи

Для достоверности данных в АСУ ответственные работники (мастера, диспетчеры, сами рабочие) должны вводить данные в систему либо со своих персональных компьютеров, либо с терминалов общего пользования, что может создавать неудобства из-за необходимости отвлечения от работы [288]. Целесообразно наличие у работника переносных планшетов или других устройств для дистанционной передачи данных, что позволит не тратить время на малопродуктивные перемещения. Опыт показал, что рабочие могут легко отмечать выполнение работ со Smart-телефонов, если объём вводимой информации небольшой: выполнено/не выполнено, краткие комментарии и даже фотографии. Аналогично может поступать и мастер: работа принята/не принята. Но для более полной работы (формирование плана работ, распределение нарядов и др.) отказ от стационарного автоматизированного рабочего места нецелесообразен [288].

6.2.8 Контроль дислокации работников

Это направление работ можно считать «модным»: дать каждому работнику какое-то наручное устройство («часы»), которое позволяло бы контролировать место нахождения работника. Технология достаточно развитая и её внедрение не представляет проблем. Более проблематичным является ношение таких «часов», т.к. создаёт неудобства в работе слесаря. Опыт показывает, что контроль местонахождения слесаря на локомотиве, где выполняется наряд, может быть полезен, т.к. в ряде депо имеет место практика использования слесарей, выполняющих планово-предупредительные работы, на неплановых ремонтах в ущерб основной работе [288].

6.2.9 Аддитивное производство

Технологии послойного наращивания и синтеза объектов (изделий) начали активно развиваться в 90-е годы 20-го века на основе самых разных принципов работы. Поэтому используемый сейчас термин 3D-принтер может касаться самых разных технологических решений аддитивного производства: лазерное плавление или стереолитография, селективное лазерное спекание, электронно-лучевая плавка, наплавление ленты, ламинирование и др.

В Индустрии 4.0 считается перспективным внедрение 3D-принтеров [288]. Применительно к ремонту локомотивов – это печать запасных частей, особенно редко отказывающих или снятых с производства. Идея казалась перспективной: 3D-принтеры действительно являются одним из прорывных направлений развития цифровых технологий. Но эта технология оказалась, как минимум, преждевременной: медленная работа 3D-принтеров (до 10 часов на деталь), низкая прочность деталей, высокая стоимость обслуживания самих принтеров показали нецелесообразность в настоящее время применения этой технологии в локомотивных депо [288].

6.2.10 Дроны (квадрокоптеры).

Беспилотные летательные аппараты с online информационным обменом – не менее бурно развивающееся направление, чем предыдущие. Применение дронов невероятно широко. Можно представить место дронов и в локомотивном депо, например, для контроля дислокации локомотивов в депо, сбор данных в цехах и на территории для цифрового двойника, инспекция и др. Эффект – повышение управляемости, экономия времени. Скорее всего со временем дроны смогут появиться и начать приносить пользу, т.к. темпы развития этого направления цифровизации очень высокие [288]

6.2.11 Голосовой помощник

В последние годы находят широкое применение голосовые помощники, самыми популярными из которых следует считать «OK Google» и «Алиса» [288]. Это как правило самообучаемые системы распознавания речи с последующей интерпретацией сказанного и выполнением команды. Голосовые помощники уже устойчиво работают как поисковые информационные системы, выполняют бытовые команды (включить музыку, включить/выключить электропитание и т.д.). Можно легко себе представить, как такая система могла бы помогать мастеру ускорять управление нарядами, или помогать слесарю подсказками в выполнении обслуживания и ремонта. Например, отвечая на вопросы «Какой допуск на зазор?», «Какое усилие зажатия болтов?» и др. Голосовой помощник наряду с компьютерным зрением и дополненной реальностью может существенно поднять качество ремонта. Трудно переоценить роль голосового помощника и в управлении

локомотивом при ведении поезда. Частично голосовой помощник уже внедрён в МСУ типа САУТ-ЦМ и УСАВП [288].

6.2.12 Результаты анализа применимости методов четвёртой промышленной революции

- 1 Система управления жизненным циклом локомотивов должна строиться как автоматизированная киберфизическая система (АСУ ЖЦЛ) согласно структуре, приведённой на рисунке 6.3.
- 2 Аппаратно-программной платформой АСУ ЖЦЛ должна быть типовая технология Интернет, включая её передовые технологии: работа с большими данными, облачные технологии и др. (первый уровень АСУ по рисунку 6.3).
- 3 Большинство методов и принципов, предлагаемых в рамках Четвёртой промышленной революции (Интернет вещей, Компьютерное зрение и др.), применимы для реализации АСУ ЖЦЛ (второй уровень АСУ по рисунку 6.3). Преждевременной является технология 3D-печати и ряд других.
- 4 Автоматизированные системы технического диагностирования (встроенные, бортовые, стационарные и переносные) могут рассматриваться как важный элемент Интернета вещей (датчики), так и как «Специализированные технические решения» АСУ ЖЦЛ (третий уровень АСУ по рисунку 6.3).
- 5 Необходимо описать технологические процессы АСУ как отдельный этап работ – четвёртый уровень по рисунку 6.3 (приведено далее в настоящем подразделе).
- 6 Необходимо описать интеллектуальную составляющую АСУ ЖЦЛ как пятый уровень структуры АСУ (рисунок 6.3).
- 7 АСУ жизненного цикла локомотива полностью соответствует понятиям АСУ технологического процесса (АСУ ТП) при построении как киберфизической производственной системы.

6.3 ЦИФРОВОЕ SMART-ПРОИЗВОДСТВО

На рисунке 6.3 показана пирамида технологических уровней АСУ как киберфизической системы, вершиной которой являются аналитические функции системы поддержки принятия решений (СППР), по отношению к которым часто используется термин «Умное производство» («Smart Factory», «Smart Manufacturing»), выделенное как отдельное понятие в 2008 году [217, 395, 288]. Принципиальных отличий этого понятия от CPPS нет и скорее является популяризацией новых технологий. Перевод термина «Smart» как «Умный» не совсем удачно и приводит к субъективно неправильному трактованию Smart-технологий (более точный перевод был бы «Интеллектуальная система», «Система поддержки принятия решений», и др.). Более точными терминами представляются «АСУ», «АРМ» и др. Наиболее точное название – «Киберфизическая система», однако термин «Умный» устойчиво используется в литературе. Аналогично в 60-е годы были популярны термины «Искусственный интеллект» (Artificial Intelligence - AI), «Искусственный разум», приведшие к преждевременным спорам о состязании человека с роботом. Положительным результатом стало описание трёх законов робототехники, предложенных фантастом Айзеком Азимовым в 1942-м году и проходившим через всё его творчество. В конце 20 века Япония – один из лидеров в области робототехники – узаконила эти три правила. Термин Smart-производство далее будет рассматриваться как вершина пирамиды технологий CPPS (рисунок 6.3): программная автоматизация собственно процессов управления, а понятия «Smart-депо», «Умное депо», «Цифровое депо» - как синонимы. А, чтобы не путать рассуждения о будущих кибернетических проблемах человечества (как у Айзека Азимова) с реальными технологиями, в технической литературе появились соответственно понятия малых и больших интеллектуальных систем (Small & Large Artificial Intelligence Projects). Для малых AI функция АСУ заключается в следующем: по заложенным в программном обеспечении алгоритмам выполнить анализ имеющейся в системе управления базами данных (СУБД) информации и по результатам анализа выполнить одно или несколько из следующих действий [280, 299, 288]:

- 1 Предоставить доступ к вводу и/или выводу информации в/из СУБД согласно имеющимся у пользователя правам («доступность информации»).

- 2 Запретить доступ к вводу и/или выводу информации из СУБД при отсутствии прав («защита информации»).
- 3 Автоматически заблокировать неправильное действие: обычно используется при вводе информации. Прежде всего – это форматный контроль по допустимости значений. Например, толщина бандажа колёсной пары не может быть 300 мм. Далее логический контроль. Например, если предыдущий замер бандажа был 73 мм, то следующий замер не может быть 75 мм. Логический контроль предполагает использование и гораздо более сложных алгоритмов.
- 4 Формирование отчётов (по запросу или периодических) с сохранением их в СУБД и выдачей по запросу или рассылке. При этом в понятие «отчёт» может вкладываться не просто SQL-выборка, а сложные логические и математические вычисления.
- 5 Мониторинг данных с целью выявления трендов и формированием тревожных сообщений в случае обнаружении инцидента – любой ситуации, отличной от нормальной.

Применительно к системе управления жизненным циклом, интеллектуальные функции АСУ должны решать следующие основные задачи [84, 285]:

- 1 **Мониторинг** эксплуатации локомотивов с контролем их исправности (по данным АСУЖТ), пробега и др. Расчёт прогнозного объёма ремонта с целью планирования ремонтных позиций, технологического оборудования, трудовых ресурсов и др. Планирование размещения заказов на ТОиР между сервисными локомотивными депо и локомотиворемонтными заводами. Расчёт ожидаемого годового, квартального и месячного плана ТОиР с целью планирования потребных тяговых ресурсов для ОАО «РЖД» и ресурсов сервисных компаний для их ТОиР. Формирование трёхсуточного плана постановки на ТОиР с целью планирования отцепки претендентов на ТОиР («снятие с кольца»), подвязка претендентов на ТОиР под поезда в сторону сервисных локомотивных депо. Суточное планирование: постановка на ТОиР. Задача СППР мониторинга решается в рамках АСУ ТОиР и подробно рассмотрена в научных работах А. А. Аболмасова [1], И. И. Лакина [152], И. В. Пустового [235] и др.: задача теоретически решена.

- 2 **Диагностика.** Определение технического состояния локомотива, локализация места возможного отказа, расчёт остаточного ресурса по данным автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) [271]. Формирование объёма планово-предупредительных, сверхцикловых и неплановых работ ТОиР. Задача решается в рамках разработки системы диагностирования каждого вида оборудования и узла: это совокупность задач, причём решаемая как применительно к железнодорожному подвижному составу, так и в промышленности в целом. Например, задачи диагностирования подшипников, дизеля, электрических аппаратов, электрических машин являются типовыми для всех промышленных систем.
- 3 **АСУ ТП.** Управление технологическими процессами (ТП) производства и ТОиР локомотивов. Типовая и специализированная MES и ERP функциональность АСУ. Управление производством, заработной платой, работой бухгалтерии, кадров, склада, других подразделений заводов и депо. Эта задача решена в группе компаний «ЛокоТех»: созданы АСУ сервисных локомотивных депо и АСУ локомотиворемонтных заводов. Аналогичные системы создаются на локомотивостроительных заводах. Задачи решаются на базе унифицированных пакетов программ: 1С, SAP R/3 и др.
- 4 **Логистика МТО.** Управление материально-техническим обеспечением (МТО) заводов, депо и пунктов технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ). Прогнозирование потребности в запасных частях и материалах. Оптимизация транспортных потоков МТО. В литературе известно несколько способов оптимизации логистического управления [235], в основе которых лежит, как правило, математический аппарат теории массового обслуживания и теории очередей. На железнодорожном транспорте эта задача пока не решена.
- 5 **Управление КЖЦ.** Расчёт показателей, предусмотренных в контракте жизненного цикла локомотивов (КЖЦ) для расчётов с заказчиком (ОАО «РЖД»), анализом мест возникновения потерь. По сути, автоматизируется учёт работы локомотивов, наличия отказов по категориям, автоматический расчёт коэффициента технической готовности (КТГ) и коэффициента готовности к эксплуатации (КГЭ). Часто эту задачу называют «Электронный контракт жизненного цикла». Автоматизация управления КЖЦ пока не решена. Главная

проблема – не формализован процесс отнесения ответственности за простой локомотива на неплановом ТОиР между ОАО «РЖД» и сервисными компаниями. Например, поломка пантографа может быть из-за плохого состояния контактной сети, нарушения режима его эксплуатации, некачественного ТОиР или конструкционных недостатков.

- 6 **Управление ЖЦЛ.** Анализ стоимости жизненного цикла каждого локомотива, серии локомотива на полигоне, всей серии, всего парка. Анализ надёжности локомотивов, причин её снижения, выявление способов повышения надёжности локомотивов, их эксплуатационных характеристик. Это, собственно, и есть основная интеллектуальная функция управления, где должны быть реализованы наиболее сложные математические методы управления. В настоящее время эта задача решается многофакторным анализом с применением специального программного обеспечения (например, проектирование кубов данных в SAS).
- 7 **Прогноз выдачи локомотива после ТОиР.** В существующей планово-предупредительной системе ремонта время проведения ТОиР строго регламентировано в зависимости от его объёма: ТО-2, ТО-3, ТР-1, ТР-2 и др. При переходе на ремонт с использованием данных АСТД время выдачи локомотива становится изменяющимся в зависимости от объёма дополнительных работ. Необходимая разработка математического аппарата для решения этой задачи описана в разделе 5.
- 8 **Совершенствование эффективности эксплуатации локомотивов.** Многофакторный анализ статистики жизненного цикла локомотивов с выявлением закономерностей, трендов, источников потерь, основных затрат, причин низкой надёжности и др. Формирование многомерных массивов данных на основе СУБД ЖЦЛ (OLAP-кубы, On-Line Analytical Processing – интерактивный анализ данных). Принятие среднесрочных и долгосрочных решений по совершенствованию локомотивного комплекса с целью повышения эффективности эксплуатации локомотивов.

6.4 КИБЕРФИЗИЧЕСКАЯ РЕМОНТНАЯ ПОЗИЦИЯ

В результате анализа современных киберфизических подходов к организации производства [235] применительно к АСУ ТОиР автором предложено в основу технологического подхода к ремонту локомотивов заложить принцип «Универсальная ремонтная позиция» (УРП), реализующая принципы внутренней интероперабельности (рисунки 6.4 и 6.5), начиная от приёмки локомотива на ТОиР, его диагностирования и формирования списка замечаний по техническому состоянию, (электронный журнал ТУ-28), формирования объёма и плана выполнения работ, управление собственно технологическими процессами ТОиР, и до автоматизированного формирования протокола допуска локомотива в эксплуатацию.

Для реализации CPPS-технологий: основное оборудование УРП оснащено микропроцессорными системами управления, которые позволяют дистанционно их программировать и в ответ получать диагностическую информацию: объёмы и продолжительность выполненных работ, данные об исполнителе, диагностические параметры, расход электроэнергии и др. [296].

Всё оборудование, включая бортовые микропроцессорные системы управления (МСУ) локомотивов [296, 298], объединены в единую информационно-управляющую систему по принципам CPPS. Планирование объёма ремонта ведётся индивидуально для каждой секции, причём начинается ещё в поездке по данным МСУ и продолжается по данным деповских стационарных и переносных автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД). Таким образом, ещё до постановки локомотива на ремонтную позицию формируется индивидуальный объём ремонта для каждой секции, заранее планируются ресурсы, в т.ч. набор запасных частей и материалов («корзина»), трудовые ресурсы. Планируются логистически-складские операции, работа вспомогательных цехов.

Конкретный состав оборудования УРП определяется для каждой серии локомотивов с учётом правил ремонта серии, статистики отказов и дополнительных работ. В разделе 7 описан состав УРП применительно к электровозам переменного тока производства НЭВЗ серий 2ЭС5К и 3ЭС5К, эксплуатируемым на Восточном полигоне ОАО «РЖД».

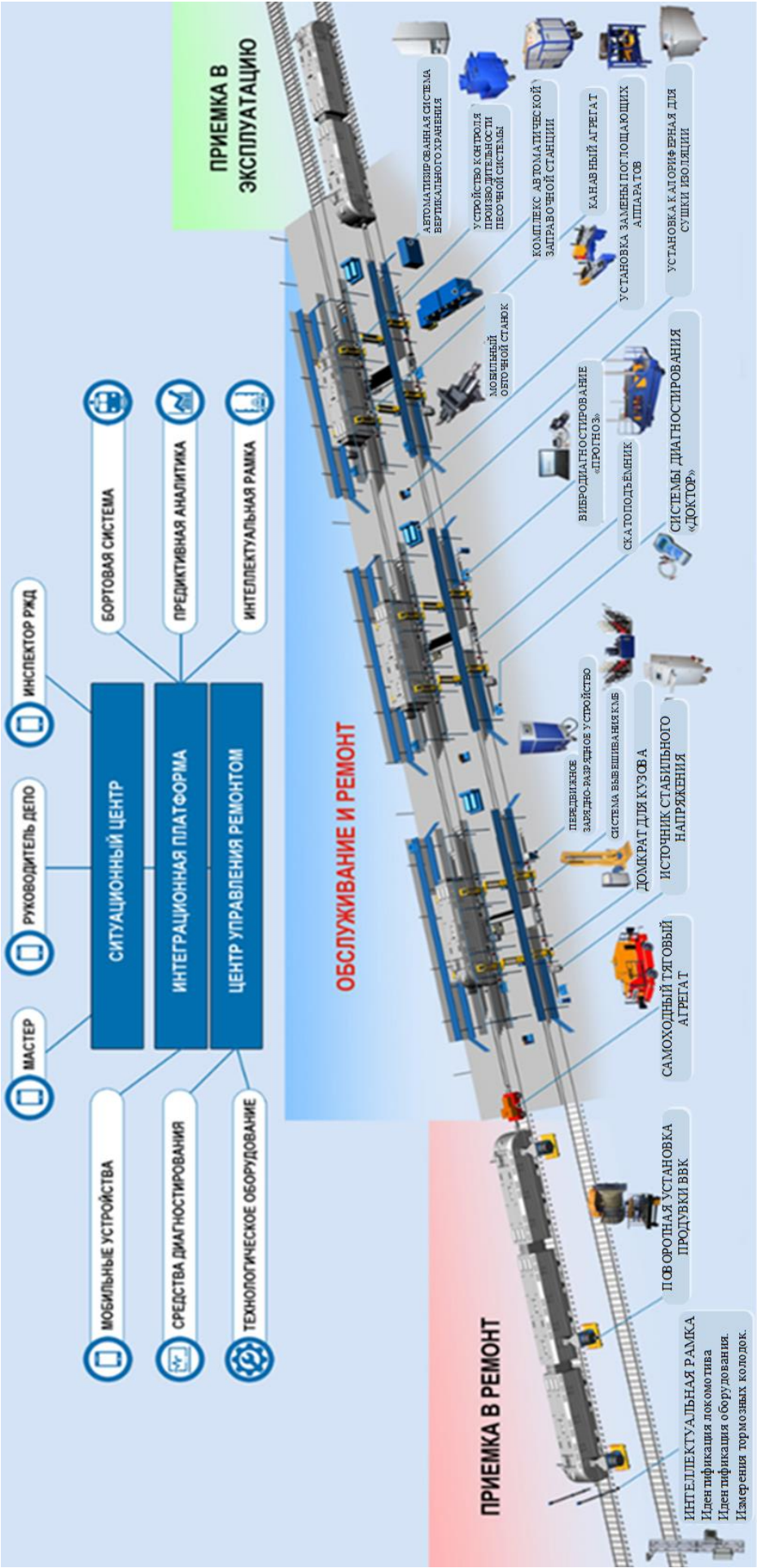


Рисунок 6.4 - Структура цифровой универсальной канавы

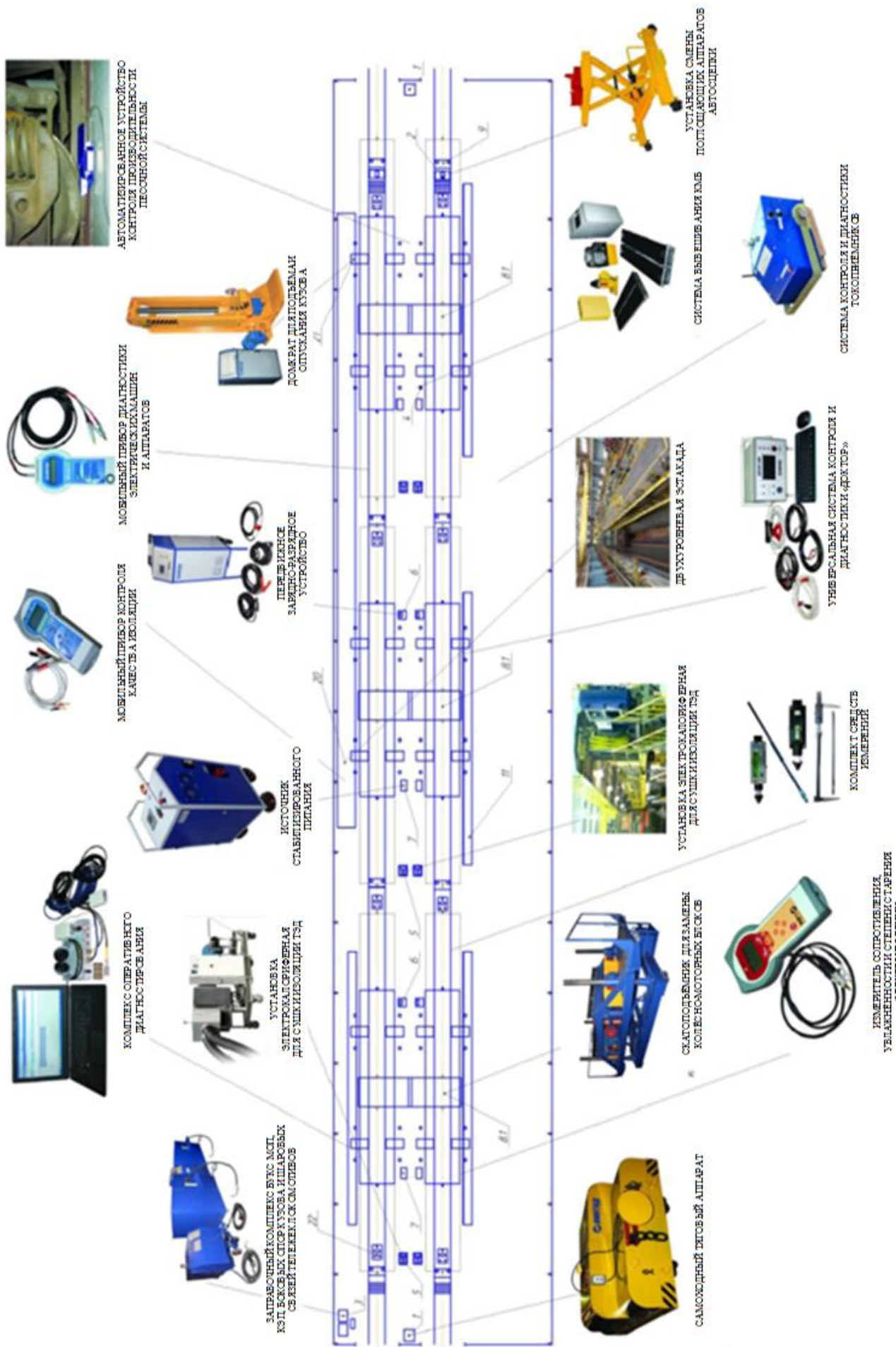


Рисунок 6.5 - Структура средств автоматизации цифровой универсальной канавы

Вся информация о техническом состоянии локомотива имеет единую точку входа: электронный журнал замечаний (аналог бумажного журнала формы ТУ-28). Важно, что фиксируются не только отказы и предотказы, а все инциденты: ситуации, отличные от нормальной работы локомотива. Например, машинист неправильно пытался войти в режим рекуперативного торможения, вход не произошёл, и машинист оставил запись в бортовом журнале формы ТУ-152 [278]. Отказа не было. Но был инцидент, который, согласно требованиям стандарта ITIL, должен быть отработан: проверен электрический тормоз, проведена учёба машиниста. В ТУ-28Э попадает как субъективная информация (из бортового журнала, по результатам визуальной приёмки), так и объективная с систем технического диагностирования. Информация в ТУ-28Э – основание для планирования дополнительных сверхцикловых работ. Именно поэтому ведение ТУ-28Э должно быть не за мастером, заинтересованным в большем объёме работ, а за диспетчерским центром ремонта.

Назначение работ также желательно осуществлять в диспетчерском центре, но для этого в современных депо нет компетенции. Поэтому эта функция остаётся за мастером. После назначения полного списка работ, мастер также в компьютере назначает работы конкретным исполнителям, до этого уже зарегистрированным как пришедшим на работу. После этого автоматизировано формируется сетевой график ремонта (диаграмма Ганта), по которому в дальнейшем контролируется процесс ремонта. При этом необходимо решать задачу определения времени окончания ремонта, описанную в разделе 5.

Закрытие нарядов происходит с использованием средств диагностирования, подтверждающих качество ремонта. В качестве вспомогательного средства могут использоваться индивидуальные камеры и устройства контроля дислокации слесарей, подтверждающие факт выполнения работ. Закрытие работ возможно через терминалы, установленные в цехах, и с использованием Smart-телефонов или специализированных устройств. Факт включения и работы оборудования также позволяет повысить достоверность информации о выполнении работ. Таким образом, вероятность некачественного выполнения работ сводится к минимуму [296]. Результатом всей цепочки операций является автоматическое формирование паспорта ремонта, служащим основанием для приёмки локомотива на линию.

6.5 ВНУТРЕННЯЯ ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТЬ

На рисунке 6.1 фактически показана внешняя интероперабельность АСУ ТОиР, которую предлагается реализовать через СУБД «Жизненный цикл локомотива». На рисунке 6.6 показана внутренняя интероперабельность системы с элементами внешней интероперабельности.

Основой системы является АСУ ТОиР, реализуемая на базе типового пакета программ, позволяющего реализовать функции управления предприятием (ERP-функции) и функции планирования (MES-функции). В группе компаний «ЛокоТех» - это АСУ «Сетевой график» на базе платформы 1С.

Как отмечалось ранее, элементы автоматизации управления на этапе третьей промышленной революции формировались независимо друг от друга. Системы идентификации оборудования, автоматизированные системы технического диагностирования (АСТД) [271, 288], бортовые микропроцессорные системы управления локомотивов (МСУ), станки с ЧПУ – всё это и много другое разрабатывалось независимо друг от друга на различных аппаратно-программных платформах. Задача технологии «Интернет вещей» – объединить всю эту информацию в единое киберфизическое информационное пространство, осуществить внутреннюю интероперабельность. В подразделе 6.1 показано, что решить эту задачу можно через создание системы управления базами данных (СУБД) «Жизненный цикл локомотива», аккумулирующую информацию из всех информационных систем, связанных с жизненным циклом локомотива: внешние (системы проектирования и производства локомотивов, АСУЖТ) и внутренние (системы диагностирования, деповской интернет вещей, АСУ-ТП и др.).

Быстрая смена поколений информационных систем, постоянное развитие технологий Интернет и др. не позволяют создать универсальную систему управления сервисным локомотивным депо. Структура оборудования локомотива, требования к их параметрам, методы диагностирования, наоборот, – достаточно консервативные параметры. Таким образом, интероперабельность системы управления жизненным циклом локомотивов должна формироваться как алгоритмы взаимодействия участников жизненного цикла локомотивов с СУБД «Жизненный цикл локомотива».

Рисунок 6.6 – Внутренняя интероперабельность АСУ ТО ИР

6.6 МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ

При реализации системы управления жизненным циклом локомотивов следует использовать методы, разработанные за последние десятилетия и предлагаемые для управления производственными процессами. В подразделе дана краткая характеристика этих методов и особенности их применения в разрабатываемой системе управления жизненным циклом локомотивов (АСУ ЖЦЛ).

Примечание: в настоящем подразделе не приводится полное описание методов управления качеством, а только описаны основные способы их учёта в киберфизической модели АСУ ЖЦЛ. Следует отметить, что различные методики сильно пересекаются, например, принцип постоянного улучшения есть во всех методических подходах, но под разными названиями.

6.6.1 Системы управления качеством продукции

Научная система управления производством, организации труда и менеджмента была заложена в самом конце 19-го века – в начале 20 века Фредериком Тейлором [158]. В. И. Ленин хоть и предвзято, но точно определил суть «Тейлоризма»: «научная система выжимания пота», которая объединяет научные достижения «в деле анализа механических движений при труде, изгнания лишних и неловких движений, выработки правильнейших приёмов работы, введения наилучших систем учёта и контроля». Принципы Тейлоризма (научная организация труда, подбор кадров, мотивация труда, сотрудничество работников с администрацией, справедливое распределение обязанностей) остаются актуальными и должны использоваться в АСУ ЖЦЛ.

Генри Лоренц Гантт – последователь и главный ученик Ф. Тейлора, в начале 20-го века предложил ряд важных практических принципов управления производством. Наиболее известна «диаграмма Ганта», хотя его принципы унификации и планирования производства, обязательного использования технологических карт, обязательной мотивации труда и др. актуальны и сейчас. Важным наследием Г. Гантта следует считать обязательность применения

числовых методов управления производством. Диаграммы Ганта и сейчас являются основой управления производством, в т.ч. в АСУ ЖЦЛ.

Настоящую революцию в области управления качеством продукции в середине 20-го века произвёл Уильям Эдвардс Деминг (Эдвард Деминг) – американский учёный, статистик и консультант по менеджменту, основоположник японской школы управления качеством [15, 100, 158]. Э. Деминг продолжил развивать статистические методы управления предприятием, на основе которого реализовал принцип постоянного улучшения, известный как «цикл PDCA». При безусловном главенстве статистических методов, Э. Деминг предложил принцип глубинных знаний, на основании которого следует понимать физику процессов, первопричины выявленных статистических закономерностей. Наиболее известна теория Вариабельности Э. Деминга [15, 100].

Таким образом, вероятностно-статистические методы должны лежать в основе управления производством и качеством продукции.

Отдельно следует остановиться на «14 принципах Деминга», представляющими интерес и для АСУ ЖЦЛ:

- 1 «Постоянство цели»: долгосрочное планирование развития производства. Для ТОиР локомотивов, служащих более 30 лет – это актуальный принцип, который должен лежать в основе управления жизненным циклом локомотивов. Принцип должен реализовываться через контракт жизненного цикла локомотива (КЖЦ).
- 2 «Новая философия»: применительно к АСУ ЖЦЛ – это переход на киберфизические модели управления производством, чему и посвящена настоящая научная работа.
- 3 «Покончите с зависимостью от массового контроля»: «встроенное качество» должно автоматически обеспечивать высокое качество выполнения ТОиР. Применительно к АСУ ЖЦЛ – это максимально возможное применение автоматизированных систем технического диагностирования для объективной оценки качества выполненного ТОиР с автоматической блокировкой неправильных действий. Встроенное качество – основа киберфизических производственных систем.

