Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
Российский университет транспорта
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи

Рафиков Рафик Хайдарович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ПРИ РЕМОНТЕ ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов
и электрификация

Диссертация
на соискание учёной степени
доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук, профессор
Куликов Михаил Юрьевич

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 8
1 ОБЗОР ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ С УЧЁТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ГОТОВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ К ОСВОЕНИЮ РЕМОНТА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТИПОВ ПРОДУКЦИИ. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ 21
1.1 Обзор технического и технологического отставания России по уровню развития железнодорожной техники 22
1.2 Техническая готовность производства 26
1.2.1 Теоретические направления технической подготовки производства 27
1.2.2 Конструкторская подготовка производства участка ультразвукового контроля стержня люлечного подвешивания локомотивов 58
1.2.3 Организационная подготовка производства 60
1.2.4 Сравнительный анализ основных этапов ремонта (создания) опытного образца и получения допуска на эксплуатацию в соответствии с установленными требованиями 61
1.2.5 Производство промышленных продуктов с использованием технологий цифрового моделирования 66
1.2.6 Цифровые двойники и цифровая сертификация изделий высокотехнологичной промышленности 73
1.2.7 Моделирование и управление состоянием объектов ремонта в реальном времени. Цифровой двойник в неразрушающем контроле 77
1.2.8 Интеграция данных в цифровом двойнике: создание динамической модели для эффективного неразрушающего контроля 79
1.2.9 Сравнительный анализ концепции управления ремонтом тягового подвижного состава корпорациями транспортного машиностроения 81
1.3 Локомотивы с люлечным подвешиванием в России и мире 94

1.3.1 Оценка влияния основных конструктивно-технологических факторов качества (технологии ремонта) на дефектность деталей и узлов локомотивов серии ВЛ80 98
1.3.2 Причины износа и повреждения деталей и узлов ..... тягового подвижного состава при эксплуатации 101
1.4 Оценка научных работ, направленных на совершенствование методов оценки надежности, оптимизацию процессов технического обслуживания и повышения эффективности ремонта тягового подвижного состава 121
1.5 Алгоритм освоения ремонта подвижного состава и их элементной базы с целью установления им нового назначенного срока службы 124
1.5.1 Значение технической диагностики, 3D-промышленных решений и неразрушающего контроля для оценки и прогнозирования технического состояния подвижного состава 133
1.5.2 Основные этапы развития технологий и средств неразрушающего контроля на транспорте 143
1.5.3 Цифровизация и компьютеризация средств неразрушающего контроля и его методическое обеспечение 149
1.5.4 Этапы реверс-инжиниринга и создания 3D-модели при ремонте тягового подвижного состава 165
1.6 Выводы по разделу 1 170
2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ УЛУЧШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА 172
2.1 Оптимизация производственно-технологических процессов 173
2.2 Основные принципы внедрения системного подхода в целях оптимизации эффективности технологических систем на предприятиях 176
2.3 Понятие об информативности производственно-технологических процессов 183
2.4 Повышение информативности технологического процесса по ремонту узла люлечного подвешивания локомотивов серии ВЛ80 198
2.4.1 Технология ремонта деталей и узлов электровозов с использованием 3D-решений 198

2.4.2 Расчёт эффективной зоны сканирования. Разработка комбинированной технологии контроля стержня узла люлечного подвешивания локомотивов 203
2.4.3 Применение неразрушающего контроля при ремонте узла люлечного подвешивания локомотивов серии ВЛ80 210
2.5 Выводы по разделу 2 222
3 ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УЗЛА ЛЮЛЕЧНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ЛОКОМОТИВОВ СЕРИИ ВЛ80 С УЧЁТОМ ПРИМЕНЕНИЯ 3D-ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ И КОМПЛЕКСНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ 224
3.1 Анализ элементов патентных исследований в области технологий и конструкций узлов подвешивания локомотивов 224
3.2 Этапы технических решений, направленных на доработку узла, и их конструктивная реализация с учётом современных требований и стандартов. Корректировка подходов к проведению неразрушающему контролю стержня люлечного подвешивания электровозов: анализ текущей документации и предложения по модернизации 229
3.3 Технологическое оснащение ремонтного производства на участках неразрушающего контроля стержня узла люлечного подвешивания локомотивов серии ВЛ80 230
3.4 Проектно-конструкторская экспертиза предложенного технического решения по модернизации 234
3.5 Проектирование и интеграция высокоточных мультифизических моделей для осуществления контроля узла люлечного подвешивания локомотива с использованием COMSOL Multiphysics 239
3.6 Выводы по разделу 3 241
4 ЕДИНОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ ПРОСТРАНСТВО ПРОЦЕССОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ 243