- 4 «Покончите с практикой закупок по самой низкой цене». Этот принцип, к сожалению, не соблюдается в системах отечественного сервисного ТОиР: существующая система конкурсных закупок приводит к приобретению самых дешёвых, а значит и самых некачественных комплектующих: закупленные по самым низким ценам электрические щётки, тормозные колодки, провода и др. приводят к снижению надёжности локомотивов, находящихся на сервисном обслуживании.
- 5 «Улучшайте каждый процесс»: в замкнутой системе автоматизированного управления не может быть процессов, не влияющих на конечный результат. Подходы CPPS предполагают реализацию этого принципа.
- 6 «Введите в практику подготовку и переподготовку кадров». При внедрении АСУ немного меняется подход к подготовке кадров, т.к. ИТ-технологии позволяют инкапсулировать информацию в АСУ: исполнителю теперь нет необходимости помнить наизусть все технологические карты, допуски на размеры и др. – всю эту информацию можно получать в режиме online. Но при этом появляется необходимость владеть информационными технологиями и остаётся необходимость в собственно профессиональных навыках.
- 7 «Учредите лидерство». Внедрение АСУ не отменяет наличие на производстве иерархии руководства: бригадир, мастер, старший мастер, заместитель начальника депо по производству. Внедрение АСУ и АСТД только помогают руководителям принимать грамотные объективные решения, исключают возможность ошибки.
- 8 «Изгоняйте страхи». Это принцип очень важен. Практика наказания за плохие показатели заставляет руководителей и работников скрывать информацию. При этом АСУ и АСТД делают эту информацию доступной и объективной. Важно, чтобы информация о техническом состоянии локомотива и качестве выполненных ТОиР использовалась в рамках цикла PDCA, а не в качестве причины сиюминутного наказания.
- 9 «Разрушайте барьеры между подразделениями, службами, отделениями». Этот принцип особенно ярко выражен в технологии Lean Production: все подразделения должны работать на конечный результат (соответствующий

подраздел далее). Наличие отделов рано или поздно приводит к проблеме, что они начинают работать сами на себя, появляются потери первого и второго рода. Внедрение технологии CPPS как единой интероперабельной АСУ способствует выполнению этого принципа на системном уровне.

- 10 «Откажитесь от пустых лозунгов и призывов». Переход на АСУ с точно поставленными ключевыми показателями качества – KPI (Key Performance Indicators) с правильно организованной системой мотивации позволяет отказаться от «лозунгов» и «призывов».
- 11 «Устраните произвольные числовые нормы и задания». Нормирование труда, чёткое следование технологическим картам ТОиР с инкапсуляцией технологии в АСУ ТОиР позволяют реализовать этот принцип.
- 12 «Дайте работникам возможность гордиться своим трудом». Этот принцип в меньшей степени относится к CPPS системам, а больше относится к общей организации ТОиР в сервисных локомотивных депо. В сервисных компаниях есть проблемы с реализацией этого принципа.
- 13 «Поощряйте стремление к образованию». Мотивация труда, подготовка кадров и их образование – большое и очень важное направление работ, также не имеющее прямое отношение к CPPS.
- 14 «Приверженность делу повышения качества и действенность высшего руководства». Это очень важный принцип, без реализации которого невозможно обеспечить качество продукции. Применительно к АСУ ЖЦЛ – качество ТОиР. Хуже того, именно руководитель часто выступает источником нарушения технологии ремонта в силу каких-то субъективных факторов: необходимость сократить смету ТОиР, вовремя выдать локомотив на линию и др. АСУ должна тут сыграть важную роль, разорвав «порочный круг» проблем. Автоматизированное рабочее место руководителя должно быть неотъемлемой частью АСУ ЖЦЛ.

Таким образом, внедрение киберфизических систем управления производством позволяет инкапсулировать в себе основные принципы управления производством и менеджмента качества продукции. В данной работе – это процесс

управления жизненным циклом локомотива в целом и система его ТОиР в частности.

Основной опыт «Гуру» систем менеджмента качества доведён до уровня стандартов, используемых в настоящее время при организации технологических процессов производства. Главные из них – серия международных стандартов ISO 9000, 9001 и 9004, в которых сформулированы требования к обеспечению качества продукции, в т.ч. 8 принципов управления качеством: ориентация на потребителя, лидерство руководителя, вовлечение работников, процессный подход, системный подход, постоянное улучшение, принятие решений, основанное на фактах, взаимовыгодные отношения с поставщиками. Очевидно, что все эти принципы соответствуют подходам Эдварда Деминга.

Особый интерес представляет собой стандарт ISO 9004, предъявляющий требования не к качеству продукции и даже не к качеству технологических процессов, а к наличию системы менеджмента качества (СМК). По сути – это и есть реализация цикла PDCA. В АСУ должна быть предусмотрена автоматизированная технология анализа причин возникновения всех случаев отказов оборудования локомотивов, несоблюдения или нарушения технологии ТОиР с принятием корректирующих мер и постоянным ростом надёжности локомотивов.

Для практического использования методов систем менеджмента качества в ОАО «РЖД» на базе международных разработаны отраслевые стандарты (СТО, СТК и др.) [312 – 331], применение которых в процессе ТОиР локомотивов.

Одна из проблем при внедрении стандартов качества – необходимость обучения персонала и руководителей для получения навыков использования стандартов, соблюдения требований стандартов, отказ от сложившихся традиций и работы по принципу «мы всегда так делали». АСУ в значительной мере позволяет преодолеть проблему методом инкапсуляции принципов управления качеством в аппаратно-программную часть АСУ, автоматическое исключение неправильных действий по принципу «Встроенное качество».

Таким образом, использование стандартов качества, вероятностно-статистических математических методов и методов теории надёжности в сочетании с принципом постоянного улучшения обязательно в АСУ ЖЦЛ.

6.6.2 *Toyota Production System & Lean Production*

Продолжением научно-практических работ Э. Деминга стало создание в Японии на автомобилестроительных заводах Toyota производственной системы «Toyota Production System» [127, 177, 399], авторами которой считаются Сакити Тоёда, Тайити Оно и Сигэо Синго. Основу системы составляют принципы «Канбан» (точно в срок), 7 принципов управления предприятием и принцип быстрой переналадки (Single-Minute Exchange of Dies – быстрая смена пресс-форм). После изучения методов Toyota Production System в США система была доработана, адаптирована и стала известна как Lean Production [400], что не совсем удачно переведено на русский язык как «Бережливое производство», из-за чего ряд изданий предпочитает пользоваться английским названием системы.

Lean Production констатирует, что существуют 8 видов потерь, снижающих эффективность производства. Применительно к АСУ ЖЦЛ это означает:

- 1 Перепроизводство: выполнение ТОиР до исчерпания оборудованием своего ресурса. Применение АСТД и предиктивного ТОиР должно снижать этот вид потерь.
- 2 Ожидание: в разделе 2 показано, что ожидание ТОиР и ожидание работы – одни из главных видов потерь жизненного цикла локомотивов. Уменьшение потерь в процессе ожидания больше связано с организацией эксплуатации локомотивов.
- 3 Ненужная транспортировка: применительно к эксплуатации локомотивов – это вынужденная пересылка локомотивов, применительно к ТОиР – неоптимально выбранные места ТОиР локомотива в целом и его оборудования в частности.
- 4 Лишние этапы обработки: предлагаемая технология «Универсальная ремонтная позиция» по технологии CPPS существенно снижает этот вид потерь, в т.ч. за счёт частичного перехода на предиктивный ремонт по техническому состоянию.
- 5 Лишние запасы. В разделе 4 показано, что главное место этого вида потерь – это пересодержание парка в силу его низкой надёжности. Второй существенный вид потерь более традиционный – избыточное содержание запасных частей на складе. Потери устраняются внедрением CPPS-систем, и применением математического аппарата теории очередей и массового обслуживания.

- 6 Ненужные перемещения. В разделе 7 показано, что при выполнении ТОиР – это существенный вид логистических потерь, который устраняется внедрением предлагаемой киберфизической универсальной ремонтной позиции.
- 7 Дефектная продукция. Некачественный ТОиР приводит к отказам локомотивов на линии, что в свою очередь, как снижает пропускную способность полигонов, так и приводит к пересодержанию парка локомотивов. Главная задача CPPS-системы управления жизненным циклом как раз и есть повышение надёжности локомотивов с оптимизацией стоимости жизненного цикла.
- 8 Интеллектуальные потери. Это вид потерь отсутствовал в Toyota Production System и был дополнен в Lean Production. Для отечественного производства – это существенный вид потерь. Внедрение АСУ освобождает инженерно-технический состав от многочасовой «бумажной работы» с одной стороны, устраняет необходимость контролировать действия персонала с другой, предоставляет оперативные математически обработанные наглядные отчёты для их анализа и принятия решений, с третьей стороны.

Таким образом, принципы «Toyota Production System» и «Lean Production» полностью применимы в системе управления жизненным циклом локомотивов.

Следует отметить, что принципы «Toyota Production System» и «Lean Production» даже более применимы к задачам ТОиР локомотивов, чем к другим производствам, что связано с эксплуатацией и ТОиР различных серий локомотивов различного срока службы с различным оборудованием. Поэтому работа по факту потребного объёма ремонта с быстрой перенастройкой оборудования под нужную серию и вид оборудования с расчётом срока окончания ТОиР (раздел 5) с визуализацией процесса ремонта по индивидуальным графикам, организация рабочих перенастраиваемых рабочих мест по системе 5S – актуальные технологии для ремонтных сервисных локомотивных депо.

Таким образом, реализация принципа «встроенное качество» через инкапсуляцию современных методов управления в аппаратно-программное обеспечение АСУ – один из главных методов повышения надёжности локомотивов, снижения стоимости жизненного цикла локомотивов. В Toyota Production System принцип называется Пока-ёкэ («защита от дурака»).

6.6.3 Пирамида Гейнриха

Рассмотренные ранее принципы обязательного наличия обратной связи, принятия решений на основании фактов, вероятностно-статистического управления и применения теории вариабельности предполагают наличие установленного набора контролируемых параметров. И тут важно учесть принципиальный подход пирамид данных, названных по имени автора, американского учёного Г. Гейнриха (Herbert William Heinrich): проанализировав 550 тыс. несчастных случаев, Г.Гейнрих вывел закономерность ("Пирамида Гейнриха") [1, 387]: на одну тяжёлую травму приходится 29 – 30 несчастных случаев и 300 – 330 инцидентов. В 1931-м году предложено анализировать не частные случаи травматизма, а работать с основанием пирамиды [1, 387]. Методический смысл пирамид Гейнриха: для достижения целевого показателя необходимо контролировать формирующие его факторы согласно принципу глубинных знаний Эдварда Деминга (рисунок 6.7).



Рисунок 6.7 – Пирамида Гейнриха для жизненного цикла локомотивов

Главная задача управления жизненным циклом локомотивов – обеспечить безопасную и надёжную работу железнодорожного транспорта, что в значительной степени зависит от наличия нарушений перевозочного процесса. В свою очередь,

надёжность и непрерывность перевозочного процесса определяется надёжностью и безотказностью технических средств: путевого хозяйства, СЦБ, связи, энергоснабжения подвижного состава. Надёжная работа подвижного состава определяется двумя факторами: соблюдением условий эксплуатации и качественным ТОиР. Таким образом, для обеспечения надёжности железнодорожного транспорта следует контролировать параметры системы ТОиР.

Контракт жизненного цикла локомотивов предполагает контроль коэффициента эксплуатационной готовности локомотивов, наличия отказов первой, второй и третьей категорий, число отказов на 1 млн км [271, 298]. Но для управления этими параметрами АСУ должна контролировать основание пирамиды: соблюдение технологии ТОиР.

Таким образом, для контроля параметров надёжности локомотивов и других показателей контракта жизненного цикла необходимо контролировать не только сами эти параметры (SLA), но и факторы, влияющие на них, основными из которых являются следующие.

- 1 Режимы эксплуатации локомотивов, выполненная работа, наличие нарушений режимов эксплуатации, своевременность постановки локомотивов на ремонт.
- 2 Соблюдение технологии ТОиР. Выполнение операций согласно технологическим картам с использованием предусмотренных запасных частей и материалов.
- 3 Пономерной учёт жизненного цикла линейного оборудования (материалов повторного использования) локомотивов.
- 4 Учёт отказов оборудования локомотивов с разбором причин возникновения отказов: конструктивные, производственные, технологические, эксплуатационные, деградационные и др.
- 5 Анализ эффективности принятых мер по принципу цикла PDCA.

6.6.4 Стандарт сервисного обслуживания электронных систем

Проблемы сервисного обслуживания IT-оборудования привели к созданию библиотеки стандартов ITIL [389, 390]. Положения ITIL отражены и в международном стандарте ISO 20000 [389]. Анализ показал, что принципы управления сервисным обслуживанием ITIL полностью подходят к сервисному обслуживанию локомотивов [184, 301, 302]. ITIL – это библиотека рекомендаций (Best Practice). Для эффективного сервисного оборудования реализуются десять процессов.

- 1 **Управление Инцидентами.** Важное отличие ITIL от известных систем сервисного обслуживания, это ориентация не на отказы, а на инциденты: любую ситуацию, отличную от нормальной, что соответствует и требованиям пирамиды Г. Гейнриха и принципу глубинных знаний Э. Деминга. Это очень важно для обеспечения качества ТОиР. В АСУ «Сетевой график» создан аналог бумажного журнала формы ТУ-28, в котором фиксируются не только обнаруженные отказы или предотказы, но и замечания машинистов, другие инциденты, не обязательно являющиеся предотказами. Каждый из инцидентов должен быть «отработан».
- 2 **Управление Проблемами.** Если первый принцип связан с оперативной работой и организацией ТОиР, то второй принцип предполагает разбор выявленных проблем, анализ типовых ошибок с дальнейшим поиском путей их устранения, что соответствует принципам цикла PDCA Э. Деминга.
- 3 **Управление Уровнем Сервиса.** Основное понятие здесь – это соглашение об уровне Сервиса (Service Level Agreement - SLA), лежащее в основе контракта жизненного цикла. Именно научное обоснование, контроль и развитие SLA – основа этого принципа.
- 4 **Управление Конфигурациями.** Применительно к АСУ ЖЦЛ – это СУБД «Жизненный цикл локомотива», описанный в подразделе 5.1 и формируемый изначально конструкторами и на заводе-изготовителе.
- 5 **Управление Изменениями.** Это внесение изменений в Электронный паспорт локомотива в процессе его эксплуатации и ТОиР.
- 6 **Управление Релизами.** Очень важная функция управления жизненным циклом локомотива, связанная с учётом изменений конструкции локомотива, проведением модернизаций и обновлений. В настоящее время имеются проблемы с учётом изменений конструкции в пределах одной серии локомотива.

Проблемы возникают с сериями, эксплуатируемыми десятки лет и, наоборот, с первыми номерами новых серий. Частая ситуация – несоответствие релиза программного обеспечения МСУ конкретным аппаратным средствам локомотива, несоответствие поставленных запасных частей и др.

- 7 **Управление Затратами.** Этот принцип полностью соответствует принципу управления затратами жизненного цикла локомотивов.
- 8 **Управление Мощностью.** Возможности сервисных локомотивных депо, заводов-изготовителей и локомотиворемонтных заводов должны соответствовать потребностям в локомотивах и в обеспечении их надёжной эксплуатации. Предлагается управлять мощностью через число универсальных ремонтных позиций.
- 9 **Управление Непрерывностью.** Это принцип, собственно, является управлением надёжностью локомотивов и обеспечением безопасности движения поездов.
- 10 **Управление Доступностью.** Должна быть обеспечена доступность ТОиР в объёме и качестве, предусмотренным контрактом жизненного цикла (КЖЦ).

Таким образом, принципы ITIL и ITSM соответствуют потребностям сервисного обслуживания и ремонта локомотивов.

6.6.5 Результаты анализ принципов управления производством

Система управления жизненным циклом локомотивов может и должна соответствовать требованиям международных стандартов в области менеджмента качества, бережливого производства и сервисного обслуживания. Показатели для управления должны подбираться и использоваться по принципу пирамид Г. Гейнриха.

6.7 КИБЕРФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЛОКОМОТИВА

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 эффективности эксплуатации отечественных локомотивов (раздел 2), информационных возможностей современных автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД, раздел 3 [271]) и технико-экономической целесообразности их применения (раздел 4), с учётом особенностей управления ТОиР при индивидуальном планировании по данным АСТД (раздел 5), с использованием современных подходов организации производства как киберфизических производственных систем (раздел 6) предлагается следующая модель управления жизненным циклом отечественных локомотивов (рисунок 6.8) [294, 278].

- 1 В локомотивном хозяйстве создаётся система управления базами данных «Жизненный цикл локомотива» (СУБД ЖЦЛ), в которую по принципам внешней интероперабельности собирается вся информация из всех информационных систем о каждом локомотиве на протяжении всего его жизненного цикла. СУБД не только хранит всю информацию, но и инкапсулирует математические и логические методы работы с ними. Прежде всего, это методы защиты ввода и вывода информации, а также математические методы обработки данных и формирования отчётов: вероятностно-статистические, корреляционные, выявление трендов и закономерностей, методы нейронных сетей, распознавания образов и многие другие.
- 2 На этапе проектирования серии локомотива формируется структура его оборудования, которая закладывается в СУБД ЖЦЛ индивидуально для каждой серии. На этом же этапе определяется система ТОиР для каждого узла и вида оборудования и локомотива в целом, которая также хранится в СУБД [298]. Входными данными для проектирования являются технические требования заказчика, информация жизненного цикла аналогичных изделий.

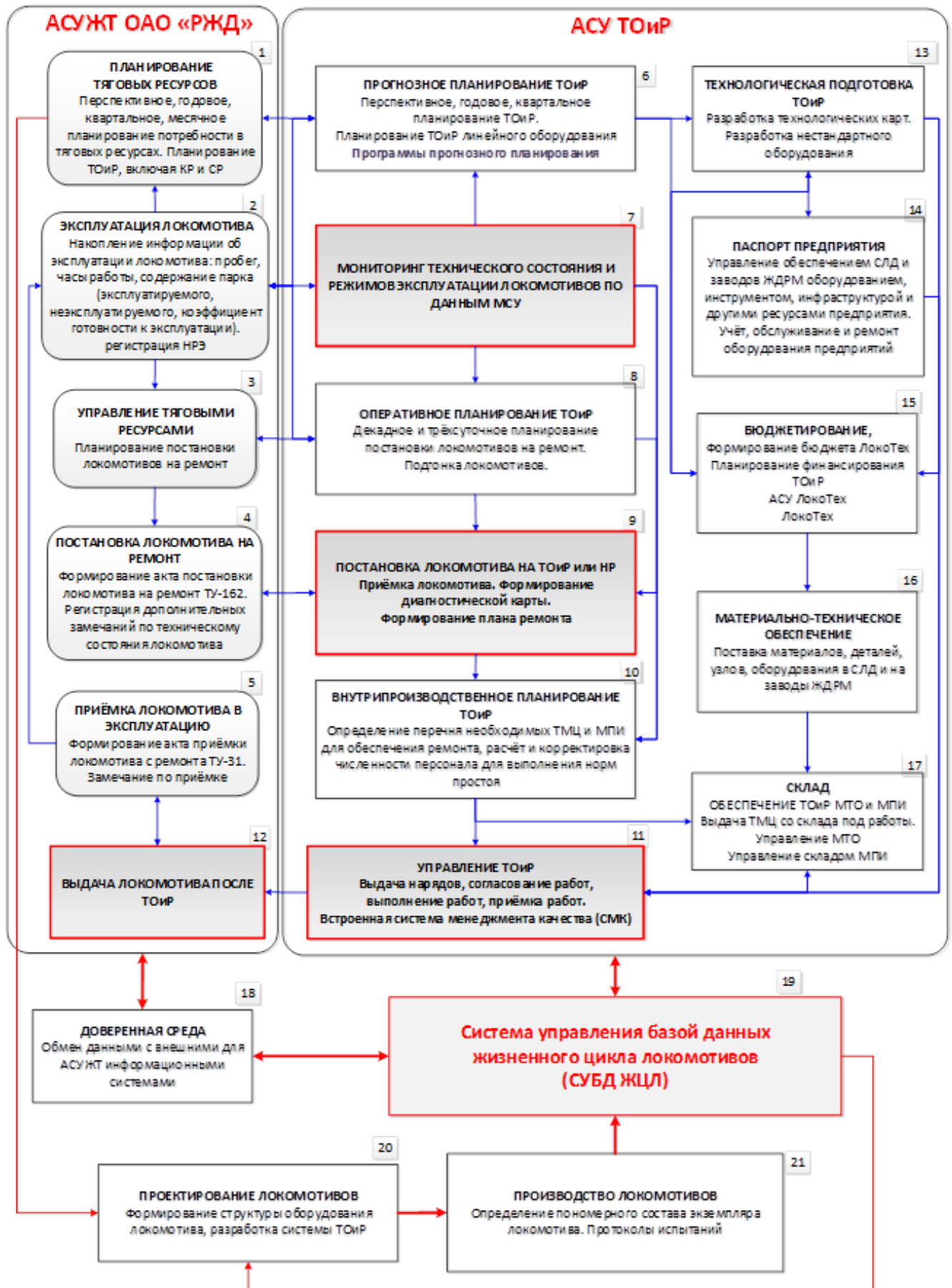


Рисунок 6.8 – Модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием АСТД и индивидуальным планированием ТОиР [298]

- 3 Этап проектирования локомотивов и их оборудования осуществляется с использованием соответствующих средств автоматизации проектирования (САПР) [298]. При этом никаких ограничений на формат используемых данных не накладывается. Наряду с САПР широко используются методы моделирования механической части (метод конечного элемента, интегрально-дифференциальное исчисление и др.), электрической, электромагнитной и др. Все эти методы используются через покупные пакеты программ. Может понадобиться разработка специализированного программного обеспечения для обмена данными между САПР и СУБД ЖЦЛ при формировании структуры оборудования локомотива.
- 4 При изменении конструкции локомотива соответствующие изменения вносятся в СУБД ЖЦЛ (по принципам жизненного цикла конструкторской документации) [3, 298]. Таким образом, единая серия в СУБД ЖЦЛ рассматривается как несколько модификаций серий со своей структурой оборудования и требованиями к ТОиР [3, 298].
- 5 На этапе проектирования локомотива 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 [298]. В случае невозможности или нецелесообразности (например, по стоимости) использования бортовых и встроенных АСТД, предусматриваются деповские стационарные и/или переносные системы, включая испытательные стенды. Планируется технологическое оборудование для ТОиР [298].
- 6 На этапе производства узлов и оборудования локомотива, подпадающего под понятие «линейное оборудование» – по сути все материалы повторного использования) происходит присвоение уникальных номеров, предусматриваются методы автоматического считывания этих номеров, например, при помощи RFID или NFC меток. Регистрируются завод-изготовитель, дата изготовления, параметры оборудования, результаты испытаний. Линейное оборудование после его изготовления сразу заносится в СУБД ЖЦЛ и «проживает» собственный жизненный цикл с регистрацией местонахождения (на складе, на локомотиве, в ожидании ремонта, на ремонте и

др.) и выполненной работы в часах и км. При этом каждый завод производитель может использовать собственные системы САПР и АСУ.

- 7 При изготовлении локомотива локомотивостроительный завод использует собственную АСУ технологических процессов (АСУ ТП) и АСУ с реализацией «классического» набора MES и ERP функциональности. Каждый локомотивостроительный завод в силу исторических особенностей может иметь собственную АСУ ТП, в т.ч. с функциями цифрового двойника, дополненной реальности, поддержки принятия решений и др.
- 8 На этапе изготовления локомотива в СУБД ЖЦЛ создаётся новый экземпляр нужной серии (нужной модификации) локомотива с указанием его номера, и установленного линейного оборудования, которое к этому моменту времени уже внесено в СУБД [298].
- 9 Для обеспечения эксплуатации локомотива ОАО «РЖД» или другая эксплуатирующая организация заключает с производителем локомотивов контракт жизненного цикла (КЖЦ), в котором на основании технических условий на локомотив и его оборудование регламентируется ожидаемая надёжность локомотива, объём и стоимость ТОиР, порядок оплаты сервисных услуг в случае несоблюдения заданных параметров локомотивов [298]. SLA (Service Level Agreement) – основа КЖЦ, которая должна быть заложена в СУБД ЖЦЛ для автоматизации расчёта показателей SLA и автоматизации расчёта между эксплуатирующей организацией и сервисной компанией. Также оговаривается порядок поступления данных в СУБД ЖЦЛ. На этом этапе может разрабатываться специализированное программное обеспечение для информационного обмена между АСУЖТ и СУБД ЖЦЛ.
- 10 При поступлении в эксплуатацию локомотив и его линейное оборудование согласно законодательству РФ ставятся на хозяйственный (бухгалтерский) учёт в соответствующей информационной системе (в ОАО «РЖД» - это ЕК АСУФР на базе пакета программ SAP R/3) [298]. Информация хозяйственного учёта должна быть синхронизирована с данными СУБД ЖЦЛ на всём этапе эксплуатации и утилизации локомотива, для чего может потребоваться специализированное программное обеспечение.

- 11 В ОАО «РЖД» в информационных системах АСОУП, ГИД «Урал», ИСУЖТ и др. ведётся оперативный контроль и управление перевозочным процессом, при котором фиксируется составность поезда, его масса и длина, используемые локомотивы [298]. По локомотивам также ведётся учёт их текущего состояния согласно классификатору АСОУП. Таким образом, по каждому локомотиву имеется информация о его дислокации, выполненной работе (в км и тонно-км брутто), техническом состоянии (исправен / не исправен) [298]. При внедрении системы учёта расхода топлива и электроэнергии АСИМ дополнительно используется возможность учёта работы локомотива в кВт·ч. Вся эта информация должна быть передана в СУБД ЖЦЛ по каждому локомотиву с помощью специализированного программного обеспечения.
- 12 Одновременно с учётом работы локомотива по данным встроенных и бортовой систем технического диагностирования через микропроцессорную систему управления (МСУ) локомотива и принятую систему передачи данных на стационарный сервер передаются диагностические параметры локомотива как в виде исходных данных датчиков, так и обработанные на борту в виде кодов ошибок (неисправностей, инцидентов) [298]. Диагностические данные обрабатываются на специализированном сервере с передачей в СУБД ЖЦЛ обработанных данных о техническом состоянии локомотива и возможных ТОиР. На этом этапе происходит разработка алгоритмов диагностирования с использованием логических и самых разнообразных математических методов. Наряду с этапом моделирования, где используются сложные математические методы, на этом этапе следует разработать комплекс математических методов.
- 13 Кроме объективной информации бортовой АСТД фиксируется субъективная информация машиниста о работе локомотива и возникших инцидентах – любых ситуаций, отличных, по мнению машиниста, от нормальной работы [298]. Информация фиксируется в бортовом рукописном журнале (форма ТУ-152), который должен быть заменён на электронный журнал ТУ-152Э [298]. В качестве ТУ-152Э может выступать как отдельный планшетный компьютер, индивидуально выдаваемый каждому машинисту в поездку, так и уже имеющийся в кабине машиниста бортовой компьютер (блок индикации). Информация машиниста должна поступать на стационарный сервер аналогично

информации от АСТД. Для автоматизации учёта замечаний машиниста необходим классификатор замечаний, совместимый со структурой оборудования локомотива.

- 14 В СУБД ЖЦЛ периодически формируется среднестатистическая информация о пробеге и работе локомотивов, их надёжности и стоимости жизненного цикла [298]. По этим данным и согласно регламентам ТОиР серий проектируется или корректируется на долгосрочную перспективу (три года и более) система ТОиР, планируется распределение ТОиР по сервисным локомотивным депо (СЛД) и ремонтным заводам. Планируются закупки технологического, диагностического и испытательного оборудования в депо, обучение и подготовка ремонтного персонала [298]. На этом этапе наряду с вероятностно-статистическими методами используются методы теории очередей и массового обслуживания. Возможно логистическое моделирование с целью выбора оптимальных схем снабжения.
- 15 Информация по предыдущему пункту также является основой для предварительного планирования объёма ТОиР на год, квартал и месяц [298]. Информация является прогнозной вероятностно-статистической, от её точности зависит как сокращение пересодержания склада, так и сокращение простоя локомотивов из-за отсутствия запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП). Важно применение современных математических методов теории очередей и массового обслуживания. Одновременно решается логистическая задача обеспечения складов локомотивных депо и пунктов технического обслуживания запасными деталями и материалами, в т.ч. с организацией региональных промежуточных буферных складов. Информация формируется и используется в рамках АСУ ТОиР сервисной компании [298].
- 16 Фактическая информация о пробеге локомотивов, наличии отказов и предотказных состояний является основанием для трёхсуточного планирования постановки локомотивов на ремонт, которое осуществляют Центры управления тяговыми ресурсами ОАО «РЖД» (ЦУТР) совместно с диспетчерским аппаратом дорожных центров управления перевозками (ДЦУП), региональной дирекцией тяги и сервисной компанией [298]. Сформированный, согласованный и утверждённый трёхсуточный план передаётся в СУБД ЖЦЛ как прогнозный. На этом этапе необходимо оперативное поступление информации из АСУЖТ о

текущем пробеге локомотивов и трёхсуточный график постановки на ремонт из ЦУТР ОАО «РЖД».

- 17 На основании трёхсуточного графика постановки локомотивов на ТОиР, диагностических данных бортовых систем диагностирования и замечаний машиниста, регламента проведения ТОиР формируется предварительный объём ремонта с учётом имеющейся статистики дополнительных работ, подготавливаются материалы на складе, планируются трудовые ресурсы, станковое, технологическое оборудование, деповская диагностика [298].
- 18 В СУБД ЖЦЛ ведётся учёт работы линейного оборудования, срока его службы. При необходимости на очередном ремонте планируется замена выработавшего свой срок узла на новый согласно требованиям КЖЦ. исходная информация хранится в АСУ ТОиР и передаётся в ЕК АСУФР в АСУЖТ ОАО «РЖД».
- 19 Отцепка локомотива от поезда происходит согласно трёхсуточному графику и факту наличия локомотива на станции, где находится ремонтное локомотивное депо [298]. После отцепки дежурный по эксплуатационному депо переводит в АСОУП поезд в состояние «Ожидание ремонта». Информация автоматически попадает в СУБД ЖЦЛ. В АСУ ТОиР отмечается заход локомотива в депо, начинается приёмка локомотива. В СУБД ЖЦЛ фиксируется плановый и фактический заходы в депо для совершенствования системы планирования.
- 20 Приёмка локомотива на ТОиР осуществляется совместно представителями эксплуатационного и сервисного локомотивного депо. Визуальная приёмка должна быть дополнена анализом данных бортовых АСТД и машиниста, накопленные в процессе эксплуатации с момента последнего ТОиР [298]. Имеющая в настоящее время визуальная приёмка должна быть дополнена как средствами дополненной реальности, так и объективными данными систем диагностирования: реостатных испытаний для тепловозов, проверки изоляции тяговых электродвигателей и электрических аппаратов и др. Результатом приёмки локомотива на ТОиР должен стать электронный журнал ТУ-28Э АСУ ТОиР, в котором фиксируются все выявленные инциденты (в т.ч. отказы и предотказы) [298]. В процессе ремонта ТУ-28Э может быть дополнен выявленными скрытыми дефектами. ТУ-28Э – основание для формирования

индивидуального объема ТОиР для каждой секции. Формирование списка замечаний по каждой секции локомотива осуществляет диспетчерский аппарат сервисного локомотивного депо в электронном виде в АСУ ТОиР (у группы компаний «ЛокоТех» - это АСУ «Сетевой график» на платформе 1С). Все результаты фиксируются в АСУ ТОиР. На этом этапе используются данные всех доступных видов АСТД с их собственными базами данных и математическим аппаратом технического диагностирования. Диагноз передается в АСУ ТОиР для принятия решения об объеме ТОиР и потребных ресурсах.

- 21 Манёвры локомотивов по депо осуществляются с помощью самоходного тягового агрегата (например, агрегат производства НИИТКД), что устраняет потери в ожидании маневрового локомотива. Исключается потребность в машинисте. В АСУ ТОиР в логистической схеме фиксируются выполненные манёвры, на основании которых в СУБД ЖЦЛ выполняется анализ логистических потерь с целью дальнейшего сокращения времени простоя локомотивов на ТОиР, в т.ч. и за счёт инвестиций в развитие инфраструктуры депо [298].
- 22 В зоне приёмки локомотива концентрируются различные диагностические устройства, автоматически передающие результаты диагностирования в АСУ ТОиР для формирования индивидуального плана ремонта каждой колёсной пары. При диагностировании локомотива в процессе приёмки рекомендуются к использованию следующие диагностические приборы и системы (АСТД):
 - устройства автоматической идентификации подвижного состава и его оборудования (например, на базе RFID и NFC меток, с помощью систем компьютерного зрения и распознавания образов, др.);
 - переносной компьютер с функциями промышленного зрения, дополненной реальности, голосового помощника и распознавания речи для визуальной приёмки локомотива, а также с беспроводной связью с АСУ ТОиР;
 - АСТД износа тормозных колодок и исправности рычажных передач (на базе технического зрения);
 - АСТД состояния бандажей колёсных пар (на базе технического зрения, лазерного измерения и сканирования, других методов);

- АСТД изоляции электрических аппаратов и тяговых электродвигателей, включая контроль степени увлажненности и старения изоляционных структур (например, мобильные АСТД Кедр-2 и Доктор-060М); восстановление изоляции возможно при помощи электрокалориферной установки;
 - АСТД электрических аппаратов по времени срабатывания, токов и напряжений включения, сопротивления контакторов и др. (например, при помощи АСТД Доктор-060RLC, Доктор-030М);
 - АСТД токоприёмника (например, АСТД Доктор-060ПГ, который обеспечивает измерение усилия прижатия токоприемника к контактному проводу в рабочем диапазоне высот при подъеме и опускании, времени подъема и опускания, а также временных интервалов при движении токоприемника в различных интервалах высот);
 - АСТД аккумуляторной батареи;
 - вибродиагностика экипажной части локомотива, буксовых, моторно-осевых и моторно-якорных подшипников, тягового редуктора колёсно-моторного блока (например, АСТД «Прогноз» или «Вектор») [298];
 - станция реостатных испытаний для дизель-генераторной установки (ДГУ) тепловозов.
- 23 АСТД, применяемые при постановке локомотива на ремонт, используются и при контроле качества ремонта после ТОиР. Данные выходных испытаний фиксируются в СУБД ЖЦЛ.
- 24 Перед постановкой локомотива на ремонтную позицию производится продувка высоковольтной камеры, тяговых электродвигателей, других частей локомотива. Выполненные работы, их стоимость и продолжительность фиксируются в АСУ ТОиР и предаются по окончании ремонта в СУБД ЖЦЛ наряду с остальными работами по ТОиР.
- 25 На основании выявленных у локомотива инцидентов, предотказов и отказов формируется его индивидуальный объём ТОиР, состоящий из нормированных и расценённых работ, утверждённых в ОАО «РЖД». Допускается наличие у сервисных компаний собственных работ, но в этом случае они заказчиком не

оплачиваются. Например, возможны работы по устранению отказов и предотказов [298], виновной стороной которых является сервисная компания. По каждой работе в АСУ ТООР регистрируются её параметры: код работы, время назначения, начало, окончание и продолжительность исполнения, наличие пауз в исполнении из-за форс-мажорных обстоятельств (например, отсутствие запасных деталей, занятость инструмента и др.), использованные ресурсы, включая склад, фонд заработной платы, использованные инструмент и оборудование, наличие замечаний по качеству исполнения работ, результаты измерений, испытаний и диагностирования.

- 26 Список работ ТООР, которые необходимо выполнить в процессе текущего захода локомотива в депо или ПТОЛ, необходимо сформировать до начала смены. Поэтому рабочий день мастера должен начинаться минимум на час раньше, чем у рабочих. Информация храниться в АСУ ТООР [298].
- 27 При приходе на работу в цех слесари отмечают в терминале или другом устройстве идентификации АСУ ТООР [298]. Мастер подтверждает приход каждого работника. После этого каждому работнику в электронном виде выписываются наряды из уже сформированного списка работ. АСУ автоматически блокирует назначение работ слесарю, не имеющему право выполнять эту работу или загрузка которого уже превысила максимально допустимую. Возможно автоматическое назначение работ, если её может выполнить только один член бригады. В любом случае мастер подтверждает назначение [298].
- 28 По распределённым работам автоматизировано в АСУ ТООР формируется сетевой график ремонта на смену (диаграмма Ганта), по которому осуществляется контроль выполнения работ [298]. Если к работе привязано технологическое оборудование, то автоматически контролируется свобода этого оборудования, в случае необходимости формируется очередь.
- 29 Для составленного сетевого графика на основании статистики предыдущих ремонтов в АСУ ТООР рассчитывается ожидаемое время ремонта по методу, описанному в разделе 5 [298]. Это одно из главных отличий ТООР с использованием данных АСТД: изначально не определено время окончания

ТОиР, которое, как правило, изменяется в сторону увеличения: моделирование в разделе 4 показало, что АСТД обычно увеличивают объём и стоимость текущего ремонта с последующим сокращением объёма неплановых ремонтов после отказов. Возможно расчётную математическую часть реализовать в СУБД ЖЦЛ. В этом случае АСУ ТОиР делает запрос в СУБД и получает результат.

- 30 Получение материалов и запасных частей со склада возможно только по наряду и из списка допустимых по каждой работе материалов [298]. Особенностью ТОиР является необязательная потребность в том или ином материале в отличие от процесса изготовления изделия. Например, работа «Осмотреть рычажную передачу тормоза и, в случае необходимости, отремонтировать» может потребовать одну или несколько деталей из списка допустимых, а может и не понадобиться совсем. В любом случае получить детали, не относящиеся к рычажной передаче, не получится. Желательно разделить работы типа «осмотр» и «ремонт», но для этого надо пересматривать расценки работ [298].
- 31 В процессе осмотра, ремонта и по его окончании работник производит замеры и диагностирование [298]. Если эти операции производились вручную, то слесарь вводит результаты в систему с терминала, если автоматизировано, то данные автоматически попадают в АСУ от АСТД. Необходимо предусмотреть порядок регистрации данных исполнителя, номер обслуживаемого оборудования и локомотив, к которому относятся работы.
- 32 Если в процессе ТОиР используется технологическое оборудование с микропроцессорным управлением, то соответствующая информация также поступает в АСУ [298].
- 33 После выполнения работы и ввода в АСУ диагностических данных, работник (слесарь, электромеханик и др.) дистанционно или с терминала отмечает в АСУ ТОиР работу как выполненную [298]. Мастер соответствующего цеха проверяет качество выполнения работы и также помечает её как выполненную или указывает требования по доработке. В АСУ и на сетевом графике работа помечается как выполненная.
- 34 При замене линейного оборудования оно обязательно проводится через склад материалов повторного использования (МПИ) с отметкой замены в СУБД ЖЦЛ

и ЭПЛ. При ремонте МПИ оно берётся со склада МПИ в цех и возвращается на склад. При этом отмечаются выполненные ремонтные работы и их стоимость, влияющая на стоимость МПИ. Соответствующие изменения вносятся в ЕК АСУФР ОАО «РЖД».

- 35 Если работы по ремонту линейного оборудования производятся на другом предприятии (аутсорсер), то оно выступает в АСУ на правах специализированного цеха аналогично электромашинному, электроаппаратному, топливному и др. [298]. Если производилось восстановление или изготовление материалов, то они попадают на склад на правах покупных изделий. Таким образом, всё оборудование и все материалы обязательно проходят через склад депо (в АСУ ТОиР) с отметкой о производителе, стоимости, времени получения и установки в узле или на локомотив.
- 36 Диагностирование производится до выполнения ТОиР, в процессе ТОиР и после окончания ТОиР в зависимости от характера работ. Например, при исправной работе электрических аппаратов по данным бортовых АСТД, их диагностирование в депо не требуется. Но после ремонта параметры электрических аппаратов должны быть продиагностированы.
- 37 По окончании ТОиР возможны испытания локомотива в целом. Например, для тепловозов предусмотрены реостатные испытания. Автоматизация сдачи локомотива после ТОиР аналогична его приёмке на ТОиР. Используются средства дополненной реальности.
- 38 Все операции ТОиР осуществляются по безбумажной технологии в АСУ ТОиР с использованием терминалов в цехах, стационарных компьютеров диспетчерского аппарата, мастеров и руководителей, переносных компьютеров (планшетов) приёмщиков, возможно мастеров и др., smart-телефонов и других мобильных устройств у исполнителей [419]. Диагностическая информация вносится вручную с этих устройств или попадает в АСУ с автоматических или автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД). Возможна распечатка отдельных документов (в т.ч. бухгалтерских), если это требует законодательство РФ (в большинстве случаев законодательство РФ позволяет использовать электронный документооборот с электронной подписью, но на

практике местные органы аудита настаивают на бумажных документах). Важно, чтобы все бумажные документы были вторичны по отношению к информации в АСУ, т.к. иначе будет трудно добиться достоверности информации [298].

- 39 Вся информация из АСУ ТООР по окончании ТООР и сдачи локомотива заказчику автоматически перекачивается в СУБД ЖЦЛ. Далее цикл жизненного цикла локомотива повторяется.
- 40 При постановке локомотива на средний или капитальный ремонт в локомотиворемонтном заводе учёт в АСУ производится аналогично ТООР в локомотивном депо. Роль АСТД на заводах меньше (кроме испытательных стендов), а объём заменяемого оборудования больше. Предлагается локомотив после СР или КР рассматривать в СУБД ЖЦЛ как новый локомотив той же серии, но с пометкой «К». С точки зрения управления жизненным циклом локомотива и физики процессов – это правильней [298].
- 41 На всех этапах жизненного цикла локомотива вся информация собирается в СУБД ЖЦЛ, созданной на базе покупной платформы (СУБД Oracle, DB-2, SQL-Server и др.) с возможным применением технологии Big Data.
- 42 Информация СУБД ЖЦЛ используется как для оперативного и среднесрочного управления, так и для стратегического анализа в АСУ ЖЦЛ эффективности эксплуатации локомотивов, эффективности их системы ТООР, удачности конструкции локомотива в целом и его оборудования [298]. При факторном анализе следует использовать современные методы анализа, как правило, встроенные в СУБД. В частности, в ОАО «РЖД» используют технологию кубов SAS. Через систему отчётов СУБД ЖЦЛ с факторным анализом выстраивается обратная связь для корректировки конструкции локомотива, технологии производства, эксплуатации и ТООР [298].
- 43 АСУ ЖЦЛ создаётся как автоматизированное средство анализа эффективности принятой технологии управления жизненным циклом локомотивов. На базе АСУ ЖЦЛ вырабатываются корректирующие мероприятия, которые передаются в СУБД ЖЦЛ для дальнейшего отслеживания их выполнения и анализа эффективности. Возможна реализация АСУ ЖЦЛ через систему хранимых процедур в самой СУБД ЖЦЛ.

- 44 Все ответственные операции в АСУ и СУБД должны выполняться с использованием технологии «Электронная подпись», которая проработана и узаконена на уровне законодательства РФ.

Таким образом, разработанная модель автоматизированного управления жизненным циклом локомотивов при использовании автоматизированных систем технического диагностирования позволяет реализовать полностью безбумажную технологию управления с объективной оценкой технического состояния локомотивов и объективно обоснованной корректировкой жизненного цикла локомотивов на всех этапах его жизненного цикла: разработка, производство, эксплуатация, ТОиР, утилизация [298].

6.8 ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 6

- 1 Разработана модель автоматизированной системы управления жизненным циклом локомотива (АСУ ЖЦЛ) с использованием автоматизированных систем технического диагностирования как киберфизическая производственная система (CPPS) с использованием методов технологии «Индустрия 4.0» и методических подходов системы менеджмента качеством продукции, бережливого производства, методов сервисного обслуживания ITIL и др. [298].
- 2 Основу АСУ ЖЦЛ составляет система управления базами данных (СУБД) «Жизненный цикл локомотивов» (СУБД ЖЦЛ), в которой по принципам интероперабельности информация поступает из всех разрозненных информационных систем, участвующих в управлении жизненным циклом локомотива на всех его этапах: проектирование, производство, эксплуатации, техническое обслуживание и ремонт, средний и капитальный ремонт [298].

7 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ

7.1 СЕРВИСНОЕ ЛОКОМОТИВНОЕ ДЕПО «БРАТСКОЕ»

Модель жизненного цикла локомотивов (ЖЦЛ) с комплексным использованием автоматизированных систем управления (АСУ) и автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) практически реализована в 2018 – 2020 годах под руководством автора диссертации. Для опытных работ выбрано одно из самых сложных депо по сети дорог: сервисное локомотивное депо (СЛД) «Братское» группы компаний «ЛокоТех», расположенное в начале Байкало-Амурской магистрали на станции Вихоревке Восточно-Сибирской ж.д. в одноимённом городе в Братском районе Иркутской области. Проект реализован компаниями ОАО «РЖД», «ЛокоТех», НИИТКД и обеспечил высокий уровень готовности парка локомотивов к эксплуатации, сделал информационно видимым техническое состояние каждого локомотива, прозрачным и наблюдаемым технологический процесс сервисного обслуживания.

СЛД «Братское» обслуживает электровозы переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) серий 2ЭС5К и 3ЭС5К производства Новочеркасского электровозостроительного завода (НЭВЗ), входящего в состав АО «Трансмашхолдинг» [193, 346] (рисунок 7.1). Электровозы депо эксплуатируются на Восточном полигоне ОАО «РЖД» в основном на участке от станции Междуреченск до станции Таксимо, и реже на участке от станции Мариинск до станции Карымская и далее до станции Находки.

ВИП (рисунок 7.2) – силовая электронная на базе тиристоров выпрямительная в тяге и инверторная в рекуперации установка современных электровозов, начиная с электровозов серии ВЛ80Р [130, 229, 236, 365] – первыми с полностью электронной системой управления. На электровозах серии ВЛ85 дополнительно реализована автоматическая система управления. А на электровозах серии ЭП1 автоматика реализована на базе микропроцессорной системы управления и диагностирования МСУД. Современное семейство электровозов ЭС5К является лучшими и самыми массовыми отечественными электровозами переменного тока. При этом их сложное устройство предполагает создание современной системы

технического обслуживания и ремонта (ТОиР), прототип которой и был создан в СЛД «Братское».



Рисунок 7.1 – Электровоз с ВИП серии 3ЭС5К на Восточном полигоне ОАО «РЖД», обслуживаемый в СЛД «Братское»

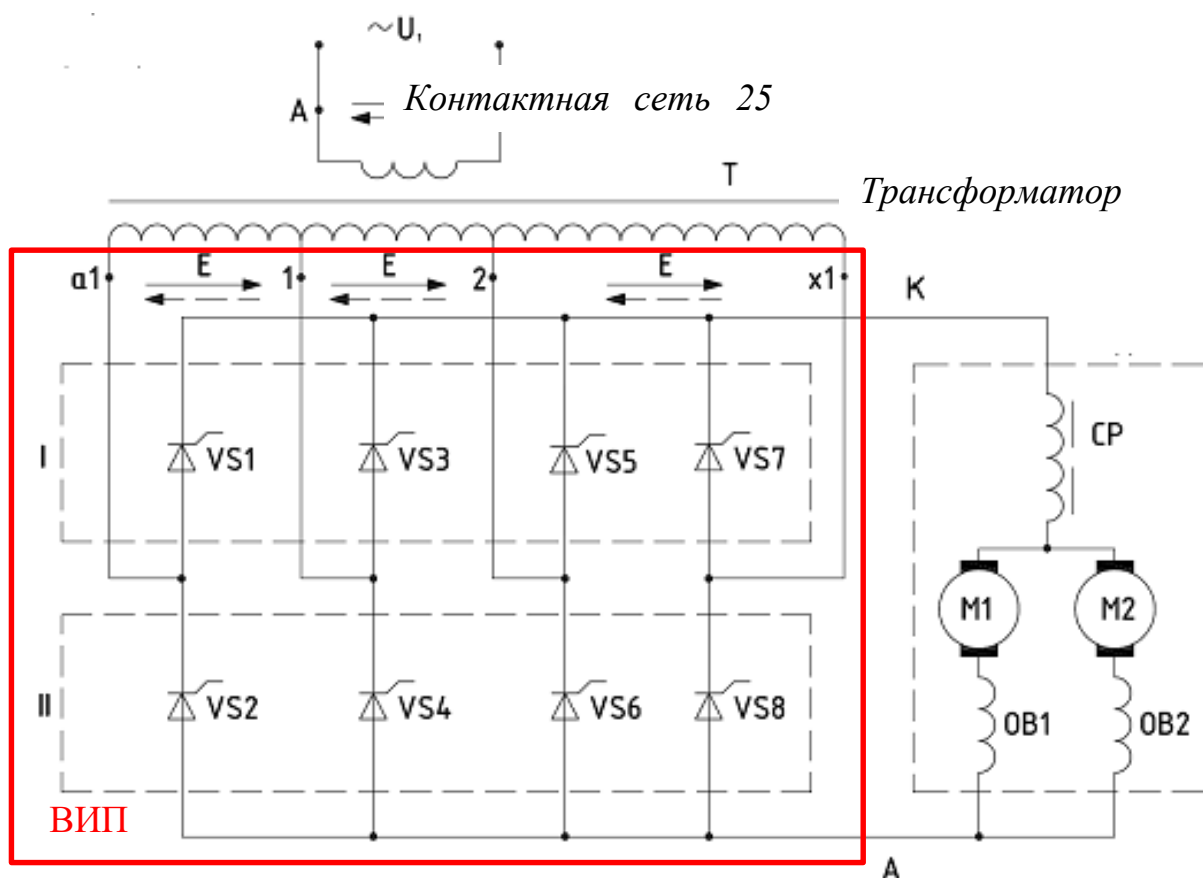


Рисунок 7.2 – ВИП электровозов переменного тока

Эксплуатационное локомотивное депо «Вихоревка» и СЛД «Братское» расположены в небольшом посёлке, что усложняет ситуацию с кадрами. Само локомотивное депо строилось и развивалось как депо для мотор-вагонного подвижного состава (МВПС): длинные традиционные пути до входных стрелок, цеха определенной геометрии с определенным функционалом. Фактически культуры ТОиР современных электровозов в депо не было.

Главная проблема в СЛД была с логистикой (рисунок 7.3). Чтобы совершить, например, маневровые перемещения из цеха в цех занимали недопустимо много времени (до 8 часов при общем плановом простое 24 часа).

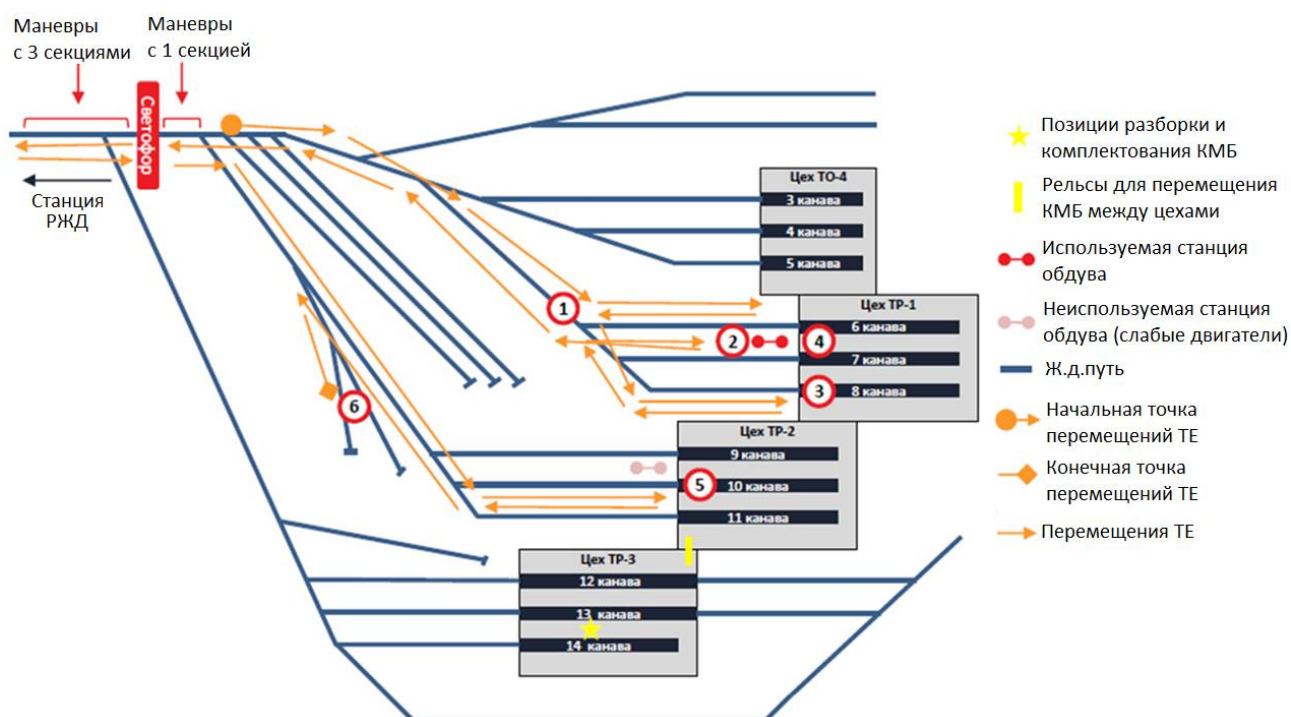


Рисунок 7.3 – Логистические потери в СЛД «Братское»

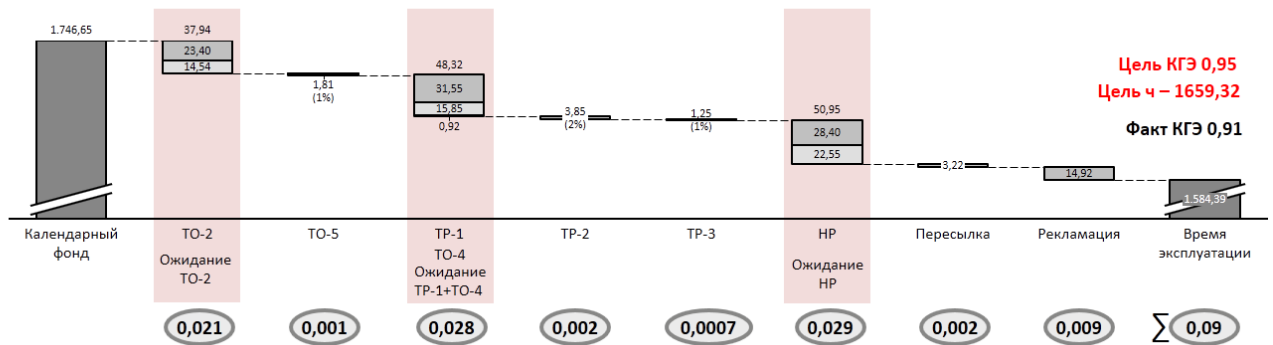
Обработка статистики СЛД «Братское» (рисунки 7.4, 7.5) показала, что основная доля потерь связана с неплановыми ремонтами: по сути все заходящие в депо локомотивы, нуждаются в перекатке колёсно-моторных блоков (КМБ), либо в обточке колёсных пар (КП).

Анализ технологических процессов в СЛД «Братское» показал, что необходимо кардинальное изменение технологии ТОиР в депо с использованием современных научно-практических подходов.

Таким образом, существовавшие в СЛД «Братское» процессы и технологии сервисного обслуживания не позволяли достичь стратегические цели ОАО «РЖД» по повышению эффективности эксплуатации локомотивов.

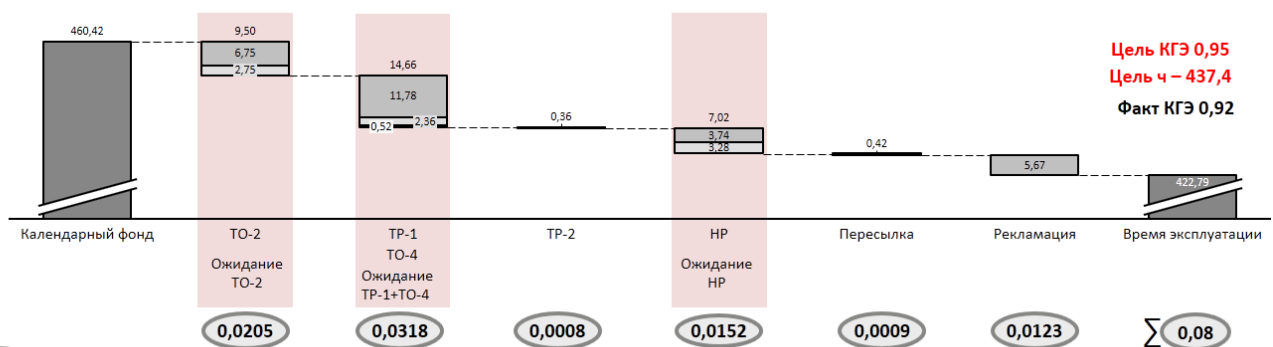
Объем парка (полный): 141 локомотив 3ЭС5К, на 1 июля 2018 года
Фактический расчёт КГЭ, тыс. ч.

■ Фактическое время простоев



Объем парка (полный): 52 локомотива 2ЭС5К, на 1 июля 2018 года
Фактический расчёт КГЭ, тыс. ч.

■ Фактическое время простоев



XXXX

Влияние на КГЭ, единицы КГЭ

1) ТЕ- тяговая единица

ИСТОЧНИК: Анализ рабочей группы и данные ЛокоТех

Направление	Основные выявленные проблемы	Расчетный простой янв-июнь 2018, ч
Оборудование	Устаревшее оборудование, отсутствие датчиков и мобильных станков Неисправное оборудование Размещение ремонтной позиции для цикловых работ, скатоподъемников и станка обточки в разных цехах	23.174
Технология	Последовательное выполнение операций Отсутствие готовности к сверхцикловым работам Комплектовка КМБ не производится до ремонта	21.519
Качество	Постоянные отвлечения на НР от плановых ремонтов Длительное время приемки РЖД и дублирование приемки мастера	17.657
Планирование	Отсутствие оперативного планирования подгонки локомотивов Отсутствие предиктивной аналитики по состоянию оборудования локомотива (колеса, масло, колодка, песок и прочее)	15.449
Персонал	Низкая явочная численность Большое влияние человеческого фактора (отсутствие объективных средств фиксации замечаний) Хаотичное распределение персонала по графику Отсутствие привязки навыков к ключевым видам работ	14.898
ТМЦ	Несоответствие норм технологии Пересортица в фактических данных по списанию между циклом и сверхциклом, отсутствие комплектовки ТМЦ под виды работ Отсутствие стеллажей у канав, трата времени на перемещения на склад	13.242
Маневровые работы	Работа на МВС (маневры несвязанные с маневрами СЛД) Отсутствие планирования работ маневрового Неэффективная схема путевого хозяйства Отсутствие планшетов – привязанность диспетчеров к рабочему месту	4.414

Рисунок 7.4 – Статистика надёжности локомотивов в СЛД «Братское»

	Кол-во НР, шт	Ожидание, час	Ремонт, час	Проблема	Предлагаемое решение по сокращению кол-ва
КП	338	4,550	8,371	32% - КЗП	Установка композитных КЗП Проводится эксперимент – с 01.12.18
ТЭД	273	4,280	5,589	67% - КЩА и ПКО	Разработаны и запущены мероприятия при проведении ТР-1 и ТО-2
Прочее оборудование*	268	1,672	3,250	-	-
Эл. оборудование	267	2,116	2,556	38% - аппараты защиты	Анализ качества устанавливаемого при ремонте оборудования
Торм. оборудование	153	955	1,130	64% - локомотивы серии 0-99	Анализируется тормозное оборудование в локомотивах данной серии
Другое	218	2,342	2,206	-	-

Сокращение времени простоя при НР

- Выделение отдельных ремонтных позиций
- Выделение отдельной бригады под НР
- Установка композитных КЗП
- Система контроля колодок для оптимизации процесса ремонта

Предиктив

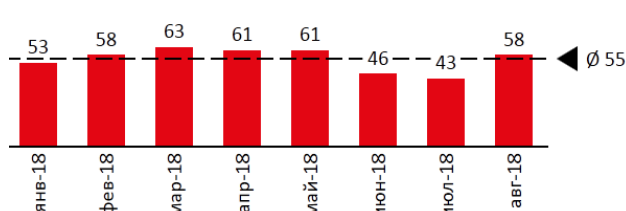
- Установка диагностического комплекса на путях
- Установка RFID меток на ключевое линейное оборудование

Снижение кол-ва обточек

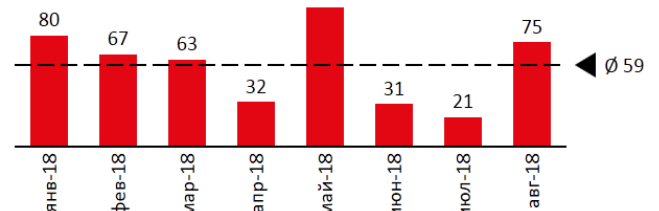
- САФ – увеличение ресурса бандажа. Повышение жизненного цикла КП на 30%. Сокращение стоимости затрат на ЖЦ на 10%.