4.1 Обоснование подходов к интеграции разнородной информации с целью достижения наивысшей степени достоверности результатов 243
4.2 Классификация изображений с применением сверточных нейронных сетей на платформе Keras 253
4.3 Информационно-динамическое моделирование и управление процессом технологической подготовки производства по освоению ремонта и/или изготовления новых видов продукции 255
4.4 Выводы по разделу 4 258
5 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ПО ОСВОЕНИЮ РЕМОНТА И/ИЛИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НОВЫХ ВИДОВ ПРОДУКЦИИ 260
5.1 Технологическая подготовка производства при освоении ремонта тягового подвижного состава. Алгоритмическая модель построения сетевого плана работ в рамках технологической подготовки производства 260
5.2 Процедура продления срока службы подвижного состава с учетом предложенной модели 270
5.3 Постановка продукции на производство с использованием технологии цифровых двойников 275
5.4 Выводы по разделу 5 276
6 ПРОМЫШЛЕННЫЕ 3D-РЕШЕНИЯ И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ РЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА 278
6.1 Функциональная структура робота как универсального автомата для выполнения механических действий: анализ исполнительных систем и сенсорного управления 278
6.2 Геометрический подход к решению обратной задачи кинематики шестизвенного манипулятора с вращательными сочленениями 281
6.3 Управление многочленными манипуляторами в робототехническом комплексе на основе нейронных сетей 283

6.4 Роботизированный комплекс для автоматизированной обработки данных контроля и калибровки с использованием информации о дефектах, нейронных сетей и цифрового двойника для повышения эффективности технического обслуживания и ремонта 287
6.4.1 Роботизированный процесс измерения диаграмм направленности пьезоэлектрических преобразователей 288
6.4.2 Разработка автоматизированного технического средства определения диаграмм направленности пьезоэлектрических преобразователей 291
6.4.3 Разработка автоматизированного устройства определения индикатрис рассеяния дефектов при ультразвуковом контроле 294
6.4.4 Разработка метода определения шага сканирования при роботизированном ультразвуковом контроле 299
6.4.5 Разработка технологии роботизированного комбинированного контроля деталей и узлов локомотивов при технологической подготовке производства 302
6.5 Цифровая методология прогнозирования, оценки и оптимизации технического состояния деталей и узлов локомотивов с использованием нейронных сетей, цифровых двойников и автоматизированных систем контроля 309
6.6 Методика расчёта повышения эффективности технологии ремонта на основе цифровой методологии прогнозирования 312
6.7 Выводы по разделу 6 313
7 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА УЗЛА ЛЮЛЕЧНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗОВ СЕРИИ ВЛ80 С УЧЕТОМ ВНЕДРЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА 314
7.1 Анализ технологического процесса ремонта люлечного подвешивания электровоза ВЛ80 315

7.2 Адаптивная технология ремонта узла люлечного подвешивания локомотивов с интеграцией цифровых двойников и прогностических моделей на основе глубинных нейронных сетей для повышения надежности и качества эксплуатации 322
7.3 Сравнительный анализ втулок из стали и полиамида ПА6 324
7.4 Создание трёхмерной информационной модели производственного комплекса с использованием передовой технологии воздушного сканирования 327
7.4.1 Создание и использование цифровых моделей для управления и оптимизации производственно-технологических процессов в эпоху цифровой трансформации 330
7.4.2 Анализ возможностей использования информационной 3D-модели в создании «Цифрового производства» 332
7.4.3 Информационные структуры и функциональные возможности 3D-моделей, созданных на основе данных беспилотных летательных аппаратов 333
7.5 Расчёт матрицы влияния трещин на прочность стержня узла люлечного подвешивания локомотива ВЛ80 335
7.6 Анализ корреляционной матрицы: оценка надежности узла, ключевые параметры и пути совершенствования конструкции 339
7.7 Выводы по разделу 7 340
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 342
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 345
Список литературы 347
ПРИЛОЖЕНИЕ 395
ПРИЛОЖЕНИЕ 396