Анализ статистики показал необходимость проведения выкатки в 55% и обточки в 59% случаев при проведении ТР-1 в СЛД Братское

Частота выкаток КМБ при проведении ТР-1 в СЛД Братское за 8 месяцев 2018 года, %



Частота обточек ТЕ при проведении ТР-1 в СЛД Братское за 8 месяцев 2018 года, %



Создание умной ремонтной позиции позволит исключить лишние маневры и проводить выкатку и обточку² параллельно с цикловыми работами

В СЛД Северобайкальск проведен эксперимент доказывающий возможность проведения параллельных работ с выкаткой КМБ и сокращения простоя ремонта до 14 часов¹



Определен список и получена часть оборудования необходимого для умной ремонтной позиции



Рисунок 7.5 – Статистика ТОиР локомотивов в СЛД «Братское»

7.2 МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

7.2.1 Методика построения цифрового локомотивного депо

Согласно предложенной в диссертации Модели в основу изменения системы управления ТОиР была положена её цифровизация (рисунок 7.6). Осуществлён переход на принципиально новую концепцию обслуживания «Цифровое депо».



Рисунок 7.6 – Методический подход к реорганизации в СЛД «Братское»

Как доказано в разделе 6, технологические процессы в современном сервисном локомотивном депо должны строиться по принципам киберфизических промышленных систем (Cyber-Physical Production Systems – CPPS), в которых все информационные системы, технологическое оборудование с микропроцессорным управлением и автоматизированные системы технического диагностирования объединяются в единую АСУ по принципам внутренней интероперабельности. При этом АСУ взаимодействует с другими АСУ по принципам внешней интероперабельности.

На рисунке 7.7 показаны основные элементы технологии CPPS применительно к сервисному ремонтному локомотивному депо «Братское». Прежде всего – это автоматизация управления самим депо с формированием по данным всех АСТД индивидуального объёма ТОиР. Во-вторых – это поддержка принятия решений (СППР), за счёт системы подсказок и MES-систем [359].



Рисунок 7.7 – Структура используемых технологий в СЛД «Братское»

Также подвергается переработке сами технологии ТОиР (в процессе внедрения были переработаны более 1000 листов технологических карт). На рисунке 7.8 приведён пример изменения технологических процессов.

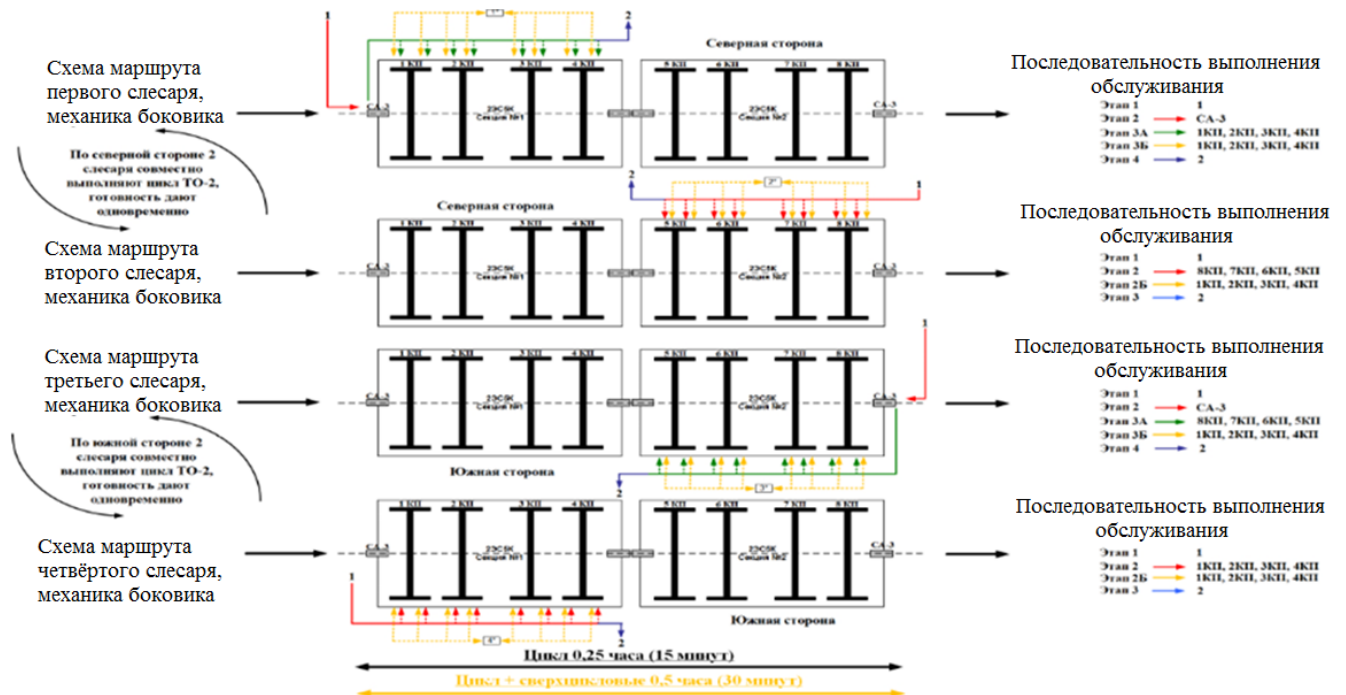


Рисунок 7.8 – Схема маршрута слесаря при проведении технического обслуживания в объёме ТО-2 локомотивов 2ЭС5К

На рисунке 7.9 показана вся совокупность цифровых решений ТОиР для СЛД «Братское», которые носят системный характер. При этом «нецифровые» технологии сведены к минимуму.

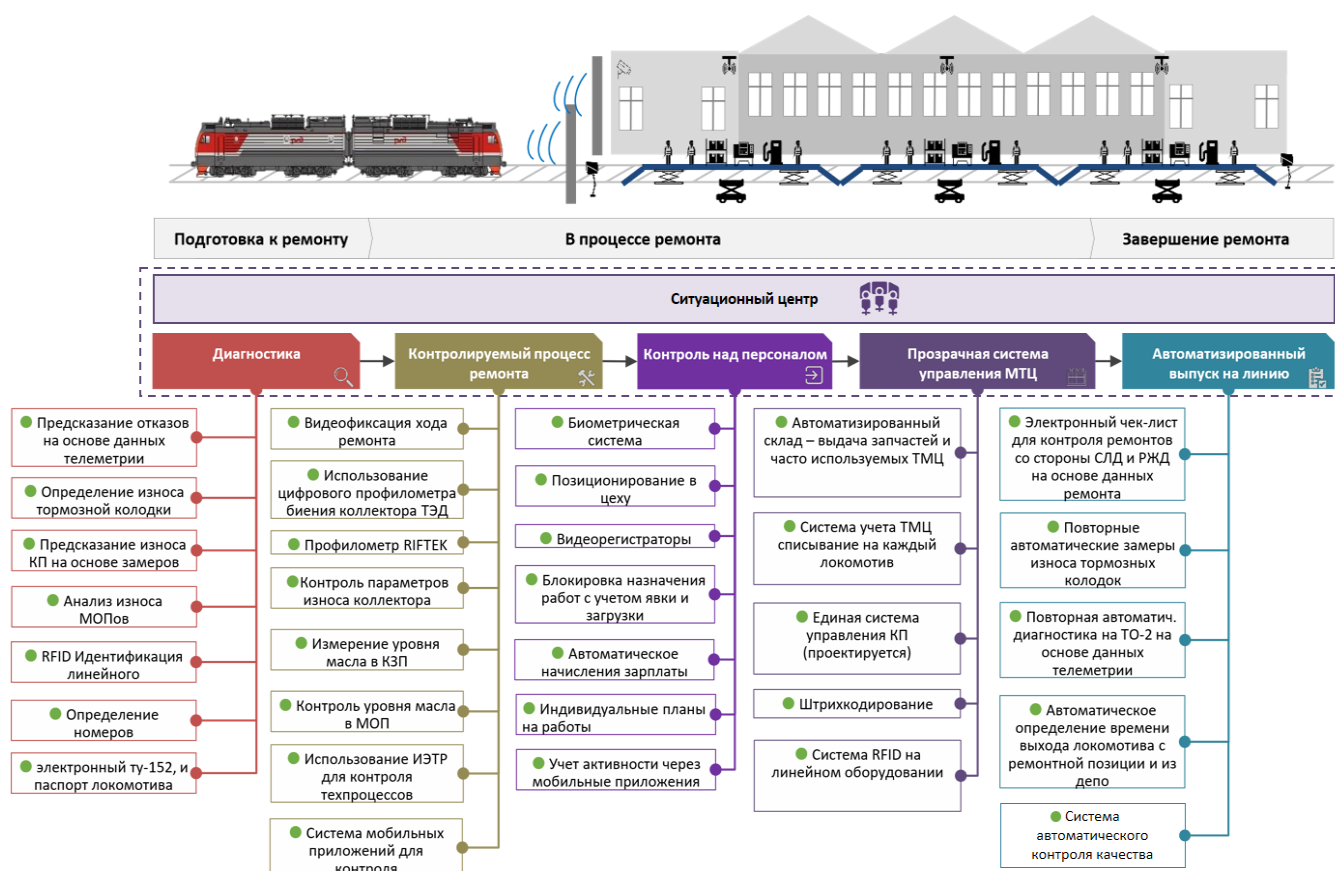


Рисунок 7.9 – Совокупность цифровых решений ТОиР в СЛД «Братское»

Центральным элементом «Цифрового депо» является цифровая универсальная ремонтная позиция, реализующая технологическую возможность выполнения полного комплекса цикловых и сверхцикловых работ на секции локомотива на единой позиции. Работы выполняются параллельно. Не требуется дополнительных маневровых работ: каждая позиция оснащена полным комплектом ремонтного, подъемного и контрольно-диагностического оборудования. Число универсальных позиций определяется числом одновременно обслуживаемых секций. Всё оборудование объединено в единую информационную сеть. Персонал снабжён персональными мобильными устройствами для оперативного осуществления рабочих коммуникаций в режиме online: получение заданий, оперативная поддержка решений, статус выполнения работ, статус готовности запасных частей к выдаче. В технологии «Цифровое депо» реализованы следующие основные автоматизированные функции:

- единая площадка для работы диспетчерских служб, анализа и контроля показателей, планирования работ и ресурсов в депо;
- прогнозирование отказов на основе телеметрии для повышения надежности эксплуатации;
- автоматизированное определение износа тормозных колодок для снижения времени диагностики;
- прогнозирование износа бандажей колёсных пар для роста надежности эксплуатации и планирования работ по обточке;
- анализ износа МОП для повышения надежности эксплуатации;
- RFID идентификация для мониторинга линейного оборудования (материалов повторного использования);
- видеораспознавание номеров секций для контроля перемещения и времени въезда/выезда;
- электронный бортовой журнал формы ТУ-152 и паспорт локомотива для ускорения обмена информацией с эксплуатацией [278];
- видеофиксация хода ремонта для контроля операций в цехах;
- цифровой профилометр биения коллектора ТЭД для повышения качества ремонтов ТЭД;
- профилометр RIFTEK для ускорения и повышения точности контроля параметров КП;
- контроль параметров износа коллектора для повышения качества ремонтов;
- измерение уровня масла в КЗП для учета и экономии смазочных материалов;
- ИЭТР для контроля техпроцессов;
- система мобильных приложений для ускорения выдачи, согласования и приемки работ;
- биометрическая система для точной идентификации сотрудников, наличия объективных данных по явкам для принятия решений;
- позиционирование в цеху для определения фактической загрузки персонала, оптимизации внутрицеховой логистики;
- видеорегистраторы для контроля технологических операций, проводимых персоналом;

- блокировка назначения работ с учетом явки и загрузки для повышения качества и скорости назначения работ;
- автоматическое начисление зарплаты для реализации системы мотивации персонала по факту закрытия электронных нарядов, выписанных в результате индивидуального планирования объёма ТОиР для каждой секции локомотива;
- индивидуальные планы для обеспечения оптимального объёма работ для каждого работника бригады;
- учет активности через мобильные приложения для повышения точности и оперативности принятия решения;
- автоматизированный склад для ускорения выдачи ТМЦ, учета ТМЦ в привязке к запланированным работам;
- учет ТМЦ, списание на каждый локомотив для контроля выполнения работ и повышения эффективности использования ТМЦ;
- единая система управления наличием и состоянием колёсных пар (КП);
- штрихкодирование, RFID и NFC метки для автоматизации учета ТМЦ и линейного оборудования (материалов повторного использования);
- электронный чек-лист для контроля ремонтов для повышения качества ремонтов и скорости выпуска;
- повторные автоматические замеры износа тормозных колодок для прогнозирования износа колодок и времени их замены;
- повторная автоматическая диагностика на основе телеметрии для контроля качества ремонтов и повышения надежности в эксплуатации;
- автоматическое определение времени выхода локомотива с ремонтной позиции и из депо для повышения точности и объективности учета времени на обслуживание;
- система автоматического контроля качества для повышения точности и объективности.

Таким образом, в СЛД «Братское» на практике реализована предложенная киберфизическая модель управления жизненным циклом локомотивов [419], описанная в разделе 6.

7.2.2 Реконструкция сервисного локомотивного депо «Братское»

Реализация проекта включала:

- обследование депо, формирование опытного технологического процесса с учетом выявленных особенностей и состояния парка локомотивов;
- проектирование оборудования и его размещения в депо;
- технологическое перевооружение депо, создание универсальных ремонтных позиций, укомплектованных ремонтным и диагностическим оборудованием;
- создание технологичной инфраструктурной обвязки ремонтных позиций и депо в целом;
- оснащение сервисного персонала интеллектуальными электронными помощниками;
- создание информационно-сетевой инфраструктуры;
- реализация новой модели сервисного обслуживания локомотивов по фактическому техническому состоянию.

В результате анализа выделены 7 групп оборудования [296], которые технологически скомпонованы в одном цехе и охвачены единой информационной системой с целевой функцией максимального сокращения времени простоя локомотива на ремонте. Наряду с работами в самом цехе разработан и изготовлен маневровый тяговый агрегат для замены более дорогого маневрового локомотива, ожидание которого также снижало эффективность работы депо. Для повышения оперативности снабжения (ТМЦ) поставлены автоматизированные склады [296].

На первом этапе внедрения системы [296] квалифицированный персонал обеспечивали вахтовым способом. Местных специалистов постепенно переучивали, учили планированию и работе по-новому с использованием цифровых технологий. Учили управлять комплексно всем процессом от эксплуатации до ремонта, от приёмки локомотива на ТОиР до выдачи обратно в эксплуатацию [296].

Технологические процессы были распараллелены [296], для чего была построена линейная диаграмма всех процессов. Универсальность ремонтных позиций обеспечивается, во-первых, возможностью обслуживания всех эксплуатируемых серий локомотивов, что очень важно на таком большом полигоне

как Восточный. Технология построена таким образом, чтобы максимально минимизировать трансформацию технологического процесса при появлении новых серий локомотивов. Это достигается за счет мобильности технических и технологических решений, которые применены в депо: заправочные и диагностические комплексы, подъёмное оборудование, грузоподъемное оборудование, замена всех типов тормозных колодок и другого сменного оборудования – всё это имеет мобильное исполнение (рисунок 7.10 – 7.13) [296].

Для реализации Модели разработан перечень всех основных диагностических параметров оборудования локомотива, которые должны использоваться в процессе ТОиР [296]. При этом измерение этих параметров максимально автоматизировано с передачей данных в единое информационное пространство. В результате разработан и изготовлен комплект оборудования для СЛД с учётом требований технологии Цифрового депо. При этом важно отметить, что все технологические процессы согласованы на уровне ОАО «РЖД» всего за полгода [296].

В настоящее время цех оборудован универсальными ремонтными позициями (канавами), персонал обучен как технологии ремонта, так и цифровым мобильным технологиям [296].

Таким образом, впервые на сети отечественных железных дорог подготовлен цех для сервисного обслуживания локомотивов, отвечающий требованиям предложенной киберфизической модели. Все автоматизированные системы технического диагностирования [288], технологическое оборудование с микропроцессорным оборудованием и даже микропроцессорные системы управления локомотивов (МСУД) объединены в единую интероперабельную информационную систему, в основу которой положена АСУ ТОиР на информационной платформе 1С УПП (АСУ «Сетевой график») и реализацией типовых функций ERP и MES управления. Не реализованными остались функции внешней интероперабельности с АСУ заводов изготовителей, ремонтных заводов и АСУЖТ.

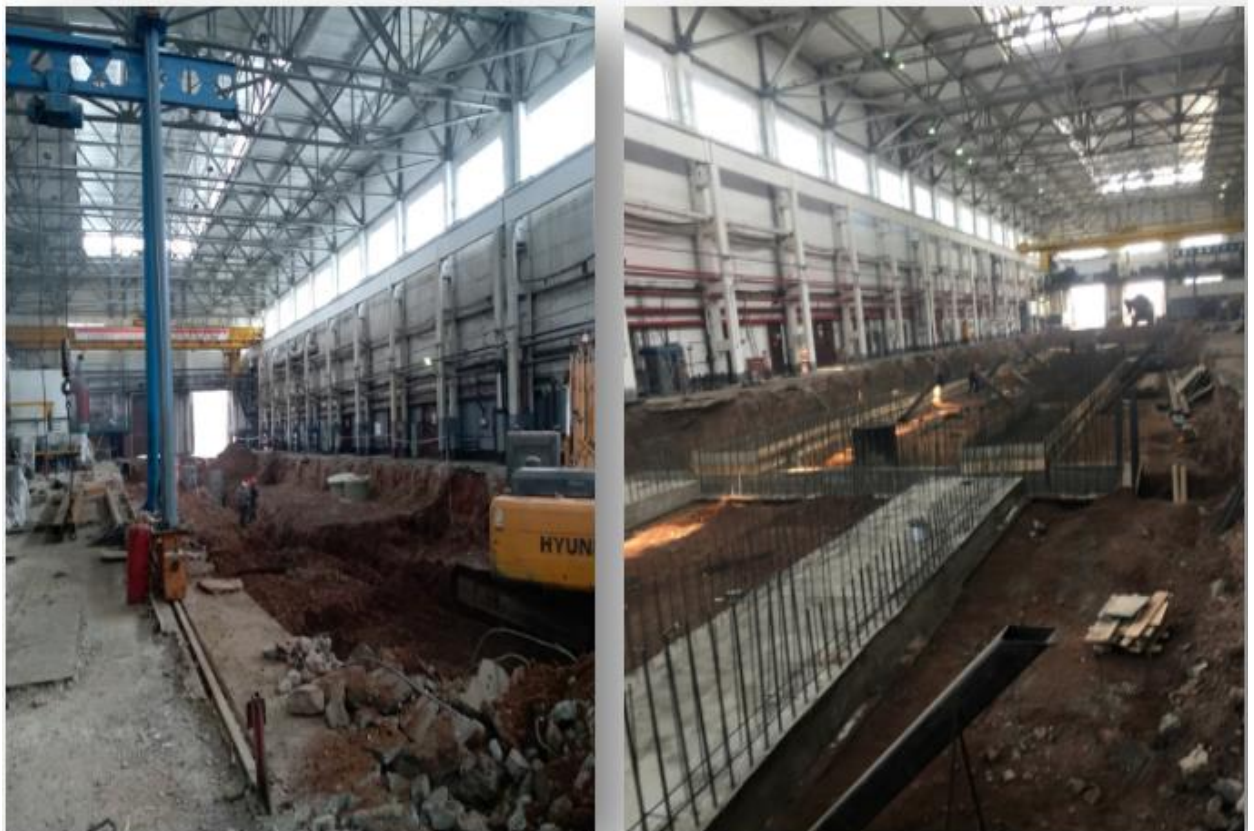


Рисунок 7.10 – Реконструкция цеха ТР-1 СЛД «Братское»



Рисунок 7.11 – Изготовленное в НИИТКД специализированное оборудование [296]

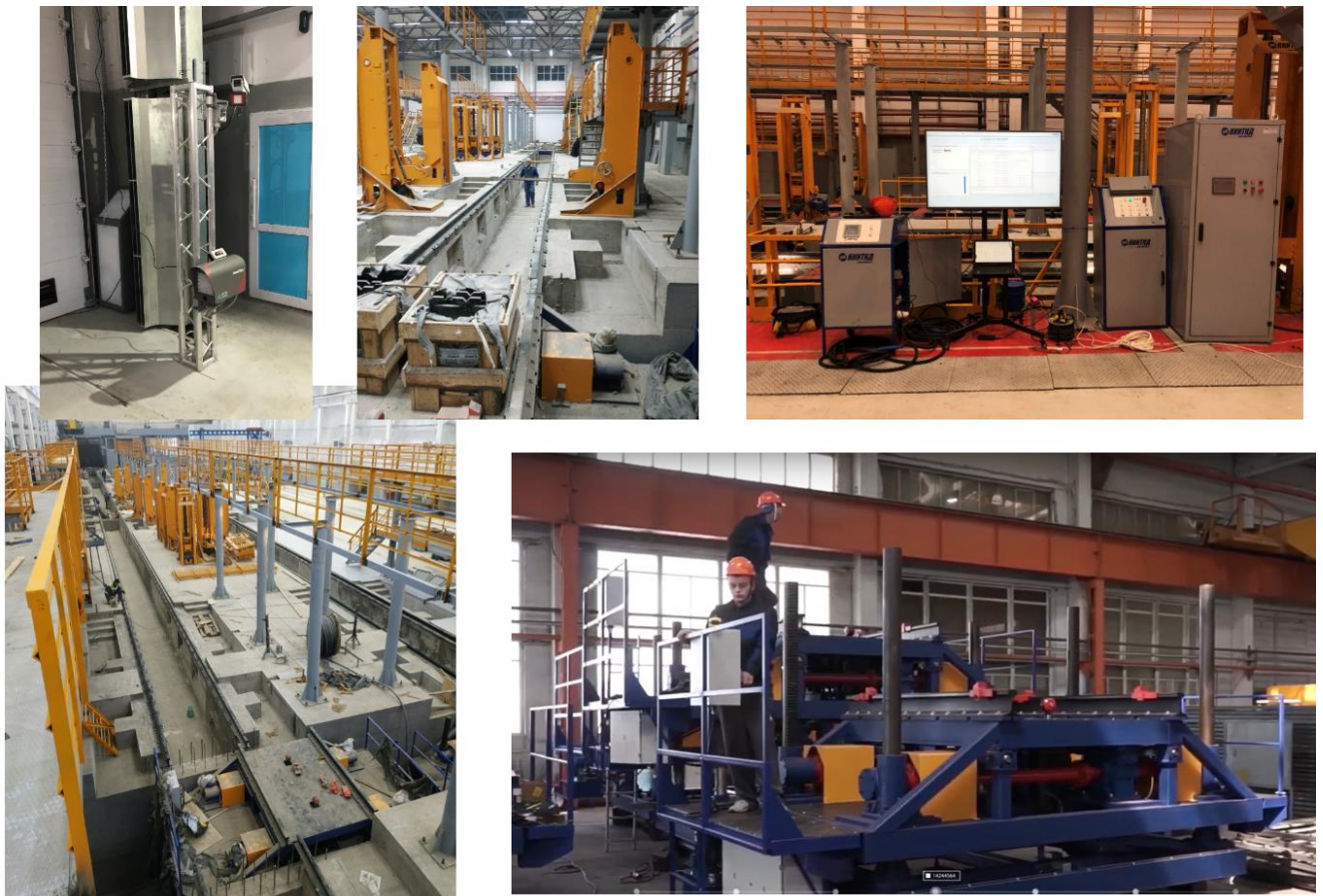


Рисунок 7.12 – Оснащение цеха ТР-1 СЛД «Братское» специализированным оборудованием



Рисунок 7.13 – Реконструированный цех ТР-1 в СЛД «Братское» [296]

7.2.3 Эксплуатация нового депо

Эксплуатация реконструированного сервисного локомотивного депо началась в 2019 году. Существенно улучшена логистика депо как за счёт реализации универсальных ремонтных позиций с применением средств механизации, так и за счёт применения разработанного в НИИТКД специального самоходного с дистанционным управлением агрегата для постановки локомотивов на ремонтные позиции (рисунок 7.14). Эксплуатация нового цеха ТР-1 в СЛД «Братское» полностью подтвердила эффективность предложенных технических решений на основании выполненных теоретических исследований. В следующем разделе приведены основные полученные эффекты. Для эффективной реализации системы ТОиР с комплексным использованием различных АСТД создан ситуационный центр, позволяющий оперативно формировать индивидуальные для каждой секции электровоза график ремонта (рисунок 7.15).

Запущенный в работу ситуационный центр СЛД «Братское» – единственный в своём роде на сети отечественных железных дорог [296]. В цехах по-новому проходят оперативные совещания («планёрки»), на экранах наглядно отражается ситуация с выполнением запланированного объёма ТОиР. В описанной предлагаемой модели управления жизненным циклом локомотивов [298] (раздел 6) обращалось внимание, что при индивидуальном планировании объёма ремонта для каждой секции по данным АСТД существенно возрастает роль диспетчерского аппарата. Разнесение функций выполнения ТОиР, за который отвечают мастера цехов, и его планирования согласно регламенту ТОиР и результатам диагностирования очень важно для максимально объективной организации производственного процесса, сокращения затрат с одновременным повышением надёжности локомотивов. Наличие единой точки входа для регистрации инцидентов, предотказов и отказов в АСУ ТОиР позволяет планировать дополнительные сверхцикловые работы, избегая как приписок, с одной стороны, так и пропуска дополнительных работ, с другой. В частности, удаётся постепенно исключать такие электронные записи мастеров как «замечание не подтвердилось», позволяющие им не искать скрытые неисправности. Наглядные графические экранные формы позволяют в режиме online контролировать процесс ТОиР, его соблюдение и своевременность.



Рисунок 7.14 – Маневровый тяговый агрегат

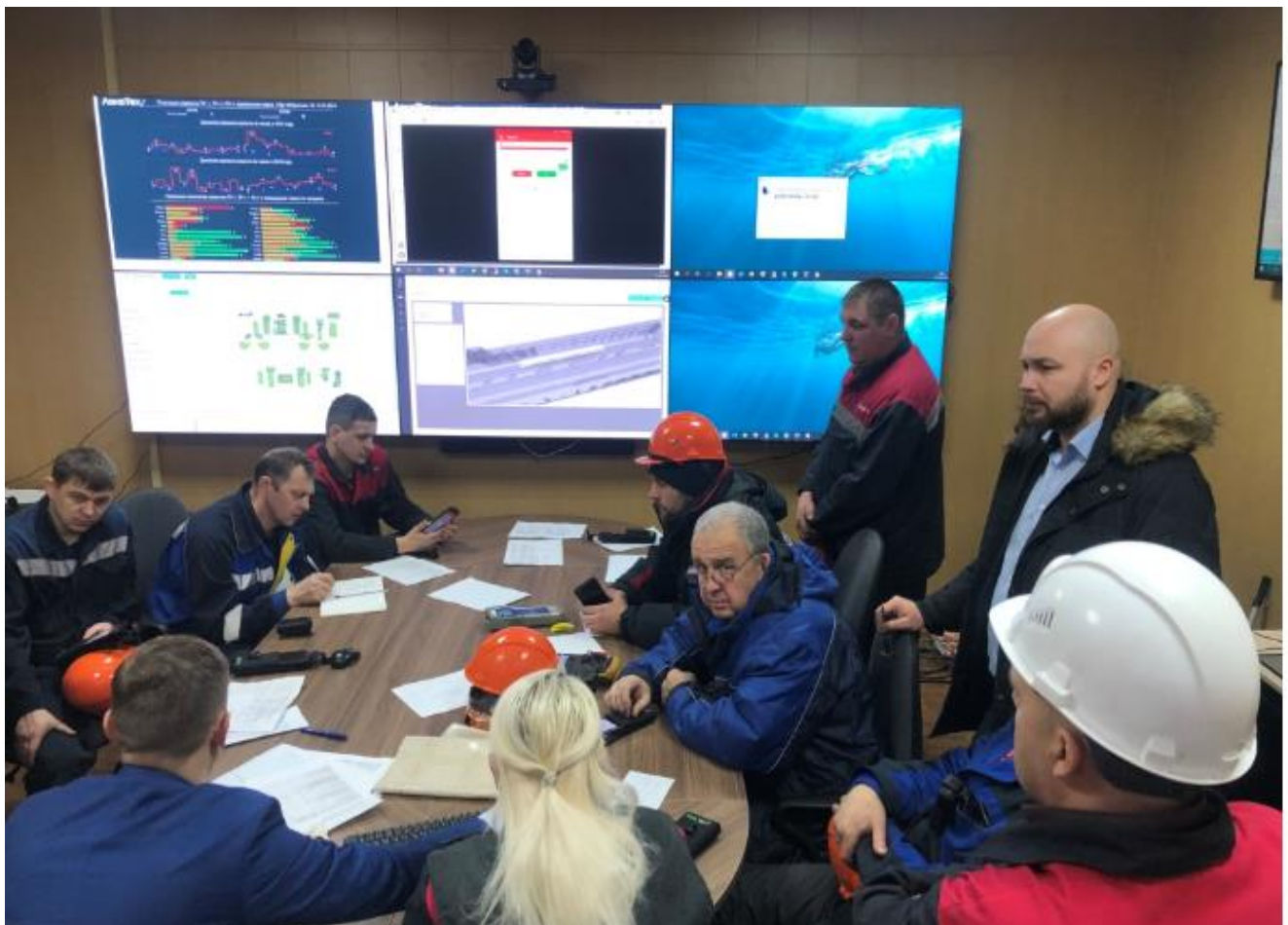


Рисунок 7.15 – Ситуационный центр СЛД «Братское»

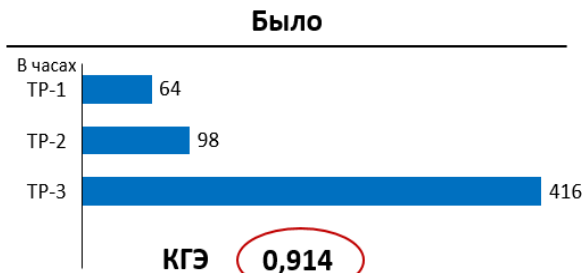
7.3 ЭФФЕКТЫ ОТ ВНЕДРЕНИЯ МОДЕЛИ В ДЕПО

Реконструкция депо и внедрение шести универсальных ремонтных позиций (включая перекатку колёсно-моторных блоков (КМБ) и обточку бандажей колёсных пар) позволили сократить время ТОиР практически в 3 раза [296]: совокупность работ позволила сократить среднее время простоя локомотива на ремонте в объёме ТР-1 с 42-х до 22-х часов, что подтверждает эффективность предложенных технических решений (рисунки 7.16 – 7.17) [296]. Синергетический эффект от внедрения Модели можно оценить следующим образом.

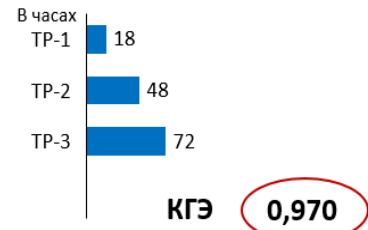
1. Сокращение простоя локомотивов при ТР:
 - достижение КГЭ = 0,97 (в перспективе);
 - рост доступного парка локомотивов;
 - оптимизация инвестиционной программы.
2. Сокращение времени и количества маневровых работ:
 - сокращение парка маневровых локомотивов (маневровые локомотивы составляют около 30 % парка);
 - сокращение численности маневровых бригад.
3. Сокращение площадей обслуживания локомотивов:
 - сокращение эксплуатируемых площадей;
 - экономия на коммунальных платежах.
4. Сокращение количества СЛД:
 - концентрация максимального количества ремонтов в рамках одного СЛД (до 180 секций в месяц);
 - сокращение затрат на обслуживание других СЛД.
5. Полный контроль сервисных работ через цифровые решения:
 - максимальная автоматизация процессов;
 - объективные данные по локомотиву;
 - сокращение штата.

Таким образом, опыт сервисного локомотивного депо «Братское» подтверждает целесообразность применения модели жизненного цикла локомотивов, предложенной в настоящей научной работе.

1

Сокращение времени
плановых ремонтов

*На примере 2ЭС5К и 3ЭС5К приписки Вихоревки за 1 половину 2018 года

Бюджет

- Рост доступного парка
- Повышение выручки на один локомотив

2

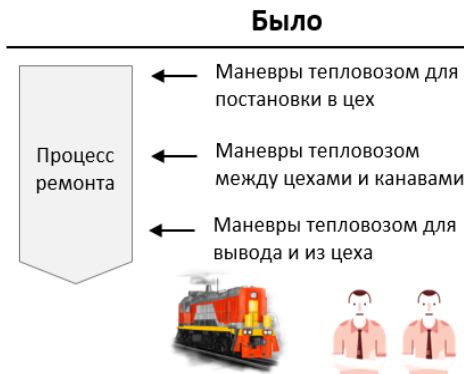
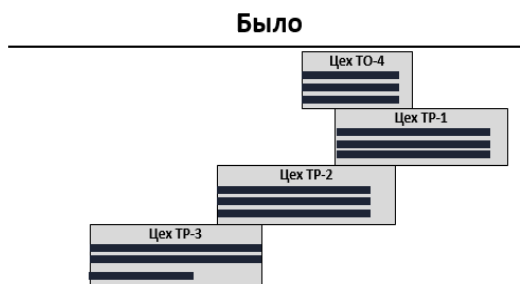
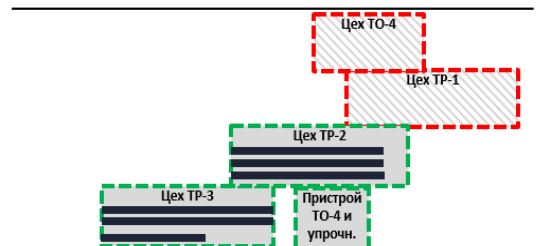
Сокращение времени и кол-ва
маневровых работ**Бюджет**

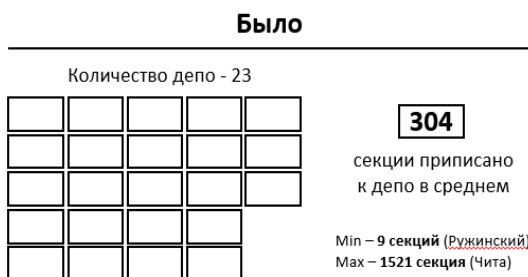
Рисунок 7.16 – Эффекты в СЛД «Братское» от сокращения времени ремонтов и маневровых работ за счёт роста доступного парка, повышения выручки на один локомотив и снижение затрат

3

Сокращение площадей
обслуживания локомотивов**Бюджет**

- Снижение затрат на содержание
- Консервация/вывод из эксплуатации неиспользуемого оборудования

4

Повышение производительности,
сокращение кол-ва СЛД

*Количество СЛД на примере Восточного полигона



Рисунок 7.17 – Эффекты в СЛД «Братское» от сокращения затрат на обслуживание площадей, концентрации ремонтов в конкретных СЛД

Важная составляющая Модели – мониторинг по диагностическим данным бортовых микропроцессорных систем диагностирования (МСУД), который позволил повысить эффективность ТОиР и сократить затраты на 240,8 тыс. руб. за счёт следующих факторов прямой эффективности.

1. 71 тыс. руб. за счёт сокращения объёмов и стоимости ТОиР:

- снижение трудозатрат;
- уменьшение расхода материалов на проведение технического обслуживания и ремонта;
- сокращение времени простоя на техническом обслуживании и ремонте.

2. 169,7 тыс. руб. за счёт снижения затрат на внеплановые ремонты:

- уменьшение количества отказов на линии за счёт раннего выявления предотказного состояния;
- предотвращение задержки перегона из-за невозможности безотлагательно освободить перегон или спецучасток;
- снижение затрат на устранение неисправности в СЛД;
- сокращение простоя на неплановом ремонте по причине локализации ремонта на стадии раннего диагностирования;
- сокращение затрат (в том числе логистических) на ремонт линейного оборудования на заводах Желдорреммаш.

В результате внедрения модели в СЛД «Братское» при выполнении цикловых работ сократились:

- время осмотра состояния бандажей колесных пар;
- объём работ по виброакустическому диагностированию подшипников качения колесно-моторных блоков;
- время осмотра буксового узла;
- объём работ по добавлению смазки;
- время проверки уровня и состояния смазки в буксах МОП;
- время ревизии моторно-осевых подшипников;
- время проверки состояния букс МОП;
- объём работ по проверке уровня смазки в кожухах;

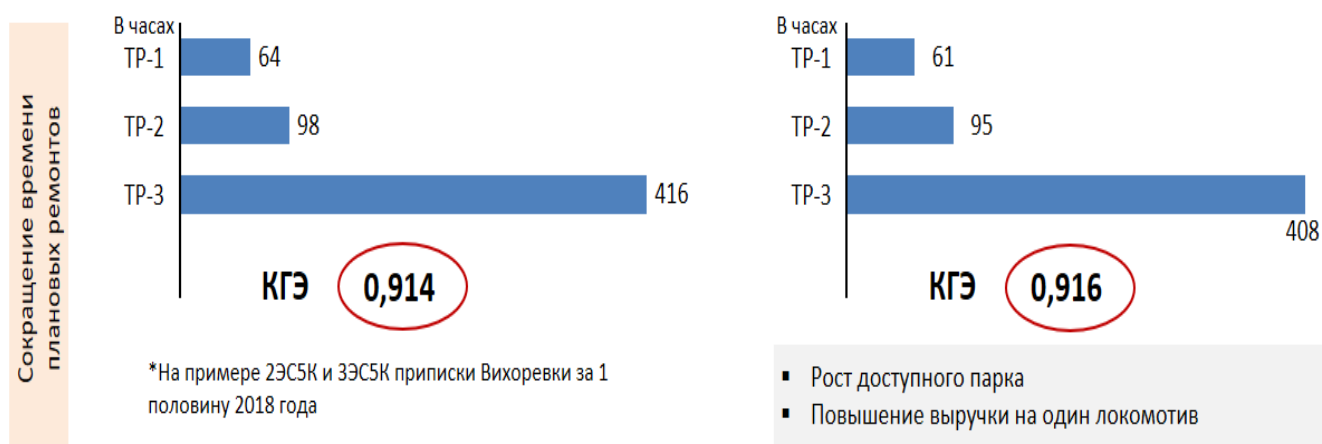
- время на осмотр гидравлических гасителей колебаний.

Годовая экономия по видам ремонта составила:

- техническое обслуживание ТО-2 (периодичность 72 часа: 115 ТО в год на локомотив): экономия материалов – 63,00 руб. на секцию, трудозатрат – 0,48 ч на секцию; годовая экономия средств – 26,450 тыс. руб.;
- технический ремонт ТР-1 (интервал раз в 50 тыс. км: 4 ТР-1 в год): экономия материалов – 8 тыс. руб. на секцию, трудозатрат – 2,88 ч на секцию; годовая экономия средств – 37,7 тыс. руб.;
- технический ремонт ТР-2 (интервал раз в 250 тыс. км) количество ТР-2 в год – 0,7 шт. Экономия материалов – 8 тыс. руб. на секцию. Экономия трудозатрат – 3,84 ч на секцию. Годовая экономия средств – 6,919 тыс. руб.

Годовая экономия от внедрения Модели в СЛД «Братское» для электровозов ЗЭС5К «Ермак» составила (рисунки 7.14 и 7.15):

- уменьшение количества отказов на линии за счёт раннего выявления предотказного состояния: 200,89 тыс. руб. (стоимость заводского ремонта ТЭД в объёме ТР-3);
- предотвращение задержки перегона из-за невозможности безотлагательно освободить перегон или спецучасток: 51,83 тыс. руб.;
- сокращение простоя на неплановом ремонте по причине локализации ремонта на стадии раннего диагностирования: 18,975 тыс. руб.;
- повышение коэффициента готовности: 80 тыс. руб.



а – до внедрения Модели

б – после внедрения Модели

Рисунок 7.18 – Увеличение коэффициента готовности в СЛД «Братское»

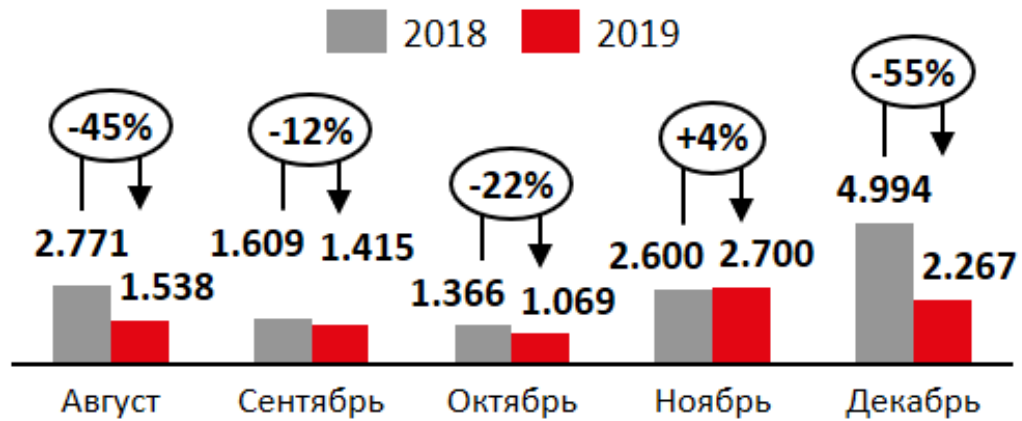


Рисунок 7.19 – Сокращение времени, затраченного на неплановые ремонты

7.4 ПЕРСПЕКТИВЫ ТИРАЖИРОВАНИЯ ОПЫТА

Восточный полигон железных дорог ОАО «РЖД» (Красноярская, Восточно-Сибирская, Забайкальская и Дальневосточная железные дороги) кроме северного широтного хода (БАМ) электрифицирован на переменном токе с использованием электровозов с выпрямительно-инверторными преобразователями: ВЛ80Р, ВЛ85, ЭП1 в/и, ЭС5К. Однотипность (унификация) электроподвижного состава создаёт предпосылки для тиражирования модели, реализованной в СЛД «Братское», на всём Восточном полигоне (рисунок 7.20). Предлагаемая модель требует существенных инвестиций. В связи с этим при тиражировании опыта СЛД «Братское» следует концентрировать мощности в базовых опорных депо (рисунок 7.21). В качестве таких сервисных локомотивных депо предлагаются «Боготол-Сибирский» для электровозов серии ВЛ80р, «Нижеудинск» для электровозов серии ВЛ85, «Абакан» для ЭС5К участка Междуреченск – Таксимо (совместно с СЛД «Братское»), «Чита», «Дальневосточное» (г. Хабаровск), «Приморское» (г. Смоляниново) для участка Карымская – Владивосток (Находка). Для тепловозного хода (БАМ) базовым сервисным локомотивным депо предлагается СЛД «Амурское» (г. Комсомольск-на-Амуре). Внедрение Модели позволит реализовать на Восточном полигоне современную автоматизированную систему управления жизненным циклом локомотивов на примере электровозов переменного тока и снизить годовые простои на 765 тыс. часов в год и увеличить мощность базовых депо.

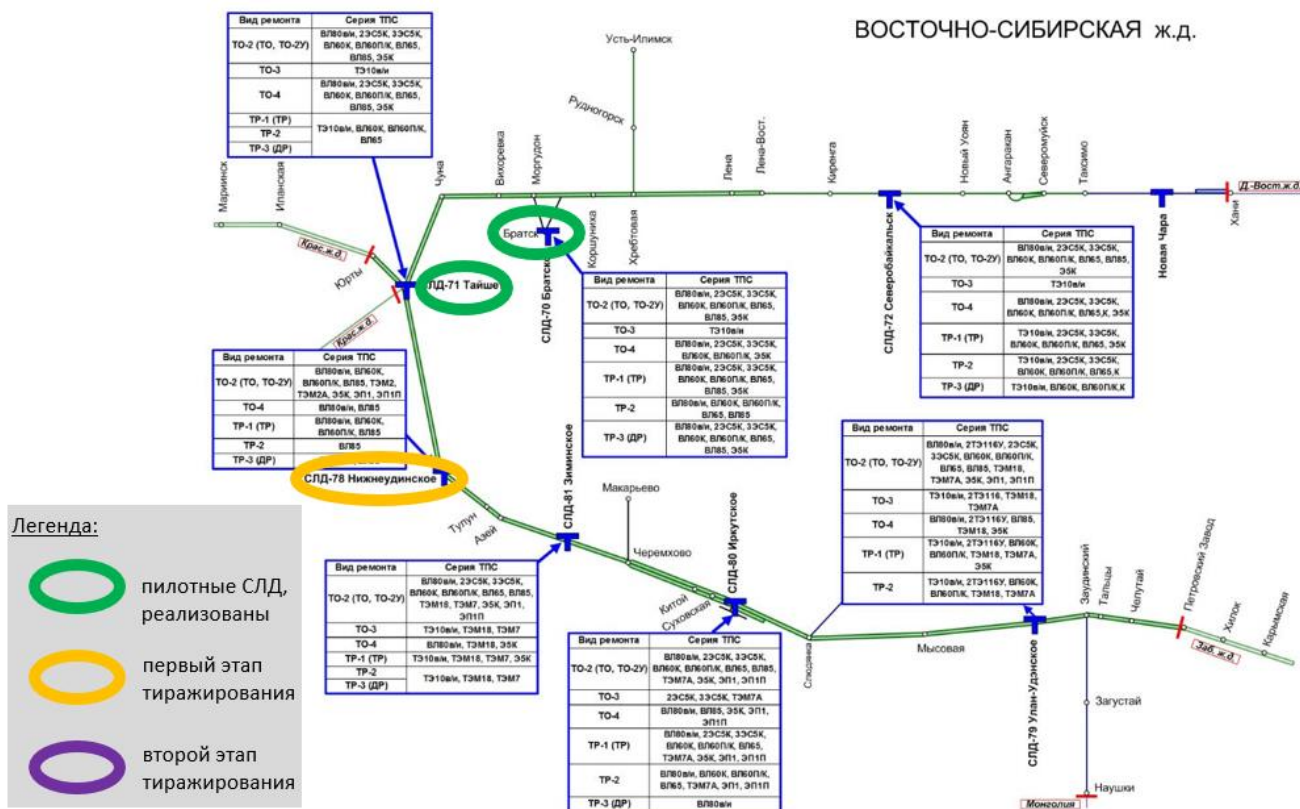


Рисунок 7.20 – Тиражирование опыта СЛД «Братское»

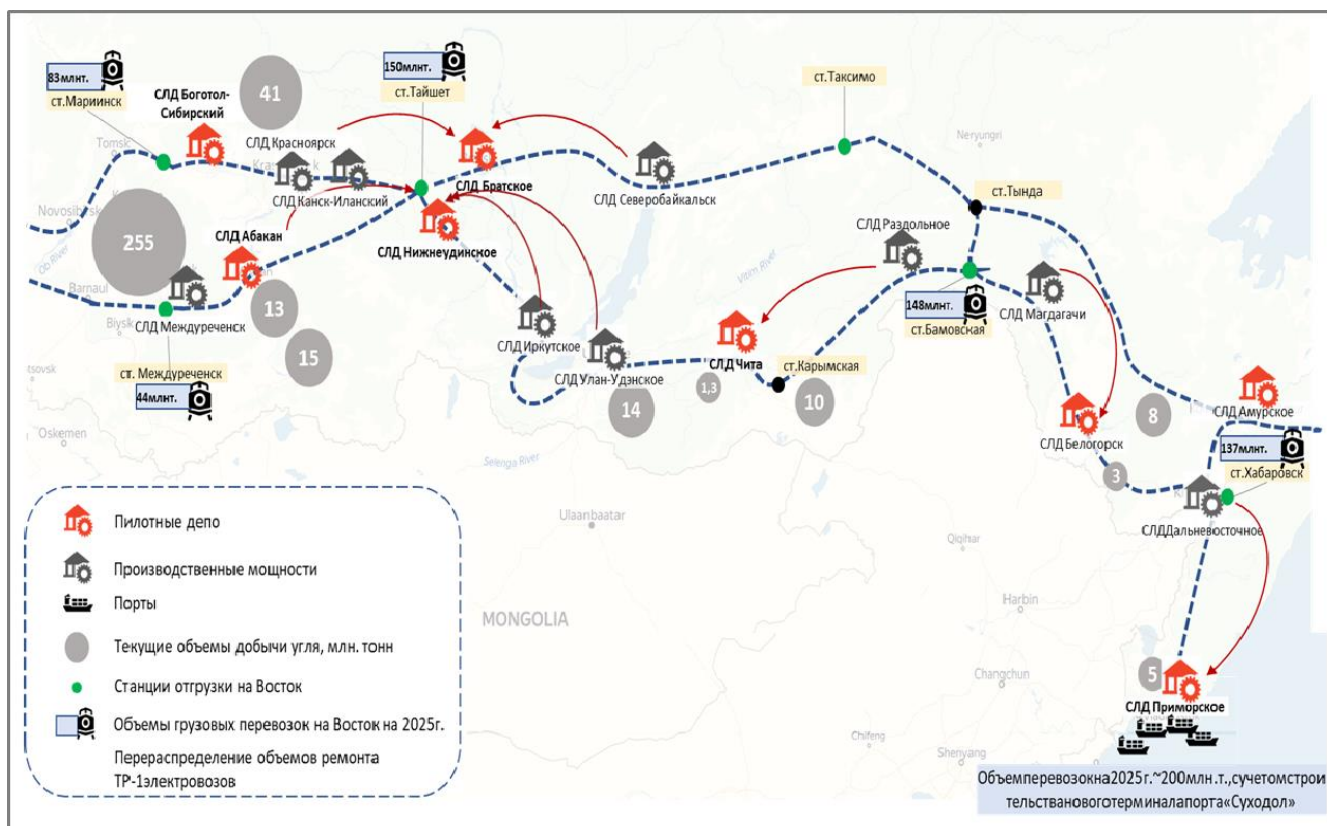


Рисунок 7.21 – Концентрация мощностей ТОиР на Восточном полигоне ОАО «РЖД»

7.5 ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 7

- 1 Основные принципы построения модели управления жизненным циклом локомотива как киберфизической производственной системы с интероперабельным информационным объединением разрозненных информационных систем, включая автоматизированные системы технического диагностирования, апробированы на примере внедрения её прототипа в сервисном локомотивном депо (СЛД) «Братское» группы компаний «ЛокоТех» на станции Вихоревке Восточно-Сибирской железной дороги.
- 2 Опыт эксплуатации АСУ ТОиР в СЛД «Братское» подтвердил правильность основных технических решений, предложенных в настоящей научной работе и сформулированных в разделе 6.
- 3 В результате внедрения предлагаемой Модели в СЛД «Братское» получен экономический эффект, существенно сокращено время простоя локомотивов на ТОиР, повышена надёжность локомотивов.

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 (далее – Модель). 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 взят за основу 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 массовых серий (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, правильная 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 и 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 планировании объёма ремонта с учётом диагностических данных совокупности всех АСТД. В основу метода положена 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 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).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

СОКРАЩЕНИЕ	ОПИСАНИЕ
АО	Акционерное общество
ОАО	Открытое акционерное общество
ОАО «РЖД»	ОАО «Российские железные дороги», главная компания-владелец отечественных локомотивов, рассматриваемых в диссертации
АПК	Аппаратно-программный комплекс
АРМ	Автоматизированное рабочее место, обобщённое название всех рабочих мест, имеющих в своём составе компьютер и специализированное программное обеспечение
АСИМ	Автоматизированная система информирования машиниста
АСОУП	Автоматизированная система оперативного управления поездами (технологическая основа АСУЖТ), главный источник информации об эксплуатации локомотивов
АСТД	Автоматизированная система технического диагностирования, одно из базовых понятий в диссертации
АСУ	Автоматизированная система управления, обобщённое название всех видов информационных систем с функциями управления различной степени сложности
АСУЖТ	АСУ железнодорожного транспорта (общее название всех АСУ и информационных систем ОАО «РЖД»)
АСУ ЖЦЛ	АСУ жизненного цикла локомотивов.
АСУ СГ	АСУ «Сетевой график»: информационно управляющая система (ERP- и MES-система) сервисных локомотивных депо группы компаний «ЛокоТех»
АСУСС	АСУ сортировочной станции
АСУ ТОиР	АСУ технического обслуживания и ремонта локомотивов: обобщённое название информационных систем, внедряемых в локомотиворемонтном комплексе
АСУТ	Информационная система АСУЖТ управления локомотивным хозяйством
АСУ ТП	АСУ технологических процессов производства
АЦП	Аналогово-цифровой преобразователь
АЧХ	Амплитудно-частотная характеристика
БАУ	Блок автоматического управления электровозов серии ВЛ85
БМЗ	Брянский машиностроительный завод, производитель тепловозов ТМХ
БУВИП	Электронный или микропроцессорный блок управления ВИП, предшественник МСУ
ВИП	Выпрямительно-инверторный преобразователь электровозов переменного тока производства НЭВЗ

СОКРАЩЕНИЕ	ОПИСАНИЕ
ВНИИЖТ	НИИ железнодорожного транспорта
ВНИКТИ	Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава
ВНПК	Всероссийская НПК
ВЭлНИИ	Всероссийский электровозостроительный НИИ
ГВЦ	Главный вычислительный центр ОАО «РЖД»
ГОСТ	Государственный стандарт России (национальный стандарт)
ДВГУПС	Дальневосточный государственный университет путей сообщения
ДГУ	Дизель генераторная установка
ДЦВ	Дорожный центр внедрения
ДЦУП	Дорожный центр управления поездами
ж.д.	железная дорога
ЖЦ, ЖЦЛ	Жизненный цикл локомотива, одно из базовых понятий в диссертации
ЕК АСУТР	Единая комплексная АСУ трудовыми ресурсами
ЕК АСУФР	Единая комплексная АСУ финансовыми ресурсами
ЗИП	Запасные части, инструменты и принадлежности
ИВЦ	Информационно-вычислительный центр (дорожный филиал ГВЦ)
ИОММ	Интегрированная обработка маршрута машиниста
ИрГУПС	Иркутский государственный университет путей сообщения
ИСУЖТ	Информационная система управления железнодорожным транспортом
КГЭ	Коэффициент готовности к эксплуатации
КЖЦ	Контракт жизненного цикла, чаще всего – между ОАО «РЖД» и производителем локомотивов)
КЗ	Коломенский завод, производитель дизелей, пассажирских тепловозов серии ТЭП70БС и электровозов серии ЭП2К
КМБ	Колёсно-моторный блок (один из ключевых элементов локомотива)
КР	Капитальный ремонт локомотивов
КрИЖТ	Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ИрГУПС
КТГ	Коэффициент технической готовности
КТЖ	Казахстан темир жолы (железные дороги Казахстана)
ЛВРЗ	Улан-Удэнский локомотивовогоноремонтный завод
ЛО	Линейное оборудование (МПИ), базовое понятие в КЖЦ для учёта элементов локомотива
ЛокоТех	ООО и группа компаний «Локомотивные технологии»
ЛЭС	Локомотивные электронные технологии
МВПС	Моторвагонный подвижной состав

СОКРАЩЕНИЕ	ОПИСАНИЕ
МИИТ	Московский институт инженеров железнодорожного транспорта – прежнее название Российского университета транспорта (РУТ)
МКЭ	Метод конечного элемента, метод САПР
МНПК	Международная НПК
МОП	Моторно-осевой подшипник
МПИ	Материалы повторного использования. Согласно договорам ОАО «РЖД» на сервисное обслуживание – аналог понятия ЛО
МПСУ	Микропроцессорная система управления (МСУ)
МСУ	Микропроцессорная система управления локомотивов
МСУД	МСУ электровозов переменного тока с ВИП производства НЭВЗ
МСУ-ТП, МСУ-ТЭ	МСУ отечественных тепловозов производства БМЗ и КЗ
МТО	Материально-техническое обеспечение
МЯП	Моторно-якорный подшипник
НИИ	Научно-исследовательский институт
НИИАС	Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (г. Москва)
НИИТКД	НИИ технологии, контроля и диагностики железнодорожного транспорта" ОАО "НИИТКД" (г. Омск)
НИОКР	НИР и ОКР, выполняемые при постановке изделия на производство согласно ГОСТ 15.902-2014
НИР	Научно-исследовательские работы (работа)
НПК	Научно-практическая конференция
НПО	Научно-производственное объединение
НР	Неплановый ремонт или обслуживание, как правило, из-за отказа на линии с заходом в СЛД
НРЭ	Нарушение режима эксплуатации локомотива
НЭВЗ	Новочеркасский электровозостроительный завод
ОКР	Опытно-конструкторские работы
ОмГУПС	Омский государственный университет путей сообщения
ПГУПС	Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения
ПК	Персональный компьютер (ЭВМ)
ПКБ	Проектно-конструкторское бюро
ПКБ ЦТ	ПКБ локомотивного хозяйства
ППС	Планово-предупредительная система ТОиР
ПС	Подвижной состав
ПСН	Преобразователь собственных нужд локомотива

СОКРАЩЕНИЕ	ОПИСАНИЕ
ПТОЛ	Пункт технического обслуживания локомотивов (как правило, в объеме ТО-2)
ПТЭ	Правила технической эксплуатации российских железных дорог
ПСН	Преобразователь собственных нужд
РГУПС	Ростовский государственный университет путей сообщения
РЖД	Российские железные дороги
РУТ	Российский университет транспорта (г. Москва, бывший МИИТ, МГУПС)
САПР	Системы автоматического проектирования (локомотивов)
САУТ	Система автоматического управления тормозами разработки НПО «САУТ». Микропроцессорная версия – САУТ-ЦМ
СВЛТР	Система взаимодействия с локомотивом посредством технологической радиосвязи
СКО	Среднеквадратичное отклонение (σ)
СЛД	Сервисное ремонтное локомотивное депо
СППР	Система поддержки принятия решений
СР	Средний ремонт локомотивов
СТД	Система технического диагностирования
СУБД	Система управления базами данных
СУБД ЖЦЛ	Система управления базами данных жизненного цикла локомотивов, одно из базовых понятий настоящей диссертации
Т	Локомотивное хозяйство, дирекция тяги региона
ТАУ	Теория автоматического управления
ТМХ	Холдинг по производству подвижного состава А «Трансмашхолдинг»
ТМЦ	Товарно-материальные ценности
ТО	Техническое обслуживание
ТО-1, ТО-2, ТО-3, ТО-4, ТО-5 и др.	Виды ТО локомотивов
ТОиР	Техническое обслуживание и ремонт
ТП	Технологический процесс
ТПС	Тяговый подвижной состав
ТР	Текущий ремонт
ТР-1, ТР-2, ТР-3	Виды ТР локомотивов
ТТ, ТЗ, ЭП, ТП, РД, ТУ, РКД, КД	Технические документы, разрабатываемые на изделие согласно ГОСТ 15.902-2014
ТУ	Технические условия
ТЧ	Локомотивное депо (телеграфный код)
ТЧР	Ремонтное ТЧ

СОКРАЩЕНИЕ	ОПИСАНИЕ
ТЧЭ	Эксплуатационное ТЧ
ТЭД	Тяговый электродвигатель
ТЭО	Технико-экономическое обоснование
УЗИ	Ультразвуковое исследование, один из методов диагностики
УЛ	Уральские локомотивы (локомотивостроительный завод группы «Синара»)
УРП	Универсальная ремонтная позиция для ремонта локомотивов, основа киберфизической модели сервисного ремонтного локомотивного депо (СЛД)
УСАВП	Универсальная система автоведения поезда
ЦАП	Цифро-аналоговый преобразователь
ЦД	Центральная дирекция управления движением – филиал ОАО «РЖД»
ЦТ	Дирекция тяги – филиал ОАО «РЖД»
ЦУП	Центр управления перевозками
ЦУТР	Центр управления тяговыми ресурсами ЦД
ШИМ	Широтно-импульсный регулятор
ЭВМ	Электронная вычислительная машина, включая ПК
ЭПК	Электро-пневматический клапан, устройство безопасности локомотива
ЭПЛ	Электронный паспорт локомотива
AI	Artificial Intelligence (искусственный интеллект)
CPPS	Cyber-Physical Production System (Киберфизические производственные системы, основа современных АСУ)
DB	Deutsche Bahn (Немецкие железные дороги)
GE	General Electric, компания в США, в т.ч. выпускающая тепловозы (General Electric Transportation)
EBITDA	Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization, одно из базовых понятий при расчёте ТЭО
ERP	Enterprise Resource Planning, типовая АСУ по управлению предприятием
ERTMS	The European Rail Traffic Management System
ETCS	European Train Control System
ICE	Intercity-Express
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor
IT	Information Technology, информационные технологии
ITIL	IT Infrastructure Library, библиотека знаний по сервисному обслуживанию ИТ-систем
ITSM	IT Service Management, базовая часть ITIL
MES	Manufacturing Execution System, типовая АСУ планирования производства

СОКРАЩЕНИЕ	ОПИСАНИЕ
MS	Microsoft
NFC	Near Field Communication
NPV	Net Present Value
OLAP	On-Line Analytical Processing
PDCA	Plan Do Check Act
RFID	Radio Frequency Identification
SLA	Service Level Agreement, соглашение об уровне сервиса, обычно SLA указывается в КЖЦ
SQL	Structured Query Language
TCN	Train Communication Network - поездная коммуникационная сеть
TPS	Toyota Production System
UIC	Международный союз железных дорог
VBA	Visual BASIC for Applications
т.н.	так называемый
т.п.	тому подобное
т.ч.	в том числе
а.с.	alternating current (переменный ток)
d.c.	direct current (постоянный ток)
etc.	et cetera (и т.д.)