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. В настоящее время средний процент износа железнодорожного транспорта в парке ОАО «РЖД» составляет 68,4 %, а средний возраст превышает 27 лет. Уровень износа тягового подвижного состава (ТПС) превышает 70 %. Полная и оперативная замена всех требующихся единиц ТПС затруднена недостатком инвестиций. Для решения проблемы необходим комплексный подход к сохранению и повышению ресурса существующего парка ТПС при его ремонте и эксплуатации, включающий в себя:

– внедрение цифровых и компьютеризированных технологий и средств объективного контроля;

– улучшение производственно-технологических систем и процессов ремонта ТПС;

– повышение качества и сокращение времени технологической подготовки производства (ТПП) при освоении ремонта ТПС, что способствует долгосрочной устойчивости и конкурентоспособности железнодорожной индустрии;

– повышение информативности технологических процессов (ТП) ремонта участков неразрушающего контроля (НК) при ТПП в сервисных локомотивных депо (СЛД).

Для увеличения информативности ТП НК при оценке состояния элементной базы ТПС в ходе ТПП следует опираться на данные, полученные в рамках традиционных методов технического диагностирования, которое уже проводится, так и перспективные цифровые и компьютеризированные технологии и средства: НК и промышленные 3D-решения, которые, в свою очередь, являются одними из важнейших инструментов получения информации и данных (в концепции цифровых двойников (ЦД) данные – односторонняя связь, информация – двухсторонняя) о фактическом техническом состоянии ТПС и его составных частей без непосредственного участия человека. За человеком в этом случае остаётся право принятия окончательного «вердикта» по отбраковке изделия.

Указанные технологии и средства ремонта позволяют исключить чрезмерную длительность технологических операций и снизить ручной процесс диагностирования, повышая уровень автоматизации производства. Ответственность, лежащая на персонале при ТПП ремонта ТПС, осуществляющим дефектоскопирование в процессе их ремонта и принимающим решение о браковке или дальнейшей годности их деталей и узлов, колоссальная.

Сказанное выше обусловливает актуальность данной диссертационной работы.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в решение задач ТПП при освоении ремонта ТПС в железнодорожной отрасли внесли учёные: В. А. Аксенов, З. Г. Гиоев, В. Д. Авилов, В. И. Бервинов, И. В. Бирюков, М. П. Пахомов, А. Д. Глущенко, В. Г. Григоренко, А. В. Грищенко, Д. Г. Евсеев, М. Ф. Карасев, Л. Г. Козлов, В. И. Колесников, А. С. Космодамианский, В. С. Коссов, Н. Н. Кудрявцев, В. Д. Кузьмич, А. С. Курбасов, А. Л. Лисицын, В. Н. Лисунов, А. П. Матвееичев, В. Б. Медель, А. С. Нестрахов, В. А. Нехаев, В. А. Николаев, В. А. Камаев, А. П. Павленко, Е. С. Павлович, И. И. Галиев, А. В. Плакс, Е. Н. Розенберг, Н. А. Ротанов, В. А. Кучумов, А. Н. Савоськин, А. П. Семенов, С. Г. Шантаренко, В. Г. Щербаков и другие.

Данная работа представляет обобщённые результаты исследований, выполненные автором на кафедре «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Российского университета транспорта, а также в организациях АО «Группа Синара», АО «Трансмашхолдинг», АО «Желдорреммаш», ООО «Локомотивные технологии», АО «НТЦ "Промышленная безопасность"», ОАО «ВНИИЖТ», НПЦ «ЭХО+», ООО «Акустические контрольные системы», ООО «РэнджВижн», группа компаний МС-ПРОМ и других предприятиях. Эти результаты представляют собой важный вклад в развитие технологий ремонта в сфере транспортного машиностроения при ремонте ТПС с 2012 по 2025 годы.