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Аболмасов, А.А. Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Аболмасов Алексей Александрович. – М.: МИИТ, 2017 – 180 с.
- 2 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.
- 3 Аболмасов, А.А. Управление надежностью локомотивов в условиях реформирования локомотивного хозяйства [Текст] / А.А. Аболмасов // Труды XIII научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: МИИТ, 2012. – С. V-40.
- 4 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.
- 5 Автоматизированная система ведения и анализа графика исполненного движения [Электронный ресурс] // – ГИД «Урал – ВНИИЖТ». – М.: ОАО «РЖД», 2014 – URL: <http://scbist.com/stati-po-scb/1013-gid-ural.html> (дата обращения: 25.12.2020).
- 6 Автоматизированная система оперативного управления перевозками. Дорожный уровень. База данных АСОУП-2 / [Текст] – М: НИИАС, 2005. – 24 с.
- 7 АВП Технология. Официальный сайт ООО «АВП Технология» [Электронный ресурс] // – М.: АВП Технология, 2018 – URL: <https://www.avpt.ru> (дата обращения: 25.12.2021).
- 8 Айзинбуд, С.Я. Эксплуатация локомотивов / С.Я. Айзинбуд, П.И. Кельперис. [Текст] – 2-е изд. перераб. и доп. – М: Транспорт, 1990. – 261 с.
- 9 Анализируйте, прогнозируйте поведение и оптимизируйте инженерные расчётные проекты с помощью пакета COMSOL Multiphysics® [Электронный ресурс] // Сайт COMSOL – URL: <https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics> (дата обращения: 25.12.2021).
- 10 Аналоговые и цифровые вычислительные машины. [Электронный ресурс] // Сайт «Планета информатики». – URL: <https://inf1.info/analogdigital>. (дата обращения: 25.12.2021).
- 11 АПК ЭЛЬБРУС: Система построения энергооптимального графика движения поездов. [Электронный ресурс] // Сайт Эльбрус. – URL: <http://elbrus->

- г.ru/razrabotki/apk-elbrus. (дата обращения: 25.12.2021).
- 12 Аппаратно-программный комплекс «БОРТ» (10ДК. 318558. 041 АПК «Борт») [Текст] – Омск: НИИТКД, 2005. – 604 с.
 - 13 Аппаратно-программный комплекс «БОРТ» (АПК «БОРТ»). Руководство по эксплуатации. 55ДК.421459.100РЭ. [Текст] – Омск: НИИТКД, 2018, 43 с.
 - 14 Асмус, В.Ф. Иммануил Кант [Текст] / В. Ф. Асмус. – М.: Высшая школа, 2005. – 439 с.
 - 15 Ассоциация Деминга, официальный сайт. www.deming.ru (дата обращения: 25.01.2021).
 - 16 АСУ НБД-2 – Современное средство управления безопасностью и надёжностью локомотивов [Электронный ресурс] // – URL: <http://www.to-inform.ru/index.php/arkhiv/item> (дата обращения: 25.01.2021).
 - 17 Баранов, Л.А. Автоматизированные системы управления электроподвижным составом. В 3-х частях. Часть 1. Теория автоматического управления. [Текст] / Баранов Л.А., Савоськин О.Е. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте. 2014. – 400 с.
 - 18 Барков, В.А. Вибрационная диагностика колесно-редукторных блоков на железнодорожном транспорте [Текст] / А. В. Барков, Н. А. Баркова, В. В. Федорищев – СПб : Изд. центр СпбГМТУ, 2002, 103 с.
 - 19 Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники / Л. Бессонов – М.: Юрайт, 2016 – 364 с.
 - 20 Бочаров, В.М. Использование информации АПК «Борт» для изменения периодичности технического обслуживания (ТО-3) и текущего ремонта маневровых тепловозов [Текст] / В.М. Бочаров, С. М. Кузнецов // Труды всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава». – ОмГУПС, Омск, 2011. – С. 227-233.
 - 21 Буйносов А.П. Имитационное моделирование процесса технических обслуживаний и текущих ремонтов электровозов в сервисном локомотивном депо / Буйносов А. П., Панов К. В. // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань, 2019. № 12. С. 177-180.
 - 22 Буйносов, А.П. Влияние разности диаметров бандажей на износ колесных пар тягового подвижного состава / А.П. Буйносов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения : научно-технический журнал.

- 2010. - N 3. - С. 64-74.
- 23 Буйносов, А.П. Выбор профиля поверхности катания бандажей колесных пар электровозов ВЛ11 [Текст] / А.П. Буйносов, В.А. Тихонов – Челябинск: Вестник Уральского государственного университета путей сообщения : научно-технический журнал. - 2012. - N 2. -С. 46-61.
 - 24 Буйносов, А.П. Методы повышения ресурса бандажей колесных пар тягового подвижного состава [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / Буйносов Александр Петрович ; УрГУПС. – Екатеринбург, 2011. - 455 с.
 - 25 Вентцель, Е.С. Теория вероятностей [Текст] / Е.С. Вентцель. – 4-е изд. стереотипное. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
 - 26 Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения [Текст] / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров // – М.: Академия, 2003. – 464 с.
 - 27 Веселовский, О.Н. Очерки по истории электротехники [Текст] / О. Н. Веселовский, Я.. Шнейберг – М.: Издательство МЭИ, 1993. – 252 с.
 - 28 Вигилев, А.Н. История отечественной почты [Текст] / А.Н. Вигилев. – М.: Радио и связь, 1990, 312 с.
 - 29 Википедия – электронная энциклопедия. [Электронный ресурс] // – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения: 25.01.2021).
 - 30 Викисловарь [Электронный ресурс] // – URL: <http://ru.wiktionary.org/wiki> (дата обращения: 25.01.2021).
 - 31 Винер, Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине [Текст] / Норберт Винер. – Пер. с англ. – М.: Наука, 1983. – 344 с.
 - 32 Винер, Н. Человек управляющий [Текст] / Норберт Винер. – СПб : Питер, 2001. – 288 с.
 - 33 Внедрение методологии УРРАН в локомотивном комплексе ОАО «РЖД» [Текст] : – М.: НИИАС, 2013. – 17 с.
 - 34 Вовк, А.А. Основы общей теории статистики [Текст] / А.А. Вовк. – М.: Маршрут, 2006. – 240 с.
 - 35 Воробьев, А.А. Оптимизация периодичности и объемов плановых ремонтов ЭПС и прогнозирование его технического состояния: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук [Текст] / Воробьев Александр Алексеевич; – М., МИИТ, 1992. – 362 с.
 - 36 Воробьев, А.А. Основы технологии производства подвижного состава [Текст] /

- А.А. Воробьёв, А.В. Горский. – М.: МИИТ, 2003. – 228 с.
- 37 Воротилкин, А.В. Локомотивный комплекс и перспективы его развития [Текст] / А.В. Воротилкин // Локомотив. – 2011. – № 1. – С. 2-5.
 - 38 Вульф, А.Б. История железных дорог Российской империи [Текст] / А. Вульф. – М.: РИПОЛ классик, 2018. – 744 с.
 - 39 Галанов, Ю.И. Статистическое моделирование: Учебное пособие [Текст] / Ю.И. Галанов. – 2-е изд. доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 42 с.
 - 40 Глушков, В.М. Синтез цифровых автоматов [Текст] / В.М. Глушков – М.: ГИФМЛ, 1962. – 476 с.
 - 41 Головатый, А.Т. Электроподвижной состав. Эксплуатация, надежность и ремонт: Учебник для вузов ж.- д. транспорта [Текст] / А.Т. Головатый, И.П. Исаев, П.И. Борцов. – М.: Транспорт, 1983. – 350 с.
 - 42 Головатый, А.Т. Техническое обслуживание и ремонт локомотивов за рубежом [Текст] / А.Т. Головатый, А.Ю. Лебедев. – М.: Транспорт, 1977. – 159 с.
 - 43 Головаш, А.Н. Проблемы и решения сервисного обслуживания локомотивов [Текст] / А. Н. Головаш // Труды первой международной научно-практической конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов». – М.: ООО «ТМХ-Сервис», 2014. – С.141-143.
 - 44 Горленко, А. В. Техническое диагностирование электронного оборудования электровозов переменного тока [Текст] / А.В. Горленко, И.К. Лакин, А.Л. Донской, Н.Г. Шабалин – М., Транспорт, 1992, 112 с.
 - 45 Горский, А. В. Использование эксплуатационных показателей надёжности для оптимизации межремонтных пробегов электровозов на полигоне Челябинск – Рыбное [Текст] / А.В. Горский, А.А. Воробьёв, А.В. Скребков // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: материалы первой международной научно-практической конференции – М.: ООО «ТМХ-Сервис», 2014. – С. 144 – 152.
 - 46 Горский, А.В. Методы оптимизации системы планово-предупредительных ремонтов электровозов: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук [Текст] / Горский Анатолий Владимирович. – М., МИИТ, 1985. – 526 с.
 - 47 Горский, А.В. Оптимизация сроков ремонта на основе интенсивности отказов [Текст] / А.В. Горский, В.А. Козырев, А.В. Скребков // Мир транспорта. – 2015.

– № 5. С. 16-18.

- 48 Горский, А.В. Надёжность электроподвижного состава [Текст] / А.В. Горский, А.А. Воробьёв. – М.: Маршрут, 2005. – 303 с.
- 49 Горский, А. В. Оптимизация системы ремонта локомотивов [Текст] / А.В. Горский, А.А. Воробьев. – М.: Транспорт. 1994. – 208 с.
- 50 ГОСТ 15.902-2014. Система разработки и постановки продукции на производство (СРПП). Железнодорожный подвижной состав. Порядок разработки и постановки на производство. – М.: Стандартиформ, 2019, 81 с.
- 51 ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2007, 34 с.
- 52 ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 12 с.
- 53 ГОСТ 24.202-80. Система технической документации на АСУ. Требования к содержанию документа «Технико-экономическое обоснование создания АСУ» – М.: Стандартиформ, 2016, 9 с.
- 54 ГОСТ 25866-83. Эксплуатация техники. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 1983, 11 с.
- 55 ГОСТ 2.601-2006. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Эксплуатационные документы. – М.: Стандартиформ, 2008, 56 с.
- 56 ГОСТ Р 27.001-2009. Надёжность в технике (ССНТ). Система управления надёжностью. Основные положения – М.: Стандартиформ, 2010, 16 с.
- 57 ГОСТ 27.002-2015. Надёжность в технике (ССНТ). Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2016, 63 с.
- 58 ГОСТ 27.003-2016. Надёжность в технике (ССНТ). Состав и общие правила задания требований по надёжности – М.: Стандартиформ, 2018, 37 с.
- 59 ГОСТ 27.004-85. Надёжность в технике (ССНТ). Системы технологические. Термины и определения – М.: Стандартиформ, 2002, 29 с.
- 60 ГОСТ 27.202-83. Надёжность в технике (ССНТ). Технологические системы. Методы оценки надёжности по параметрам качества изготавливаемой продукции – М.: Стандартиформ, 2018, 37 с.
- 61 ГОСТ Р 27.201-2011. Надёжность в технике. Экспертиза проекта – М.: Стандартиформ, 2013, 39 с.

- 62 ГОСТ Р 27.202-2012. Надежность в технике (ССНТ). Управление надежностью. Стоимость жизненного цикла – М.: Стандартинформ, 2014, 29 с.
- 63 ГОСТ 27.203-83. Надежность в технике. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надежности – М.: Стандартинформ, 2002, 8 с.
- 64 ГОСТ 27.203-2012. Надежность в технике (ССНТ). Управление устареванием – М.: Стандартинформ, 2014, 41 с.
- 65 ГОСТ 27.204-83. Надежность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надежности по параметрам производительности – М.: Стандартинформ, 2002, 46 с.
- 66 ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения – М.: Стандартинформ, 2002, 20 с.
- 67 ГОСТ 27.301-2011. Надежность в технике (ССНТ). Управление надежностью. Техника анализа безотказности. Основные положения – М.: Стандартинформ, 2013, 24 с.
- 68 ГОСТ 27.302-2009. Надежность в технике (ССНТ). Анализ дерева неисправностей – М.: Стандартинформ, 2011, 38 с.
- 69 ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения – М.: Стандартинформ, 2002, 18 с.
- 70 ГОСТ 27.402-95. Надежность в технике. Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ). Часть 1. Экспоненциальное распределение – М.: Стандартинформ, 2002, 82 с.
- 71 ГОСТ 27.403-2009. Надежность в технике. Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы – М.: Стандартинформ, 2010, 24 с.
- 72 ГОСТ 27.507-2015. Надежность в технике (ССНТ). Запасные части, инструменты и принадлежности. Оценка и расчет запасов – М.: Стандартинформ, 2017, 95 с.
- 73 ГОСТ 31539-2012. Цикл жизненный железнодорожного подвижного состава. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2014, 14 с.
- 74 ГОСТ 32192-2013. Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения – М.: Стандартинформ, 2016, 71 с.
- 75 ГОСТ 34056-2017 Транспорт железнодорожный. Состав подвижной. Термины и определения – М.: Стандартинформ, 2019, 26 с.

- 76 ГОСТ Р 50779.10-2000. Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 46 с.
- 77 ГОСТ Р 50779.21-96. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным Часть 1: Нормальное распределение. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 48 с.
- 78 ГОСТ Р 50779.22-2005. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 11 с.
- 79 ГОСТ Р 50779.23-2005. Статистическое представление данных. Сравнение двух средних в парных наблюдениях – М.: Изд-во стандартов, 2005. – 8 с.
- 80 ГОСТ Р 50779.42-99. Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 36 с.
- 81 ГОСТ Р 52122-2003. Техническая диагностика. Локомотивы магистральные. Встроенные системы диагностирования. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 8 с.
- 82 ГОСТ Р 52944-2008 Цикл жизненный железнодорожного подвижного состава. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2008. 8 с.
- 83 ГОСТ 53791-2010. Ресурсосбережение. Стадии жизненного цикла изделий производственно-технического назначения. Общие положения. – М.: Стандартиформ, 2011, 12 с.
- 84 ГОСТ Р 55062-2012. Информационные технологии (ИТ). Системы промышленной автоматизации и их интеграция. Интероперабельность. Основные положения. – М.: Стандартиформ, 2018, 16 с.
- 85 ГОСТ Р 56135-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Общие положения. – М.: Стандартиформ, 2016, 27 с.
- 86 ГОСТ Р 56136-2014. Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2016, 34 с.
- 87 ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99 Информационная технология (ИТ). Взаимосвязь открытых систем Базовая эталонная модель. Часть 1. Базовая модель. - М.: Стандартиформ, 2006, 113 с.
- 88 ГОСТ Р ИСО 9000-2008. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь – М.: Изд-во стандартов, 2008. – 31 с.
- 89 Грачёв, А.А. Системы автоматизации и информационные технологии управления перевозками на железных дорогах: Учебник для вузов [Текст] /

- А.А. Грачёв, В.А. Гапанович и др.; под редакцией В.И. Ковалёва, А.Т. Осьминина, Г.М. Грошева. – М.: Маршрут, 2006. – 544 с.
- 90 Грачёв, В.В. Научные основы применения методов интеллектуального анализа данных для контроля технического состояния локомотивов : [Текст] дис. ... докт. техн. наук: 05.22.07 / Грачев Владимир Васильевич – СПб , ПГУПС, 2020, 434 с.
 - 91 Грачев, В.В. Оценка технического состояния тепловозного дизеля по данным бортовой микропроцессорной системы управления [Текст] / В.В. Грачев, М.Ш. Валиев // Известия ПГУПС. – 2010. – №1. – С. 22-32.
 - 92 Гудвин, Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Греббе, М.Э. Сальгадо – М.: Бином, Лаборатория базовых знаний, 2010.
 - 93 Гудфеллоу, Я. Глубокое обучение = Deep Learning. [Текст] / Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. – М.: ДМК-Пресс, 2017. – 652 с.
 - 94 Гутер, Р.С. От абака до компьютера [Текст] / Гутер Р.С., Полунов Ю.Л. –М.: Знание, 1981. – 208 с.
 - 95 Давыдов, Ю.А. Моделирование и анализ информационных потоков при автоматизированном управлении технологическими процессами в локомотивном депо [Текст] : дис. ... докт. техн. наук: 05.22.07 / Давыдов Юрий Анатольевич – М., МИИТ, 2001. – 482 с.
 - 96 Давыдов, Ю.А. Интерактивная система диагностирования объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта [Текст] / Ю.А. Давыдов, А.К. Пляскин, М.Ю. Кейно // Труды первой международной научно-практической конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов». – М.: ООО «ТМХ-Сервис», 2014. – С. 237-241.
 - 97 Давыдов, Ю.А. Моделирование, оптимизация и контроль информационных потоков локомотивного депо [Текст] / Ю.А. Давыдов. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2001. – 116 с.
 - 98 Давыдов, Ю.А. Принципы моделирования информационной системы локомотивного депо [Текст] / Ю.А. Давыдов. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2000. – 163 с.
 - 99 Двоичная система счисления: [Электронный ресурс] // – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения 25.01.2021).
 - 100 Дегтярев, С. Г. Технология вибрационного диагностирования подшипников качения колёсно-моторных блоков / С.Г. Дегтярев, А.В. Комяков (ВАСТ-

- Сервис), А.В. Барков, Н.А. Баркова (Северо-Западный учебный центр).
- 101 Деминг, Э. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами [Текст] / Э. Деминг. – Пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. – 370 с.
 - 102 Джонс, Дэниэл Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании [Текст] / Дэниел Джонс, Джеймс Вумек – М.: Альпина Паблишер, 2020, 472 с.
 - 103 Дизель типа Д49. Сайт Коломенского завода. Тепловозные дизели типа Д49 [Электронный ресурс] // – URL: http://www.kolomnadiesel.com/catalog/diesels/section_detail.php?SECTION_ID=16 (дата обращения: 25.01.2021).
 - 104 Дизели типа Д49 и вспомогательное оборудование. Сайт «Консультант Студента. Электронная библиотека технического вуза» studentlibrary.ru (дата обращения: 25.01.2021).
 - 105 Дизель типа Д49. Общие сведения. - Устройство и ремонт дизеля - Справка 2ТЭ116 - Тепловоз 2ТЭ116 (Дизель 1А5Д49) (ucosz.ru)/ [Электронный ресурс] // – URL: <https://teplovoz.ucos.ru> (дата обращения: 25.01.2021).
 - 106 Договор на поставку локомотивов ОАО «РЖД» и ЗАО «Рослокомотив» с обязательством обеспечения их сервисного обслуживания в период жизненного цикла (КЖЦ) № 2833180 от 29.03.2018. – М.: ОАО «РЖД», 2018.
 - 107 Договоры ОАО «РЖД» с СТМ-Сервис (№ 284) и ТМХ-Сервис (№ 285) от 30.04.2014 на сервисное обслуживание локомотивов. – М.: ОАО «РЖД», 2014.
 - 108 Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года. – М.: ОАО «РЖД», 2018, 93 с.
 - 109 Дорф, Р. Современные системы управления / Дорф Р., Бишоп Р. – М.: Бином, Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.
 - 110 Дробинский, В.А. Как устроен и работает тепловоз [Текст] / В.А. Дробинский, П.М. Егунов – М.: Транспорт, 1980, 367 с.
 - 111 Единая интеллектуальная система управления и автоматизации производственных процессов на железнодорожном транспорте ИСУЖТ. [Электронный ресурс] // – URL: <http://www.vniias.ru/isuzht> (дата обращения 25.01.2021).
 - 112 Единая система мониторинга работы бортовых систем (ЕСМ БС).

- [Электронный ресурс] // – URL: <http://infokom.org/edinaya-sistema-bortovih-sistem> (дата обращения: 25.01.2021).
- 113 Закс, Л. Статистическое оценивание [Текст] / Пер. с нем. В.Н. Варыгина; Науч. ред. и предисл. Ю.П. Адлера, В.Г. Горского. – М.: Статистика, 1976. – 598 с.
 - 114 Замышляев, А. М. Автоматизация процессов комплексного управления техническим содержанием инфраструктуры железнодорожного транспорта [Текст] : дис. ... докт. техн. наук: 05.13.06, / Замышляев Алексей Михайлович – М., РУТ, 2013. – 460 с.
 - 115 Иванов, В.В. Эксплуатация локомотивов и локомотивное хозяйство: Учебник для вузов ж.-д. транспорта [Текст] / В.В. Иванов, Ю.Е. Просвиров, В.Б. Скоркин и др.; под редакцией Ю.Е. Просвирова. – Самара: Изд-во СамГУПС, 2012. – 250 с.
 - 116 Игин, В.Н. Научные основы анализа и контроля энергетической эффективности эксплуатируемого парка тепловозов [Текст] : дис. ... докт. техн. наук: 05.22.07 / Игин Валерий Николаевич. – М., МИИТ, 2002. – 300 с.
 - 117 Ильин, А.И. Комплексная система обеспечения эксплуатационной надежности технических средств на основе диагностических методов мониторинга технического состояния и планирования технического обслуживания и ремонта подвижного состава. Отчет о выполнении научно-исследовательской работы по теме»: «Разработка требований к системе обеспечения эксплуатационной надежности подвижного состава и методических основ для определения его технического состояния». 32.5.003.Р, НИР / Руководитель темы: А.И. Ильин – Омск: НИИТКД, 2011, 765 с.
 - 118 Ильин, А.И. Пилотный проект технического обслуживания и ремонта тепловозов типа ТЭ10 в депо Тынды Дальневосточной железной дороги с учетом энергосберегающих технологий. Раздел отчёта НИР / Под редакцией А.И. Ильина – Омск: НИИТКД, 2012 – 146 с.
 - 119 Иностранные слова в русском языке. [Электронный ресурс] // – URL: <http://www.wikijournal.ru/index.php> (дата обращения: 25.01.2021).
 - 120 Информации теория. Сайт «Энциклопедия Кругосвет». [Электронный ресурс] // – URL: https://www.krugosvet.ru/enc/nauka_i_tehnika/matematika/INFORMATSII_TEORIYA.html (дата обращения: 25.01.2021).
 - 121 Информационно-аналитическая система АСУ ЗМ [Электронный ресурс] // – URL: <http://scbist.com/wiki/25678-asu-zm.html> (дата обращения: 25.01.2021).

- 122 Информационная энтропия. [Электронный ресурс] // Сайт «Loginom»: – URL: <https://wiki.loginom.ru/articles/inform-entropy.html> (дата обращения: 25.01.2021).
- 123 Иньков, Ю.М. Диагностирование локомотивов методом статистического последовательного анализа энергозатрат по поездкам [Текст] / Ю.М. Иньков, В.П. Феоктистов, Н.Г. Шабалин // Труды первой международной научно-практической конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов». – М.: ООО «ТМХ-Сервис», 2014. – С. 158-160.
- 124 Иньков, Ю.М. Эксплуатация и ремонт электроподвижного состава магистральных железных дорог: Учеб. пособие [Текст] / Ю.М. Иньков, В.П. Феоктистов, Н.Г. Шабалин; под редакцией Ю.М. Инькова. – М.: Изд-во МЭИ, 2011. – 384 с.
- 125 Исаев И.П. Влияние допусков на характеристики электроподвижного состава [Текст] : дис. ... докт. техн. наук: 05.22.07 / Исаев Игорь Петрович – М.: МИИТ, 1956.
- 126 Исаев, И.П. Стремитесь познавать: Методологический подход к исследованию и решению технических проблем железнодорожного транспорта [Текст] / И. П. Исаев. – М.: Транспорт, 1988. – 159 с.
- 127 Исикава, К. Японские методы управления качеством / Пер. с англ. / [Текст] – М.: Экономика, 1988. – 215 с.
- 128 Как цифровые дойки помогают российской промышленности. [Электронный ресурс] // Сайт RUSBASE. – URL: <https://rb.ru/longread/digital-twin/> (дата обращения: 25.01.2021).
- 129 Како, Н. Датчики и микро-ЭВМ / Како Н., Яманэ Я. //Пер. с япон. –Ленинград: Энергоатомиздат. Ленинг. отд-ние, 1986. – 120 с.
- 130 Капустин, Л.Д. Особенности устройства и эксплуатации электровоза ВЛ80Р [Текст] / Л.Д. Капустин, А.С. Копанев, А.Л. Лозановский – М.: Транспорт, 1979. – 175 с.
- 131 Карибский, В.В. Основы технической диагностики [Текст] / Карибский В.В., Пархоменко П.П., Согомонян Е.С., Халчев В.Ф. – М.: Энергия, 1976. – 464 с.
- 132 Каталог датчиков (сенсоров). [Электронный ресурс] // Сайт «Амперка». – URL: <https://amperka.ru/collection/sensors> (дата обращения: 25.01.2021).
- 133 Квантовые вычисления против классических: зачем нам столько цифр

- [Электронный ресурс] // – URL: <https://habr.com/ru/company/sberbank/blog/343308/> (дата обращения: 25.01.2021).
- 134 Ким, С.И. Тепловозы. Назначение и устройство: Учебник для образовательных учреждений ж.- д. транспорта [Текст] / С.И. Ким, О.Г. Куприенко, Э.И. Нестеров, А.С. Евстратов; под редакцией О.Г. Куприенко. – М.: Маршрут, 2006. – 280 с.
 - 135 Киселёв, В.И. Опыт сервисного обслуживания локомотивов [Текст] / В. И. Киселёв, И.И. Лакин // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 4. – С. 64-67.
 - 136 Киселёв, В. И. Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава: Учеб. пособие [Текст] / В.И. Киселев, В.А. Гапанович, И.К. Лакин и др. – М.: ИРИС Групп, 2012. – 576 с.
 - 137 Княгин, В.Н. Цифровая трансформация: бизнес-модели и рыночные игроки [Текст] / В.Н. Княгин // М.: Сколково. 2019.
 - 138 Колчин, И. Система железнодорожной автоматизации SIBAS PN. Разработки [Текст] / Иван Колчин Железнодорожный транспорт СТА 2/2015 www.cta.ru (дата обращения: 25.01.2021).
 - 139 Комплексная автоматизированная система учёта, контроля устранения отказов технических средств и анализа их надёжности. [Электронный ресурс] // – Режим доступа: – URL: <http://scbist.com/sistemy-centralizacii-i-blokirovki/1570-kasant.html> (дата обращения: 25.01.2021).
 - 140 Компьютер аналоговый. [Электронный ресурс] // Сайт Новосибирского государственного университета. – URL: http://www.nsc.ru/win/elbib/data/show_page.dhtml?77+87 (дата обращения: 25.01.2021).
 - 141 Комяков, А.А. Методология организации ресурсосберегающих производственных систем на железнодорожном транспорте [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.22 / Комяков Александр Анатольевич – Екатеринбург: УрГУПС, 2021, 340 с.
 - 142 Контракт жизненного цикла. [Электронный ресурс] // Сайт Госзакупок. – URL: <https://goscontract.info/kontrakt/izuchaem-kontrakty-zhiznennogo-tsikla>. (дата обращения: 25.01.2021).
 - 143 Контракт жизненного цикла (КЖЦ) - новый механизм в России. [Электронный ресурс] // Сайт VEGAS LEX. – URL: http://www.pppi.ru/sites/all/themes/pppi/img/life_contract1.pdf. (дата обращения: 25.01.2021).

- 144 Концепция постоянного улучшения инновационной деятельности ОАО «РЖД» – М.: ОАО «РЖД», 2010 – 79 с.
- 145 Космодамианский, А.С. Автоматические системы регулирования [Текст] / А.С. Космодамианский. – М.: РГОТУПС, 2004. – 40 с.
- 146 Космодамианский, А.С. Автоматические системы управления локомотивов [Текст] / Учебник для вузов ж. - д. транспорта [Текст] / А.С. Космодамианский, Н.М. Луков. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 429 с.
- 147 Коссов, Е.Е. Анализ стоимости жизненного цикла (LCC) при оценке эффективности подвижного состава [Текст] / Е.Е. Коссов, М. Бабел, М. Шкода // Вестник ВНИИЖТ. – 2013. – № 6. – С. 55-59.
- 148 Котельников, В.С. История котлонадзора в России [Текст] / В.С. Котельников, Н.А. Хапонен. Сайт РосТепло. www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=815 (дата обращения: 25.01.2021).
- 149 Кузьмич, В.Д. Теория локомотивной тяги: Учебник для вузов ж.- д. транспорта [Текст] / В.Д. Кузьмич – М.: Маршрут, 2005. – 448 с.
- 150 Курганова, Н.В. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства [Текст] / Н.В. Курганова, М.А. Филн, Д.С. Черняев, А.Г. Шаклейн, Д.Е. Намиот // International Journal of Open International Technologies, 2019, № 5. С. 105 – 109.
- 151 Лайонс, Ричард. Цифровая обработка сигналов: Второе издание [Текст] / Ричард Лайонс // Пер. с англ. – М.: Бином-Пресс, 2006 г. – 656 с.
- 152 Лакин, И.И. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Лакин Игорь Игоревич; – М., МИИТ, 2016 – 195 с.
- 153 Лакин, И.К. Разработка теории и программно-технических средств комплексной автоматизированной справочно-информационной и управляющей системы локомотивного депо [Текст] : дис. ... докт. техн. наук: 05.22.07 / Лакин Игорь Капитонович. – М., МИИТ, 1997. – 377 с.
- 154 Лакин, И.К. Автоматизированная система управления локомотивным хозяйством. АСУТ [Текст] / И.К. Лакин, Ю.В. Смирнов, А.Ю. Тимченко. – М.: ОЦВ, 2002. – 516 с.
- 155 Лакин, И.К. Анализ основных показателей работы железнодорожного транспорта [Текст] / И.К. Лакин // Транспорт РФ. – 2007. – № 1. –

С. 60-63.

- 156 Лакин, И.К. Инкапсуляция статистических методов управления в информационные системы Локотех [Текст] / И.К. Лакин, С.Л. Лянгасов, А.А. Аболмасов // Труды третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава». – Омск: ОмГУПС, 2015. – С. 14-21.
- 157 Лакин, И.К. Применение статистических методов при диагностировании тепловозов [Текст] / И.К. Лакин, А.А. Аболмасов, В.А. Мельников // Известия Транссиба. – 2015. – № 1. – С. 20-29.
- 158 Лакин, И.К. История создания систем менеджмента качества (СМК) и особенности их внедрения на железнодорожном транспорте [Текст] / И.К. Лакин, В.Н. Супрун. – Красноярск: КФ ИрГУПС, 2006. – 92 с.
- 159 Лакин, И.К. Модель управления рисками отказов локомотивов [Текст] / И.К. Лакин, А.А. Аболмасов, В.А. Мельников // Мир транспорта. – 2013. – № 4. – С. 130-136.
- 160 Лакин, И.К. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации по данным бортовых микропроцессорных систем тепловозов [Текст] / И.К. Лакин, А.А. Аболмасов, В.А. Мельников // Труды IV международной партнерской конференции EuroTrain «Современный подвижной состав: приоритеты, инновации, перспективы». – Украина, Ялта, – 2013. – С. 50-51.
- 161 Лакин, И.К. Автоматизированная система управления эксплуатационным жизненным циклом локомотивов [Текст] / И.К. Лакин, И.В. Пустовой, А.А. Аболмасов // Труды НПК «Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава» - Красноярск: ДЦВ Красноярской ж.д., 2020. – С. 223-246.
- 162 Лакин, И.К. Автоматизированная система управления надёжностью сервисных локомотивов [Текст] / И.К. Лакин, А.А. Аболмасов, В.А. Мельников // Труды XIV научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: МИИТ, 2013. – С. III-38.
- 163 Лакин, И.К. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации по данным бортовых микропроцессорных систем тепловозов [Текст] / И.К. Лакин, А.А. Аболмасов, В.А. Мельников // Труды IV международной конференции «Железнодорожное машиностроение». – Экспо 1520, Щербинка, 2013. – С. 67.

- 164 Лакин, И.К. Особенности применения статистических методов анализа при управлении надежностью локомотивов [Текст] / И.К. Лакин, А.А. Аболмасов // Труды второй международной научно-практической конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов». – М.: ООО «Локомотивные технологии», 2015. – С. 180-186.
- 165 Лакин, И.К. Автоматизированное управление жизненным циклом локомотивов на этапе их эксплуатации [Текст] / И.К. Лакин, А.А. Аболмасов, И.И. Лакин, И.В. Пустовой, А.И. Баранов, А.А. Храпин, А.В. Гребенюк // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: материалы третьей международной научно-практической конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов». – М.: ООО «ЛокоТех», 2018. – С. 214-233.
- 166 Лакин, И. К. Как предупредить заход локомотива на неплановый ремонт / И. К. Лакин, А. А. Аболмасов [Электронный ресурс] // – М.: сайт «СЦБИСТ», 2019, № 3 – URL: <http://scbist.com/xx2/51650-03-2019-kak-predupredit-zahod-lokomotiva-na-neplanovyi-remont.html> (дата обращения: 25.01.2021).
- 167 Лакин, И.К. Особенности основных понятий в области надёжности тягового подвижного состава [Текст] / 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.
- 168 Лакин И.К. Автоматизация управления надёжностью оборудования локомотивов / И.К.Лакин, В.В.Семченко, А.П.Семенов – Локомотив – М.: 2020, № 9, С. 35-36.
- 169 Лapidус, В.А. Всеобщее качество (TQM) в российских компаниях [Текст] / В.А. Лapidус. – М.: ОАО «Типография Новости», 2000. – 432 с.
- 170 Лецкий, Э.К. Управление и информационные технологии на железнодорожном транспорте [Текст] / Э.К. Лецкий, Л.П. Тулупов, И.Н. Шапкин, А.И. Самохвалов и др.; под редакцией Л.П. Тулупова. – М.: Транспорт, 2005. – 407 с.
- 171 Липа, К.В. Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых микропроцессорных систем управления [Текст] / К.В. Липа, В.И. Гриненко, С.Л. Лянгасов, И.К. Лакин, А.А. Аболмасов, В.А. Мельников. – М.: ООО «ТМХ-Сервис», 2013. – 156 с.

- 172 Липа, К.В. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика [Текст] / К.В. Липа, А.А. Белинский, В.Н. Пустовой, С.Л. Лянгасов, И.К. Лакин, А.А. Аболмасов, и др. – М.: ООО «Локомотивные Технологии», 2015. – 212 с.
- 173 Липа, К.В. Автоматизированная система управления надежностью локомотивов (АСУНТ). Концепция ТМХ-Сервис [Текст] / К.В. Липа, В.И. Гриненко, С.Л. Лянгасов, И.К. Лакин, А.А. Аболмасов, В.А. Мельников. – М.: ООО «ТМХ-Сервис», 2012. – 160 с.
- 174 Липа, К.В. Путь к контракту [Текст] / К.В. Липа Гудок № 111. 03.07.2013.
- 175 Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25КМ. Руководство по эксплуатации. [Электронный ресурс] // – URL: <http://rcit.su/techinfoS9.html#tiS9-01> (дата обращения: 25.01.2021).
- 176 Маликов, И. М. Основы теории и расчета надежности [Текст] / И.М. Маликов, А.М. Половко, Н.А. Романов, П.А. Чукреев. – Л.: Судпромгиз, 1959. – 95 с.
- 177 Масааки, И. Кайдзен: ключ к успеху японских компаний [Текст] / Имаи Масааки, // Пер. с англ. Т. Гутман. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2011. – 274 с.
- 178 Матяш Ю.И. Информационные технологии и системы диагностирования железнодорожных вагонов при производстве и ремонте: Монография. Научное издание [Текст] / Ю.И. Матяш, А.П. Семенов, Т.Б. Брылова, Е.В. Кондратенко. – М.: ВИНТИ РАН, 2020. – 256 с. (ISBN 978-5-902928-86-7).
- 179 Машинное зрение. [Электронный ресурс] // Сайт КамераIQ. – URL: <https://www.cameraiq.ru/catalog/cameras/mashinnoe-zrenie> (дата обращения: 25.01.2021).
- 180 Мельников, В.А. Совершенствование методов диагностирования тепловозов 2ТЭ116У с применением данных бортовых систем управления : 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Мельников Виктор Александрович – М.: РУТ, 2021. – 176 с.
- 181 Митрохин, Ю.В. Разработка интерактивной модели развития технологических процессов железнодорожного транспорта [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Митрохин Юрий Васильевич, – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2010, – 24 с.
- 182 Митрохин, Ю.В. Модель постоянного улучшения на Российском железнодорожном транспорте [Текст] / Ю.В. Митрохин, И.К. Лакин,

- В.Ю. Алферов. – Berlin: Lambert Academic Publishing, 2011. – 79 с.
- 183 Митрохин, Ю.В. Применение принципа постоянного улучшения на железнодорожном транспорте [Текст] / Ю.В. Митрохин, В.Ю. Алферов, Д.В. Катцын, И.К. Лакин. – Красноярск: Изд-во ДЦВ Красноярской ж.д., 2010. – 64 с.
 - 184 Митрохин, Ю.В. Стандарты качества локомотивного хозяйства [Текст] / Ю.В. Митрохин, В.Ю. Алфёров, В.В. Семченко, И.К. Лакин. – Красноярск: Изд-во ДЦВ Красноярской ж. д., 2011. – 60 с.
 - 185 Михальчук, М.Л. Актуальность развития локомотиворемонтного комплекса при переходе на полное сервисное обслуживание [Текст] / М.Л. Михальчук. // Материалы первой международной научно-практической конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов» – М.: ООО «ТМХ-Сервис», 2014. – С. 11-18.
 - 186 Многофакторный дисперсионный анализ [Электронный ресурс] // – URL: <http://vse-temu.org/new-mnogofaktornyj-dispersionnyj-analiz.html> (дата обращения: 25.01.2021).
 - 187 Модель. Википедия. [Электронный ресурс] // – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения: 25.01.2021).
 - 188 Мозгалеvский, А.В. Техническая диагностика [Текст] / А.В. Мозгалеvский, Д.В. Гаскаров – М.: Высшая школа, 1975. – 207 с.
 - 189 Мозгалеvский, А.В. Диагностирование электронных систем [Текст] / Мозгалеvский А.В., Калявин В.П., Костанди Г.Г. – Л.: Судостроение, 1984. – 224 с.
 - 190 НИИТКД. [Электронный ресурс] // Официальный сайт – URL: <http://niitkd.com>. (дата обращения: 25.01.2021).
 - 191 НИИТКД. Каталог продукции [Электронный ресурс] // – URL: <http://niitkd.com/katalog-produktsii> (дата обращения: 25.01.2021).
 - 192 Николаевская железная дорога. [Электронный ресурс] // Статья на сайте Википедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 25.01.2021).
 - 193 НЭВЗ. Официальный сайт. [Электронный ресурс] // – URL: <https://www.nevz.com> (дата обращения: 25.01.2021).
 - 194 ОАО «РЖД» Официальный сайт. [Электронный ресурс] // – URL: <https://www.rzd.ru> (дата обращения: 25.01.2021).

- 195 ОАО «РЖД» совершенствует систему управления локомотивным парком. Саморегулируемая организация Союз Участников Железнодорожного Рынка. Официальный сайт [Электронный ресурс] // – URL: http://www.sujr.ru/news/p97_aview_b745 (дата обращения: 25.01.2021).
- 196 Обзор ERP системы: SAP R/3. [Электронный ресурс] // – URL: <http://iteranet.ru/it-novosti/2013/12/26/obzor-erp-sistemy-sap-r3> (дата обращения: 25.01.2021).
- 197 Ожиганов, А.А. Теория автоматов [Текст] / А.А. Ожиганов – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2013. – 84 с.
- 198 Ожегов, С. И. Толковый словарь русского языка [Текст] / Под ред. проф. Л. И. Скворцова. – 28-е изд. перераб. – М.: Мир и образование, 2014. – 1376 с.
- 199 ОМИКС. Официальный сайт НПО «ОМИКС». – URL: <https://om-x.ru/> (дата обращения: 25.01.2021).
- 200 Омский завод транспортной электроники. [Электронный ресурс] // Официальный сайт. – URL: <http://zavod.su/main.php?id=119> (дата обращения: 25.01.2021).
- 201 Основы теории надёжности. Рабочая программа дисциплины по специальности 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог». – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2019. – 13 с.
- 202 ОЦВ. [Электронный ресурс] // Официальный сайт Отраслевого центра внедрения новой техники и технологий ОАО «РЖД» – URL: <http://www.ocv.ru> (дата обращения: 25.01.2021).
- 203 Осяев, А.Т. Вопросы совершенствования системы ремонта электроподвижного состава при применении средств и методов технического диагностирования: ВНИИЖТ [Текст] / под редакцией А.Т. Осяева. – М.: Транспорт, 1991. – 117 с.
- 204 Осяев, А.Т. Концепция управления жизненным циклом изделий железнодорожного транспорта ОАО «РЖД» [Текст] / А.Т. Осяев, А.Б. Подшивалов, А.Ю. Тимченко. – М.: ВНИИЖТ, 2006. – 100 с.
- 205 Отечественные локомотивы. Сайт NAROD.RU. – URL: <http://scado.narod.ru/rail/index.htm> (дата обращения: 25.01.2021).
- 206 Павел Петрович Мельников – ученый, строитель, министр. Инновационный дайджест. Всё самое интересное о железной дороге. – URL: www.rzd-expo.ru/history/Melnikov (дата обращения: 25.01.2021).

- 207 Панфёров, В.И. Концепция комплексной системы диагностики тягового подвижного состава. Принципы и общие положения [Текст] / В.И. Панфёров, А.А. Хацкелевич, П.И. Борцов, А.Т. Осяев, Д.Л. Киржнер, В.А. Перминов, С.И. Ким, Ю.В. Бобков, М.Д. Федотов, М.Д. Рабинович, Б.Д. Никифоров, А.Л. Донской, В.С. Вербицкий и др.; – М.: ОЦВ, 2001. – 37 с.
- 208 Патент № 2569216 Российская Федерация, МПК⁷ В 61 К 11/00, 2006.01. Способ управления обслуживанием и ремонтом тягового подвижного состава железнодорожного транспорта и система для его осуществления заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «ТМХ-Сервис». № 2013147471/11; заявл. 24.10.2013; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32. – 13 с.: ил. / Липа К.В., Гриненко А.В., Лянгасов С.Л., Лакин И.К., Аболмасов А.А., Мельников В.А.
- 209 Патент 2593729 Российская Федерация, МПК⁷ В 61 L 27/00, 2006.01. Способ контроля режимов эксплуатации локомотивов / заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «ТМХ-Сервис» - № 2015101911/11; заявл. 22.01.15; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 22. – 4 с. : ил. / Липа К.В., Гриненко А.В., Лянгасов С.Л., Лакин И.К., Аболмасов А.А., Мельников В.А., Баркунова А.А.
- 210 Патент на промышленный образец 98083 Российская Федерация. Комплекс микропроцессорных устройств для изменения параметров работы двигателей внутреннего сгорания [Текст];, МКПО 10-04; 10-05 / Семенов А.П., Степанов А.Н.; заявитель и патентообладатель НИИАС; заявка № 2015501888 от 16.05.2015.
- 211 Патент 165204 Российская Федерация. Моечная машина [Текст];, МПК В08В 3/08 / Семенов А.П., Мехедов В.К. Слинкин С.А.; заявитель ОАО «НИИТКД» (RU); приоритет 11.01.2016; опубл. 10.10.2016, бюл. № 28.
- 212 Патент 2711647 Российская Федерация. Устройство и способ оценки технического состояния асинхронных двигателей [Текст];, МПК G01М 7/02 / Семенов А.П., Скляр А.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД» (RU); приоритет 08.04.2019; опубл. 17.01.2020, бюл. № 2.
- 213 Патент 2711476 Российская Федерация. Способ диагностики тормозной сети поезда [Текст];, 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.

- 214 Перспективный план стандартизации в области передовых производственных технологий. Сайт государственного фонда фондов. Институт развития Российской Федерации. 15 с.
- 215 Петров, А.П. Комплексная автоматизированная система управления железнодорожным транспортом (АСУЖТ) [Текст] / Под редакцией А.П. Петрова. – М.: Транспорт, 1977. – 599 с.
- 216 Плакс, А.В. Дефектоскопия механической части электрического подвижного состава: Учебное пособие [Текст] / А.В. Плакс, А.П. Зеленченко. – СПб : СПбГУ ПС, 1998. – 23 с.
- 217 ПНСТ. Умное производство. Унифицированная архитектура ОРС. Часть 1. Общие положения. Проект – М.: ВНИИС, 2019, 27 с.
- 218 Поколения компьютеров – история развития вычислительной техники. [Электронный ресурс] // Сайт «Планета информатики». – URL: <https://inf1.info/computergeneration> (дата обращения: 25.01.2021).
- 219 Покровский, С.В. Система управления и диагностики электровоза ЭП10 / С.В. Покровский и др. – М.: Интекст, 2009. – 352 с.
- 220 Половко, А. М. Основы теории надежности — М.: Наука, 1964. – 446 с.
- 221 Положение об учете, расследовании и анализе отказов в работе технических средств на инфраструктуре ОАО "РЖД" с использованием автоматизированной системы КАС АНТ (Распоряжение от 01 ноября 2018 г. N 2160/р).
- 222 Порядок оценки качества эксплуатации и ремонта локомотивов, предполагающий взаимный контроль и повышение прозрачности отнесения виновности за допущенные отказы. Распоряжение № ЦТ-47/р от 01.03.2016 – М.: ОАО «РЖД», 2016.
- 223 Пособие машинисту по эксплуатации систем автоведения и РПДА пассажирских электровозов – М.: АВП Технология, – 2012. 119 с.
- 224 Поставка локомотивов General Electric на Украину. [Электронный ресурс] // Сайт «Остров». – URL: <https://www.ostro.org/general/society/news/551675/> (дата обращения: 25.01.2021).
- 225 Правила технического обслуживания и текущего ремонта электровозов переменного тока – М.: Центр внедрения новой техники и технологий «Транспорт» МПС РФ. 1996. 404 с.

- 226 Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации (редакция от 25.12.2018). [Электронный ресурс] // – URL: <https://www.tdesant.ru/info/item/57> (дата обращения: 25.01.2021).
- 227 Презентация на тему Диагностика микропроцессорных систем управления (МСУ) на базе СЛД Волгоград / [Электронный ресурс] // Сайт The Presentation // – URL: <https://thepresentation.ru/uncategorized/diagnostika-mikroprotsessornyh-sistem-upravleniya-msu-na> (дата обращения: 25.01.2021).
- 228 Промышленная революция. [Электронный ресурс] // Сайт «Энциклопедия Кругосвет» – URL: http://www.krugosvet.ru/enc/gumanitarnye_nauki/ekonomika_i_pravo/PROMISHLENNAYA_REVOLYUTSIYA.html (дата обращения: 25.01.2021).
- 229 Преобразователь выпрямительно-инверторный ВИП-4000М-УХЛ2. Технические условия ТУ16-91 ИЖРФ 435 511.021 ТУ. – Саранск: «Электровыпрямитель», 2001 – 82 с.
- 230 Пузанков, А.Д. Методы расчёта и использования показателей надёжности в эксплуатации [Текст] / А.Д. Пузанков. – М.: МИИТ, 2004. – 112 с.
- 231 Пузанков, А.Д. Статистические методы обработки выборочных данных наблюдений или экспериментов. Методические указания [Текст] / А.Д. Пузанков. – М.: МИИТ, 2000. – 52 с.
- 232 Пузанков, А.Д. Управление качеством локомотивного хозяйства [Текст] / А.Д. Пузанков. – М.: МИИТ, 2009. – 262 с.
- 233 Пудовиков, О.Е. Автоматическое управление скоростью грузового поезда с электровозом, допускающим плавное управление силами тяги и торможения [Текст] : дис. ... докт. техн. наук: 05.22.07 / Пудовиков Олег Евгеньевич – М.: РУТ, 2011, 291 с.
- 234 Пудовиков, О.Е. Вероятностный процесс познания [Текст] / О.Е. Пудовиков – М.: МИИТ, Мир Транспорта, 2012, № 5 с. 166 – 170.
- 235 Пустовой, И.В. Разработка информационно-динамической модели управления сервисным техническим обслуживанием и ремонтом локомотивов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Пустовой Илья Владимирович. – Омск: ОмГУПС, 2018, – 183 с.
- 236 Раков, В.А. Локомотивы отечественных железных дорог (1956 – 1975 гг.). – М.: Транспорт, 1999. – 443 с.
- 237 Реестр средств измерений, испытательного оборудования и методик

- измерений, применяемых в ОАО «РЖД» [Электронный ресурс] // – URL: http://www.rzd-expo.ru/innovation/the_system_of_technical_regulation/metrology/registry_0618.pdf (дата обращения: 25.01.2021).
- 238 Рельсы из прошлого. Сайт «Газета.ru». [Электронный ресурс] // – URL: <https://www.gazeta.ru/business/2014/11/10/6296941.shtml?updated> (дата обращения: 25.01.2021).
- 239 Розенберг, Е.Н. Многоуровневая система управления и обеспечения безопасности движения поездов [Текст] : дис. ... докт. техн. наук: 05.13.06, 05.22.08 / Розенберг Ефим Наумович, – М., МИИТ, 2008, 317 с.
- 240 Розенфельд, В.Е. Теория электрической тяги. [Текст] / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров – М.: Транспорт, 1983 – 328 с.
- 241 Росстандарт. Официальный сайт федерального агентства по техническому регулированию и метрологии [Электронный ресурс] // – URL: <https://www.gost.ru/> (дата обращения: 25.01.2021).
- 242 Савоськин, А.Н. Автоматизация электродвижущего состава [Текст] / А.Н. Савоськин, Л.А. Баранов, А.В. Плакс; под ред. А.Н. Савоськина – М.: Транспорт, 1990, 311с.
- 243 САУТ. Сайт Научно-производственного объединения (НПО) САУТ [Электронный ресурс] // – URL: <http://www.saut.ru> (дата обращения: 25.01.2021).
- 244 Свид. 2018613898 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Система управления диагностикой «Vibroinf»/ Семенов А.П., Елисеев С.В., Балкашин В.В., Степанов А.Н.; заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД») (RU). - №2013614104; заявл. 16.05. 2013.
- 245 Свид. 2013616274 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Комплексная система управления технологией восстановления электрических машин «Сухолей». / Семенов А.П., Елисеев С.В., Степанов А.Н., Столяров Д.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД») (RU). - № 2013614103; заявл. 16.05. 2013.
- 246 Свид. 2013614067 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Комплексная система управления процессом восстановления аккумуляторных батарей «Комплекс ЭДС». / Семенов А.П., Елисеев С.В., Степанов А.Н., Столяров Д.В.; заявитель и

- патентообладатель ОАО «НИИТКД» (RU). - № 2013614067; заявл. 16.05. 2013.
- 247 Свид. 2013614067 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Комплексная система управления процессом восстановления аккумуляторных батарей «Комплекс ЭДС». / Семенов А.П., Елисеев С.В., Степанов А.Н., Столяров Д.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД» (RU). - № 2013614067; заявл. 16.05. 2013.
- 248 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 ОАО «НИИТКД» (RU). - № 2016611445; заявл. 24.02. 2016.
- 249 Свид. 2016613989 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Система управления стендом для ремонта и испытаний главной части воздухораспределителей (СИГВР). / Семенов А.П., Скляр А.В., Кузнецов А.Н.; заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД» (RU). - № 2016611395; заявл. 24.02. 2016.
- 250 Свид. 2016613990 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Система управления стендом для ремонта и испытаний авторежимов (СИАРЕЖ). / Семенов А.П., Скляр А.В., Кузнецов А.Н.; заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД» (RU). - № 2016611393; заявл. 24.02. 2016.
- 251 Свид. 2016613988 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Система управления стендом гидравлических и пневматических испытаний соединительных рукавов (СИПСР). / Семенов А.П., Скляр А.В., Кузнецов А.Н.; заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД» (RU). - № 2016611397; заявл. 24.02. 2016.
- 252 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 ОАО «НИИТКД» (RU). - № 2016611392; заявл. 24.02. 2016.
- 253 Свид. 2017661832 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа анализа данных оборудования локомотивов. / Семенов А.П., Кузнецов С.М., Петров А.М., Демин О.М.,

- Деглан В.А.; заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД» (RU). - № 2017615881; заявл. 24.02. 2016.
- 254 Свид. 2017662100 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа мониторинга оборудования локомотивов. / Семенов А.П., Кузнецов С.М., Петров А.М., Демин О.М., Деглан В.А.; заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД» (RU). - № 2017615931; заявл. 24.02. 2016.
- 255 Свид. 2017662903 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Управление системой контроля и диагностирования параметров подвижного состава «Доктор». / Семенов А.П., Склад А.В., Степанов А.Н.; заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД» (RU). - № 2017660078; заявл. 06.10. 2016.
- 256 Свид. 2018612280 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Обучающе-контролирующая программа «PoTeGra». / Семенов А.П., Деглан В.А., Слинкин С.А., Мехедов В.К.; заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД» (RU). - № 2017663566; заявл. 25.12. 2017.
- 257 Свид. 2018612355 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа взаимодействия базы данных с программой «PoTeGra». / Семенов А.П., Деглан В.А.; заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД» (RU). - № 2017663502; заявл. 25.12. 2017.
- 258 Свид. 2018620282 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации базы данных. 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 ОАО «НИИТКД» (RU). - № 2017621557; заявл. 25.12. 2017.
- 259 Свид. 2020661153 Российская федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Вероятностно-статистическое моделирование работы ремонтного локомотивного депо с целью прогнозирования времени выполнения технического обслуживания и ремонта (ТОиР). / А.П.Семенов, И.К.Лакин. Заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД» (RU). заявл. 09.09. 2020.
- 260 Свид. 2020661903 Российская федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Статистический анализ эффективности

- эксплуатации локомотивов. / А.П.Семенов, И.К.Лакин. Заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД» (RU). заявл. 16.09. 2020.
- 261 Свид. 2021618782 Российская федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Расчёт чистой приведенной стоимости проекта (NPV) для оценки эффективности внедрения автоматизированных систем технического диагностирования (АСТД) локомотивов. А.П. Семенов, И.К. Лакин. Заявитель и патентообладатель ОАО «НИИТКД» (RU). заявл. 16.02. 2021.
- 262 Семенов, А.П. Применение информационных технологий при совершенствовании системы ремонта железнодорожной техники [Текст] / А.П. Семенов, А.Н. Головаш, Д.Э. Тиссен, М.В. Лифанов// Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сборник научных статей III Международной научно-практической конференции / Минобрнауки России; Юго-Зап. Гос. Ун-т.– Курск, 2012. – С. 181-185.
- 263 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.
- 264 Семенов, А.П. Обеспечение эксплуатационной надежности поездов метрополитена на основе системы сбора, обработки и анализа диагностической информации [Текст]/ А.П. Семенов // Вестник ЮурГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. № 2 (2014). – С. 98-104.
- 265 Семенов, А.П. Исследование эффективности эксплуатации локомотивов [Текст] / А.П. Семенов, И.К. Лакин // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2019 (2018). – №. 4(36). – С. 41-53.
- 266 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. (Санкт-Петербург, 1-5 июля 2015 г.) / ПГУПС; НВЦ «Вагоны [и др.]. – СПб , 2015. – С. 65-68.
- 267 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 3-й всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Часть 1. – Омск: ОмГУПС, 2015. – С. 107-115.
- 268 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.
- 269 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.
- 270 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.
- 271 Семенов, А.П. Как повысить эффективность использования локомотивов [Текст]/ А.П. Семенов // Локомотив. – 2018. – №. 10. – С. 40-41.
- 272 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.
- 273 Семенов, А.П. Источники повышения эффективности использования бюджета времени локомотивов [Текст]/ А.П. Семенов // Локомотив. – 2018. – №. 10. – С. 33-34.
- 274 Семенов, А.П. О подходе к комплексному диагностированию локомотивов [Текст]/ А.П. Семенов // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: материалы третьей международной научно-практической конференции / . – М.: ООО «ЛокоТех», МИИТ 2018. – С. 333-335.
- 275 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: ПГУПС, 2018. –Т. 1. – С. 159-164.
- 276 Семенов, А.П. Модель вибрационного диагностирования тягового подвижного состава [Текст]/ А.П. Семенов // Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 5. – С. 45-49.
- 277 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.
- 278 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.
- 279 Семенов, А.П. Направления повышения эффективности эксплуатации локомотивов [Текст] / А.П. Семенов, И.К. Лакин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – 2019. – № 3 (63). – С. 89-98.
- 280 Семенов, А.П. Использование технологии «цифровой двойник» при управлении ремонтом локомотивов [Текст]/ А.П. Семенов, И.К. Лакин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 89-98. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63).89-98.
- 281 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.
- 282 Семенов, А.П. Цифровая трансформация управления ремонтом локомотивов [Текст]/ А.П. Семенов, И.К. Лакин // Транспортная инфра-структура Сибирского региона: Материалы Десятой Междунар. науч.-практ. конф., 21-24 мая 2019 г. Иркутск: в 2 т. – ИрГУПС, 2019. – Т. 2. – С. 182-185.
- 283 Семенов, А.П. Технология «цифровой двойник» при техническом обслуживании локомотивов [Текст]/ А. П. Семенов // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2019. – № 3. – Хабаровск: ДВГУПС. – С. 38-40.