В целях повышения эффективности ТПП ремонта за счёт увеличения уровня автоматизации и информативности ТП, включая операции по контролю технического состояния деталей и узлов, а также минимизации влияния человеческого фактора при поиске дефектов, остаётся значительная проблема. Ручная обработка данных, полученных в результате НК, требует значительного времени, что зачастую приводит к задержкам в принятии решений, направленных на предотвращение аварийных ситуаций в эксплуатации. Повышение информативности технологий и средств контроля остаётся приоритетной задачей в организации процессов ремонта.

Производственно-технологические процессы и системы, связанные с ремонтом, характеризуются ограниченной надёжностью. На начальных этапах данного исследования применяемые виды (методы) НК деталей и ТПС в условиях эксплуатации зачастую не отличались высокой производительностью, сопровождались значительными затратами, зависимостью от компетентности персонала и влиянием человеческого фактора, а также в целом были недостаточно информативны. Их применение сопровождалось низким уровнем подтверждения выявляемых дефектов, что повышало вероятность возникновения отказов.

На каждом этапе передачи информации могут возникать погрешности в анализе полученных данных и инженерных расчётов на их основе, которые дают неточности и отклонения при получении фактических результатов с физического объекта, в результате чего достоверность сведений об объекте ремонта определяется определённой вероятностью их правильного отражения и оценке.

Таким образом, применение современных технологий ремонта позволяет не только повысить уровень автоматизации и информативности производственных процессов и систем, но и обеспечить высокий уровень качества ТОиР ТПС на всех этапах жизненного цикла.

Научно-техническая проблема, решаемая в диссертационной работе.

Повышения информативности процессов НК для повышения эффективности ремонта ТПС с целью повышения качества ремонта в условиях постоянного

повышения конструкционной сложности ТПС и обеспечения безопасности движения ТПС в процессе эксплуатации.

Объектом исследования является ТПП при организации ремонта ТПС.

Предметом исследования является система ТПП локомотивных депо при освоении ремонта ТПС.

Цель диссертационной работы – разработка и внедрение подходов ТПП ремонта ТПС с использованием передовых промышленных 3D-решений и комплексного НК.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

1. **Исследование** актуального состояния вопроса технической подготовки производства при выполнении ремонта различных серий в депо с применением диагностических данных для оценки их технического состояния.

2. **Обоснование** диагностических возможностей наиболее распространённых методов технического диагностирования деталей и узлов локомотивов при ТПП ремонта.

3. **Разработка** математической модели, позволяющей оценить воздействие конструктивных и технологических характеристик деталей и узлов локомотивов на процесс освоения ремонта в рамках технической подготовки производства, с учетом результатов использования комплексных видов (методов) НК и современных промышленных 3D-технологий.

4. **Разработка** научно-обоснованной методики управления процессами по постановке локомотивов на производство в СЛД, учитывающей влияние технологии ремонта на их техническое состояние и их составных частей. Обоснование механизмов продления срока службы ТПС с установлением им нового назначенного срока службы.

5. **Проектирование, разработка** в программных продуктах для автоматизированного проектирования и 3D-моделирования, таких как *SolidWorks v.* 24 и бета-версии «КОМПАС-3D» *v.* 23 роботизированного комплекса *AR8* (с

англ. – *Alisa Rafikova* 8) с функцией автоматической обработки данных контроля и калибровки. Этот комплекс будет использовать дополнительную информацию о выявленных дефектах, основываясь на их индикатрисах рассеяния, и применять математические методы нейронных сетей с целью повышения информативности ТП ремонта.

6. **Создание** ЦД модернизированной конструкции узла люлечного подвешивания локомотивов с использованием 3D-промышленных решений с целью разработки технологии комбинированного контроля для увеличения межремонтного пробега локомотива и его остаточного ресурса эксплуатации.

7. **Разработка технологии ремонта** деталей и узлов различных серий ТПС при ТПП ремонта, предусматривающей интеграцию ЦД–объекта ремонта в ТП ремонта.

Научная новизна заключается в следующем:

1. **Предложен** интеллектуальный подход к обработке диагностической информации при ТОиР ТПС, использующий нейронные сети для оценки и прогноза их технического состояния. Система отображает фактическое состояние ТПС в Едином информационном пространстве (ЕИП) управления, что улучшает производительность и снижает ручную обработку результатов контроля.