- 284 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.
- 285 Семенов, А.П. Цифровизация ремонтного производства тягового подвижного состава / А.П. Семенов, Д.В. Казарин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. Научный журнал. – 2020. – № 1 (45). – С. 93-103.
- 286 Семенов, А.П. Мониторинг технического состояния электровозов переменного тока по расходу электроэнергии на тягу поездов [Текст] / Семенов А.П., Семченко В.В., Хромов И.Ю. // Мир транспорта. – М: РУТ – 2020. – № 5. – С. 62-89.
- 287 Семенов, А.П. Информационная энтропия систем технического диагностирования локомотивов / А.П. Семенов, И.К. Лакин, И.Ю. Хромов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, – 2020. – № 3(67). – С. 42–53. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).42-53.
- 288 Семенов, А.П. Перспективы развития цифровых технологий в сервисных ремонтных локомотивных депо / А.П.Семенов, В.В.Семченко, И.К.Лакин – Локомотив – М.: 2020, № 11, С. 2-5.
- 289 Семенов, А. П. Обоснование необходимости систем диагностирования локомотивов [Текст] / А. П. Семенов, Лакин И. К. // Мир Транспорта. – 2021. – № 1.
- 290 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.
- 291 Семенов, А.П. Статистические методы повышения эффективности эксплуатации локомотивов [Текст]/ А.П. Семенов // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава: труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (24–25 марта 2020 года, г. Красноярск). Красноярск: Изд-во АО «ДЦВ Красноярской ж.д.», 2020. – С. 299-306.
- 292 Семенов, А.П. Разработка и реализация модели технического обслуживания и ремонта локомотивов с комплексным использованием автоматизированных

- систем технического диагностирования [Текст] // А.П. Семенов – Локомотивы. Электрический транспорт – XXI век: материалы VII Международной научно-технической конференции – СПб: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. – С. 58-64.
- 293 Семенов, А.П. Перспективы перехода на предиктивный ремонт локомотивов / А.П. Семенов, И.К. Лакин, – Локомотивы. Электрический транспорт – XXI век: материалы VII Международной научно-технической конференции – СПб: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. – С. 64-69.
- 294 Семенов, А.П. Разработка модели управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования [Текст] / А.П. Семенов // Известия Транссиб – Омск: ОмГУПС, 2020, № 3, С. 58-65.
- 295 Семенов, А.П. Расчёт вероятности категорий отказов по надёжности оборудования локомотивов [Текст] / А.П. Семенов, И.К. Лакин // Известия Транссиб – Омск: ОмГУПС, 2020, № 4, С. 2-8.
- 296 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 Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (24–25 марта 2020 года, г. Красноярск). Красноярск: Изд-во АО «ДЦВ Красноярской ж.д.», 2020. – С. 71-81.
- 297 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 Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (24–25 марта 2020 года, г. Красноярск). Красноярск: Изд-во АО «ДЦВ Красноярской ж.д.», 2020. – С. 310-317.
- 298 Семенов, А.П. Организация управления жизненным циклом отечественных локомотивов / А.П. Семенов // Вестник УрГУПС. – 2021, № 1. – С. 62-71.
- 299 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. РИНЦ.
- 300 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.
- 301 Семченко, В.В. Диагностирование систем управления электровозов переменного тока с тиристорными преобразователями: обслуживания [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Семченко Виктор Васильевич – Хабаровск: ДВГУПС, 2010, – 199 с.
- 302 Семченко, В.В. Опыт ДЦВ Красноярской ж.д. сервисного технического обслуживания и ремонта электронного оборудования электровозов. [Текст] / В.В. Семченко // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава. Труды конференции. – Красноярск: 2020, С. 42-58.
- 303 Сидоров, А. В. Управление отказами оборудования: в 2 ч. Ч. I : Расследование и учет / А.В. Сидоров, В.А. Сидоров. – СПб: ООО «ТОИР ПРО», 2019. – 128 с.
- 304 Система испытания дизелей и дизель-генераторов «Алмаз». [Электронный ресурс] // Сайт компании ЗАО «Локомотив» – URL: <https://m.opt-union.ru/> (дата обращения: 25.01.2021).
- 305 Система микропроцессорная управления, регулирования и диагностики МСУ-ТП тепловоза 2ТЭ116У. Выписка из Руководства по эксплуатации Для локомотивных бригад/ [Электронный ресурс] // - Коломна: ВНИКТИ, 2017, 38 с. – URL: http://static.scbist.com/scb/uploaded/0_1434094774.pdf (дата обращения: 25.01.2021).
- 306 Система поддержки принятия решений. [Электронный ресурс] // Сайт TADVISER – URL: <https://www.tadviser.ru/index.php/Статья: СППР> (дата обращения: 25.01.2021).
- 307 Системы поддержки принятия решений. [Электронный ресурс] // – URL: <http://bourabai.ru/tpoi/dss.htm> (дата обращения: 25.01.2021).
- 308 Смирнов, В.А. Повышение эффективности технологических систем ремонтного производства и технического обслуживания подвижного состава : обслуживания [Текст] : дис. ... докт. техн. наук: 05.02.22 / Смирнов Виктор Александрович – М.: РУТ, 2021, 344 с.
- 309 Смирнов, В.А. Роботизация технологических процессов ремонта: проблемы и варианты решения / В.А. Смирнов, К.В. Панов // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: труды третьей международной

- научно-практической конференции. – М., 2018. – С. 279–283.
- 310 Станция реостатных испытаний «CUBO» [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании VOLO – URL: <https://volopro> (дата обращения: 25.01.2021).
 - 311 Стекольников, Д.В. Микропроцессорные системы управления электровозов производства ЛЭС. / Д.В. Стекольников // Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава: труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (24 – 25 марта 2020 года, г. Красноярск) ДЦВ Красноярской ж.д., КриЖТ ИрГУПС. – Красноярск: Издательство АО «ДЦВ Красноярской ж.д.», 2020. – С. 82 – 88.
 - 312 СТК 1.05.515.1. Методы и инструменты улучшений. Методы решения проблем. 8 шагов. Введ. 2009-07-01. – М.: ОАО «РЖД», 2009. – 23 с.
 - 313 СТК 1.05.515.2. Методы и инструменты улучшений. Анализ Парето. Введ. 2009-07-01– М.: ОАО «РЖД», 2009. – 21 с.
 - 314 СТК 1.05.515.3. Методы и инструменты улучшений. Диаграмма Исикавы. Введ. 2009-07-01– М.: ОАО «РЖД», 2009. – 18 с.
 - 315 СТК 1.05.515.5. Методы и инструменты улучшений. Исследование разброса параметра. Гистограммы. Введ. 2009-07-01 – М.: ОАО «РЖД», 2009. – 29 с.
 - 316 СТК 1.05.515.6. Методы и инструменты улучшений. Z-график и исследование вариабельности. Введ. 2009-07-01 – М.: ОАО «РЖД», 2009. – 22 с.
 - 317 СТК 1.05.515.7. Методы и инструменты улучшений. Формат корректирующих действий. Метод «5W+1H+1S». Введ. 2009-07-01 – М.: ОАО «РЖД», 2009. – 15 с.
 - 318 СТК 1.10.001. Нормативные документы корпоративной системы менеджмента качества ОАО «РЖД». Введ. 2008-01-11 – М.: ОАО «РЖД», 2008. – 19 с.
 - 319 СТК 1.10.002. Нормативные документы корпоративной системы менеджмента качества ОАО «РЖД». Порядок разработки, согласования и утверждения. Введ. 2008-11-01 – М.: ОАО «РЖД», 2008. – 50 с.
 - 320 СТК 1.10.003. Руководство по качеству ОАО «РЖД». Порядок изложения, оформления, разработки, утверждения и внесения изменений. Введ. 2008-11-01 – М.: ОАО «РЖД», 2008. – 50 с.
 - 321 СТК 1.10.004. Корректирующие и предупреждающие мероприятия. Введ.

- 2009-01-01 – М.: ОАО «РЖД», 2009. – 19 с.
- 322 СТК 1.10.005. Решение проблем качества при техническом обслуживании и ремонте подвижного состава и объектов инфраструктуры. Введ. 2009-01-01 – М.: ОАО «РЖД», 2009. – 32 с.
- 323 СТК 1.10.010. Корпоративная интегрированная система менеджмента качества ОАО «РЖД». Термины и определения. Введ. 2009-10-01 – М.: ОАО «РЖД», 2009. – 71 с.
- 324 СТК 1.10.011. Корпоративная интегрированная система менеджмента качества ОАО «РЖД» Основные принципы и положения. Введ. 2009-10-01 – М.: ОАО «РЖД», 2009. – 50 с.
- 325 СТК 1.10.012. Корпоративная интегрированная система менеджмента качества ОАО «РЖД». Модель основных процессов. Введ. 2009-10-01 – М.: ОАО «РЖД», 2009. – 50 с.
- 326 СТК 1.10.013. Руководство по применению модели основных процессов. Введ. 2009-10-01 – М.: ОАО «РЖД», 2009. – 71 с.
- 327 СТК 1.10.014. Планирование и оценка результатов улучшений показателей. Введ. 2009-10-01 – М.: ОАО «РЖД», 2009. – 71 с.
- 328 СТО 02.038-2011. Риск-менеджмент в организации обеспечения безопасности движения. Введ. 2011-09-21 – М.: ОАО «РЖД», 2011. – 17 с.
- 329 СТО 02.039-2011. Человеческие факторы в системе управления безопасностью движения. Введ. 2011-09-21 – М.: ОАО «РЖД», 2011. – 19 с.
- 330 СТО 02.040-2011. Показатели процессов, влияющих на безопасность движения. Введ. 2011-09-21 – М.: ОАО «РЖД», 2011. – 19 с.
- 331 СТО 1.02.033-2010. Управление ресурсами на этапах жизненного цикла, рисками и анализом надежности (УРРАН). Порядок идентификации опасностей и рисков. Введ. 2011-03-01 – М.: ОАО «РЖД», 2011. – 19 с.
- 332 Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и перспективу до 2025 года. Белая книга. – М.: ОАО «РЖД», 2015, – 63 с.
- 333 Стратегия развития холдинга ОАО «РЖД» на период до 2030 года и основные приоритеты его развития на среднесрочный период до 2015 года / Утверждена президентом ОАО «РЖД» В.И. Якуниным в 2010 г. – М.: ОАО «РЖД», 2011. – 93 с.

- 334 Стрельников, В.Т. Комплексное управление качеством технического обслуживания и ремонта электровозов [Текст] / В.Т. Стрельников, И.П. Исаев – М.: Транспорт, 1980. – 207 с.
- 335 Сугак, Е.В. Надёжность технических систем [Текст] / Сугак Е.В., Василенко Н.В., Назаров Г.Г., Паньшин А.В., Каркарин А.П. – Красноярск: НИИ СУВПТ, 2000, – 608 с.
- 336 Счётная машина Леонардо да Винчи. [Электронный ресурс] // – URL: http://all-ht.ru/inf/history/p_1_0.html (дата обращения: 25.01.2021).
- 337 Тартаковский, Э. Д. Основы автоматизации технического обслуживания, диагностирования и ремонта локомотивов [Текст] / Э. Д. Тартаковский. – Харьков: Изд-во ХИИТ, 1987. – 72 с.
- 338 Тартаковский, Э.Д. Совершенствование технологии технического обслуживания тепловозов [Текст] / Э.Д. Тартаковский, Н.Н. Бабанский, А.Б. Бабанин // – Электрическая и тепловозная тяга. – 1982. – №1. – С. 24-26.
- 339 Тартаковский, Э.Д. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог: Монография / Э.Д. Тартаковский, С.Г. Грищенко, Ю.Е. Калабухин, А.П. Фалендыш. – Луганск: Изд-во «Ноулидж», 2011. – 174 с.
- 340 Теорема Шеннона – Хартли. [Электронный ресурс] // – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Теорема_Шеннона_-_Хартли](https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Шеннона_-_Хартли) (дата обращения: 25.01.2021).
- 341 Тепловозы и подвижной состав. [Электронный ресурс] // – URL: <https://www.dieselloc.ru> (дата обращения: 25.01.2021).
- 342 Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава сторонними компаниями [Текст] / – Железные дороги мира. – 2005. – № 10. – С. 47 – 51.
- 343 Тимченко, А.Ю. Единая автоматизированная система учёта дизельного топлива в ОАО «РЖД» [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / Тимченко Александр Юрьевич. – Коломна, 2012. – 24 с.
- 344 Тихменев, Б.Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. / Б.Н. Тихменев, Л.М. Трахтман – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
- 345 ТрансИнфоПроект. Информация о компании. [Электронный ресурс] // – URL: <https://moscow.catalogxy.ru/firms/trans-ip.ru.htm> (дата обращения: 25.01.2021).
- 346 Трансмашхолдинг (TMX). Официальный сайт. – URL: <http://www.tmholding.ru>

(дата обращения: 25.01.2021).

- 347 Трансмашхолдинг заключил с ОАО «РЖД» контракты на поставку локомотивов с сервисным обслуживанием. [Электронный ресурс] // Сайт ТМХ. – URL: https://tmholding.ru/press_office/events/8866.html (дата обращения: 25.01.2021).
- 348 Узлы и агрегаты локомотивов с указанием существующих данных телеметрии и необходимых для оценки технического состояния и вероятности отказа. Аналитический анализ – Казань: Кlover. 2020.
- 349 Федотов, М.В. Оперативное определение показателя энергоэффективности магистральных тепловозов в эксплуатации по данным МСУ / М.В. Федотов, В.А. Перминов, В.В. Грачёв // Труды второй международной научно-практической конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов». – М.: ООО «Локомотивные технологии», 2015. – С. 236-242.
- 350 Фирменное обслуживание подвижного состава / – Железные дороги мира. – 2005. – № 5. – С. 40-46.
- 351 Форсайт (Foresight): Учебник. Развёрнутый конспект. – Mjcrdf: Общество знаний (European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions), 2003. – 31 с.
- 352 Функциональная стратегия ОАО «РЖД» управления качеством. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 15 января 2007г. № 46р. – М.: ОАО «РЖД», 2007.
- 353 Фурфанский, Н.А. Развитие локомотивной тяги / Н.А. Фурфанский, А.Н. Долганов, А.С. Нестрахов, Н.Н. Каменев, Э.А. Пахомов – М.: Транспорт, 1982. – 304 с.
- 354 Хитоси Кумэ. Статистические методы повышения качества [Текст] / Хитоси Кумэ, Йосинори Иизука, Такенори Такахаси и др. // Пер. с англ. Ю. П. Адлера – М.: Финансы и статистика, 1990. – 301 с.
- 355 Хоровиц, П. Искусство схемотехники [Текст] / Хоровиц П., Хилл У. . В 3 т: Т. 2. Пер. с англ. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Мир, 1993. – 371 с.
- 356 Хромов, И.Ю. Анализ влияния режимов эксплуатации на техническое состояние локомотивов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Хромов Игорь Юрьевич – М.: РУТ, 2021 г. – 181 с.
- 357 Цифровая трансформация. [Электронный ресурс] // Сайт Wonderware. – URL: <https://www.wonderware.ru> (дата обращения: 25.01.2021).

- 358 Цифровизация сервиса вагонов: революционные проекты TMX. [Электронный ресурс] // Сайт «Управление производством». – URL: http://www.up-pro.ru/library/information_systems/toir/tsifrovizatsiya-servisa-vagonov.html (дата обращения: 25.01.2021).
- 359 Цифровой завод. MES система завода. – М.: 2050.Интегратор. Труды конференции в Сколково по цифровым двойникам. 2019.
- 360 Цифры. [Электронный ресурс] // – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения: 25.01.2021).
- 361 Чекрыжев, Н.В. Основы технического обслуживания воздушных судов: учеб. пособие [Текст] / Н.В. Чекрыжев. – Самара: Изд-во СГАУ, 2015. – 84 с.
- 362 Черемисин, В.Т. Повышение энергетической эффективности предприятий по сервисному обслуживанию локомотивов на базе концепции «Умное предприятие» / В.Т. Черемисин, В.И. Иванченко, А.А. Комяков и др. // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: материалы третьей международной научно-практической конференции, М.: ООО «ЛокоТех», 2018. – С. 372-376.
- 363 Четвергов, В.А. Надёжность локомотивов / В.А. Четвергов, А.Д. Пузанков. – М.: Маршрут, 2003. – 415 с.
- 364 Четвёртая промышленная революция. [Электронный ресурс] // Статья на сайте TADVISER – URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 25.01.2021).
- 365 Шабалин, Н.Г. Организация эксплуатации и технического обслуживания тягового подвижного состава с использованием современных информационных технологий [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / : Шабалин Николай Григорьевич. – М., МИИТ, 1999. – 171 с.
- 366 Шабалин, Н.Г. Автоматизированная система управления качеством технологических процессов на железнодорожном транспорте (АСУ КТП): Техническое предложение [Текст] / Н.Г. Шабалин. – М.: Железнодорожные технологии, 2004 – 348 с.
- 367 Шабалин, Н.Г. Электронное оборудование электровоза ВЛ80Р: ремонт и техническое обслуживание [Текст] / Н.Г. Шабалин, В.Н. Горбань, А.Л. Донской. – М.: Транспорт, 1984. – 183 с.
- 368 Шабалин, Н.Г. Интервальное управление движением поездов [Текст] / Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного

- оборудования тягового подвижного состава. Труды конференции. – Красноярск: 2020, – С. 59-65.
- 369 Шантаренко, С.Г. Совершенствование технологической готовности технического обслуживания и ремонта тягового подвижного состава [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Шантаренко Сергей Георгиевич. – Омск: ОмГУПС, 2006. – 419 с.
- 370 Шкала Чеддока. [Электронный ресурс] // – URL: <https://math.semestr.ru/corel/cheddok.php> (дата обращения: 25.01.2021).
- 371 Удаленный мониторинг и прогнозирование технического состояния узлов и агрегатов. [Электронный ресурс] // Официальный сайт Научно-аналитического центра предиктивного технического обслуживания – URL: <https://predictive-maintenance.tech> (дата обращения: 25.01.2021).
- 372 Уэйкерли, Джон Ф. Проектирование цифровых устройств [Текст] / Уэйкерли, Джон Ф. // пер.с англ. – М.: Постмаркет 2002 –1088 с.
- 373 Уокенбах, Джон. Excel 2010: профессиональное программирование на VBA. Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д.Вильямс». 2014. – 944 с.
- 374 Электровоз ВЛ80Р. Руководство по эксплуатации – М.: Транспорт, 1982. – 541 с.
- 375 Электровоз ВЛ85. Руководство по эксплуатации. – М.: Транспорт, 1986. –572 с.
- 376 Электровоз магистральный 2ЭС4К. Руководство по эксплуатации. ИДМБ.661141.004 РЭ – Новочеркасск: ВЭЛНИИ, 2008.
- 377 Электровоз магистральный 2(3)ЭС5К, Э5К. Руководство по техническому обслуживанию, текущему и деповскому ремонту. ПКБ ЦТ.06.0046. [Электронный ресурс] // – М.: ПКБ ЦТ, 2000, – URL: <http://rcit.su/techinfoR8.html> (дата обращения: 25.01.2021).
- 378 Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. ИДМБ.661142.009РЭ (ЗТС.001.012РЭ) – Новочеркасск: ВЭЛНИИ, 2007.
- 379 Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. – Книга 1. Электрические схемы. – Новочеркасск, 2004. – 248 с.
- 380 Энтропия и количество информации. [Электронный ресурс] // – URL: <http://victor-safronov.ru/systems-analysis/lectures/zhivickaya/12.html> (дата обращения: 25.01.2021).
- 381 Bombardier. [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании – URL:

- <https://www.bombardier.com> (дата обращения: 25.01.2021).
- 382 DB. [Электронный ресурс] // Официальный сайт Немецких железных дорог – URL: <https://www.bahn.com> (дата обращения: 25.01.2021).
- 383 FLUKE Каталог измерительных и диагностических приборов. [Электронный ресурс] // – URL: <https://flukeshop.ru> (дата обращения: 25.01.2021).
- 384 General Electric. [Электронный ресурс] // Официальный сайт – URL: <https://www.ge.com> (дата обращения: 25.01.2021).
- 385 GEVO12. Комплект дизельного двигателя GEVO12 EFI, электрического и электронного оборудования производства General Electric для установки на тепловоз 2ТЭ116УД. Руководство по эксплуатации. GEJ-7142A [Электронный ресурс] // – Erie (USA): General Electric. 2013. 313 с.
- 386 Hedlund, Eric. Apparatus and Method for Performance and Fault Analysis. Патент США WO 01/31450 [Text] / HEDLUND Eric, RODDY Nicholas, GIBSON David, BLILEY Richard // – США: General Electric Company, 2001 – 58 с.
- 387 Heinrich, H. W. Industrial Accident Prevention: A Scientific Approach. / H. W. Heinrich – Madyson: McGraw-Hill, 1941, 448 p.
- 388 Innotrans. [Электронный ресурс] // Официальный сайт международной железнодорожной выставки Innotrans. – URL: <https://www.innotrans.com/> (дата обращения: 25.01.2021).
- 389 ISO 20000. Международный стандарт сервисного обслуживания. [Электронный ресурс] // – URL: iso.org/iso (дата обращения: 25.01.2021).
- 390 ITIL & ITSM. [Электронный ресурс] // Интернет материалы IT-Expert по ITIL и ITSM. – URL: <http://www.itexpert.ru> (дата обращения: 25.01.2021).
- 391 Locotrol URL: Locotrol Wikipedia (дата обращения: 25.01.2021).
- 392 NPV. Формула расчета NPV инвестиционного проекта. [Электронный ресурс] // Сайт МСФО, Дипифр. – URL: <http://msfo-dipifr.ru/formula-rascheta-npv-investitsionnogo-proekta-eto-prosto/> (дата обращения: 25.01.2021).
- 393 Progressive Railroading. Rail Insider-Rail technology: on-board locomotive monitoring. Information For Rail Career Professionals From Progressive Railroading Magazine. [Электронный ресурс] // – URL: <https://www.progressiverailroading.com> (дата обращения: 25.01.2021).
- 394 Siemens. Официальный сайт компании <https://new.siemens.com> (дата обращения: 25.01.2021).

- 395 Smart Factory - A Step towards the Next Generation of Manufacturing/ Dominik Lucke¹ , Carmen Constantinescu^{1, 2}, Engelbert Westkämper^{1, 2} ¹ Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, IFF - Universität Stuttgart, Germany ² Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, IPA - Stuttgart, Germany Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier . The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2008, pp 115-118. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84800-267-8_23 (дата обращения: 25.01.2021).
- 396 Space Shuttle. История разработки многоразовой транспортно-космической системы. [Электронный ресурс] // Сайт Space Shuttle – URL: [www/buran.ru/htm/shuttle.htm](http://www.buran.ru/htm/shuttle.htm) (дата обращения: 25.01.2021).
- 397 Steuger, Martin. Velaro – customer oriented further development of a high-speed train. Martin Steuger. [Электронный ресурс] // – URL: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:76bd8e38-7ea4-43adb7d4-4d7ca9be50a9/fachartikel_zev-ail_siemens_velaro_en.pdf (дата обращения: 25.01.2021).
- 398 The European Rail Traffic Management System (ERTMS). [Электронный ресурс] // Сайт UNIFE (The European Industry) 2015 – URL: <https://www.ertms.net/> (дата обращения: 25.01.2021).
- 399 Toyota Production System. Производственная система Тойота. [Электронный ресурс] // Сайт Forstor – официального дилера Toyota Material Handling. – URL: <https://toyota-bt.com/materials/toyota-production-system> (дата обращения: 25.01.2021).
- 400 Womak, J.P. The machine that changed the world. The story of lean production / J.P. Womak, D. T. Jones, D. Roos – New York: Harper Perennial.Ed., 1991 – 323 p.
- 401 Wyman, Oliver. Train Maintenance. The RailWay Technical Website. <http://www.railway-technical.com/trains/train-maintenance/> (дата обращения: 25.01.2021).



119048, Россия, Москва, ул. Ефремова, д. 10

Тел.: +7 495 660 89 50

Email: info@tmholding.ruwww.tmholding.ru*Одобрено ДДЗЛ, № 3409-ДКД*

На № _____ от _____

СПРАВКА
О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ
СЕМЕНОВА АЛЕКСАНДРА ПАВЛОВИЧА

Настоящей справкой АО «Трансмашхолдинг» подтверждает практическое использование результатов научных исследований кандидата технических наук А. П. Семенова, изложенных им в его диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» на тему: «Разработка модели управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования».

АО «Трансмашхолдинг» является крупнейшим производителем электровозов и тепловозов для ОАО «РЖД». При этом реализуется принципиально новая технология управления жизненным циклом локомотивов согласно контракту жизненного цикла (КЖЦ) с обязательством обеспечения их сервисного обслуживания в период эксплуатации их жизненного цикла. Несмотря на широкое применение КЖЦ на зарубежных железных дорогах и в промышленности в целом, переход технического обслуживания и ремонта (ТОиР) локомотивов на КЖЦ столкнулся с рядом проблем, которые были скрыты ранее, когда эксплуатация и ТОиР находились в единой зоне ответственности. Впервые поставлена задача соблюдения всех требований по надёжности локомотивов согласно их техническим условиям. Необходимо существенное снижение стоимости жизненного цикла. Повышенные весовые нормы предъявляют особые требования к тяговым характеристикам тягового подвижного состава. Решение этих задач потребовало научного осмысления,

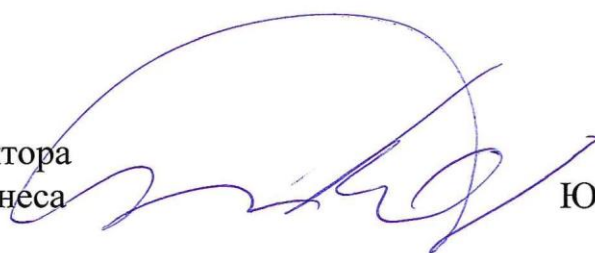
ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

создания новой модели управления жизненным циклом локомотивов в целом и их ТОиР в частности.

А.П.Семеновым на основании детального анализа мирового и отечественного опыта управления жизненным циклом локомотивов, статистических данных об эксплуатации и ТОиР локомотивов в ОАО «РЖД», теоретических исследований возможностей систем технического диагностирования, моделирования процессов жизненного цикла локомотивов предложена научно обоснованная модель управления жизненным циклом локомотивов с использованием автоматизированных систем технического диагностирования, включая встроенные, бортовые и деповские (стационарные и переносные).

Предложенная А.П.Семеновым модель положена в основу перспективной системы управления жизненным циклом локомотивов, внедряемой в настоящее время в АО «Трансмашхолдинг». Модель апробирована в сервисном локомотивном депо «Братское» группы компаний «ЛокоТех». Полученные результаты позволяют тиражировать модель управления жизненным циклом на всём полигоне ОАО «РЖД», где эксплуатируются локомотивы, поставляемые АО «Трансмашхолдинг» по контракту жизненного цикла.

Заместитель генерального директора
по развитию локомотивного бизнеса



Ю.С.Дегтярёв

**ООО «ЛокоТех»**

Земляной Вал, д.59, стр.2, Москва, 109004

+7(499) 638 2298

www.locotech.ruinfo@locotech.ru

ОГРН 1127746035890

ИНН 7715900556, КПП 770901001

03.03.2021 № ЛТ/1045

На № _____ от _____

**СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ
РЕЗУЛЬТАТОВ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ
СЕМЕНОВА АЛЕКСАНДРА ПАВЛОВИЧА**

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Семенова Александра Павловича на тему: «Разработка модели управления жизненным циклом локомотивов с использованием современных методов технического диагностирования» по научной специальности 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» имеют большой научно-практический интерес и положены в основу разработки проекта «Цифровое ремонтное локомотивное депо» (далее – Проект), согласно которому группа компаний «ЛокоТех» совместно с компаниями ОАО «РЖД» и АО «Рослокомотив» реализовала два комплексных проекта.

ПЕРВЫЙ ПРОЕКТ: сформирована и внедрена в 57 сервисных локомотивных депо модель управления жизненным циклом редукторных и подшипниковых узлов экипажной части локомотивов, устанавливающая взаимосвязь между коэффициентом готовности к эксплуатации и информационной составляющей о риске эксплуатации каждой единицы локомотива и локомотивного парка в целом, и интегрирующая данные стационарных средств вибрационного

диагностирования, организационный механизм взаимодействия сервисных служб, служб вибрационного диагностирования и информационно-аналитических служб.

Кроме того, в ходе исследования получены данные о практической возможности применения средств бортового диагностирования технического состояния узлов ходовой группы непосредственно в условиях движения при действии реальных скоростных, динамических и климатических нагрузок. На основе создания и увязки данных с бортовых средств диагностирования формируется модель сквозной технологии диагностирования, обеспечивающей прогнозирование изменения состояния оборудования на горизонте до следующего сервисного обслуживания с учетом групповых и индивидуальных особенностей узлов и условий эксплуатации.

Результаты диссертационного исследования реализованы также в комплексе средств и технологии диагностирования узлов и подсистем тягового подвижного состава: узлов и элементов экипажной части, оборудования электрических и пневматических цепей, тяговых и вспомогательных электрических машин, и других не менее значимых подсистем.

ВТОРОЙ ПРОЕКТ: пилот-проект модели Цифровой универсальной ремонтной позиции с автоматизированным формированием допуска локомотива на линию на базе сервисного локомотивного депо «Братское» Восточно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

В СЛД «Братское» с 2018 года, на примере самых массовых отечественных электровозов серий 2ЭС5К и 3ЭС5К переменного тока с тиристорными выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП) и приводом постоянного тока (производитель – Новочеркасский электровазостроительный завод (НЭВЗ) группы компаний АО «Трансмашхолдинг») реализован пилот-проект модели Цифровой универсальной ремонтной позиции с автоматизированным формированием допуска локомотива на линию, основу которого составляет киберфизическая модель жизненного цикла локомотивов, предложенная в диссертации А.П.Семенова. В СЛД «Братское» внедрены шесть универсальных ремонтных позиций, комплексный принцип действия которых предложен в диссертации. Внедрена автоматизированная система управления (АСУ)

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

технологическими процессами технического обслуживания и ремонта локомотивов (ТОиР). По предложенным в диссертации принципам интероперабельности данные о техническом состоянии локомотивов (от их бортовых, переносных и стационарных систем диагностирования), о загруженности станков (через их микропроцессорные системы управления), от устройств из серии «Интернет вещей» объединены в единую киберфизическую систему управления базами данных (СУБД).

Реализация проекта подтвердила достоверность предложенных в диссертации А.П. Семенова научно-обоснованных технических и технологических решений. На базе полученных результатов проекта, в настоящее время, рассматривается проект тиражирования достигнутых результатов на Восточном полигоне ОАО «РЖД».

Диссертация Семенова Александра Павловича имеет безусловно большое научно-практическое значение для локомотиворемонтного комплекса страны. Её результаты будут использоваться в группе компаний ООО «ЛокоТех» и далее в процессе инновационного развития системы сервисного обслуживания локомотивов во всех 85 сервисных локомотивных депо, расположенных на территории Дальневосточной, Забайкальской, Восточно-Сибирской, Красноярской, Западно-Сибирской, Свердловской, Октябрьской, Московской, Горьковской, Приволжской и Северо-Кавказской железных дорог ОАО «РЖД».

**Генеральный директор
ООО «ЛокоТех»**



А.Н. Маврин

«___» марта 2021 г.