2. **Создана методика** организации и управления процессами ТПП ремонта ТПС в СЛД, которая учитывает влияние ремонтных технологий на техническое состояние локомотивов и их компонентов, основываясь на данных 3D-промышленных решений и комплексного НК.

3. **Разработана методология** оценки и прогнозирования фактического технического состояния деталей и узлов ТПС при ТПП ремонта с использованием методов на основе искусственных нейронных сетей и идентификации дефектов по их индикатрисам рассеяния с последующим определением их типа.

4. **Создан ЦД** модернизированной конструкции узла люлечного подвешивания при ТПП ремонта с использованием 3D-промышленных решений и комплексного НК с целью разработки технологии комбинированного контроля без

демонтажа втулки, позволяющий отказаться от ревизии узла при ТР2, и проводить её при ТР3 на пробеге 400 тыс. км, осуществляя контроль остаточного ресурса эксплуатации без его разборки.

5. **Разработана технология ремонта** узла люлечного подвешивания ТПС при ТПП ремонта, предусматривающая интеграцию ЦД в процесс ремонта.

Положения, выносимые на защиту:

1. **Методология оценки и прогнозирования** технического состояния деталей и узлов локомотивов в процессе ремонта при ТПП с использованием методов на основе искусственных нейронных сетей, по данным промышленных 3D-решений и комплексного НК, и идентификации дефектов основываясь на анализе их индикатрис рассеяния.

2. **Автоматизированный роботизированный комплекс, выполняющий обработку информации о контроле и калибровке**, с использованием дополнительных данных об обнаруженных дефектах, полученных на основе анализа их индикатрис рассеяния (патент № 2581083 от 10.04.2016), и калибровку пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП, патент РФ № 2581082), с применением математического аппарата нейронных сетей (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615834 от 13.03.2024) и ЦД объекта контроля (ремонта), позволяющего автоматически предложенным способом определить шаг сканирования поперечно-продольным и продольно-поперечным перемещением преобразователей. Основной целью разработки является повышение информативности ТП ремонта локомотивов за счёт всестороннего анализа данных в режиме реального времени.

3. **Технология ремонта узла люлечного подвешивания** ТПС в рамках ТПП, которая включает интеграцию ЦД в процесс ремонта. Технология основана на модели прогноза, обеспечивающей безопасность и качество ТОиР ТПС, использующей глубинные нейронные сети для выделения критических дефектов в их деталях и узлах ТПС. Важной характеристикой модели является её адаптивная

реакция на внешние воздействия, что позволяет оптимизировать ТП ремонта и повысить надежность эксплуатации ТПС.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в создании технологии ремонта и методов объективной оценки качества деталей и узлов ТПС при ТПП в СЛД, основанных на интеллектуальной обработке данных контроля с использованием 3D-промышленных решений и комплексного НК.

Практическая значимость работы

Результаты данного исследования могут быть широко использованы в промышленности при осуществлении ТОиР ТПС. Предложенный метод ТПП основан на применении 3D-решений и комплексного НК, позволят повысить эффективность процессов ТОиР, сократить сопутствующие затраты и улучшить качество ремонта.

1. Созданные математические модели помогают выявлять зависимости между конструктивно-технологическими характеристиками, эксплуатационными свойствами локомотива и состоянием его отдельных деталей и узлов. С их помощью анализируются значения и допуски параметров конструкции и технологии, требуемые к соблюдению при выполнении ремонтных работ, а также формулируются базовые требования для разработки технической документации, необходимой для улучшения ТП ремонта, проектирования оборудования, специализированной оснастки, приспособлений и инструментов контроля.

2. Разработана обобщённая модель АС КТПП, позволяющая выбрать наиболее эффективные методы организации и управления процессами ТПП ремонта ТПС, сократить сроки их постановки на производство.

3. Спроектирован и изготовлен роботизированный комплекс с автоматической расшифровкой данных контроля (патент РФ № 2581082, 10.04.2016, патент РФ № 2581083, 10.04.2016), с использованием дополнительной информации о выявленных дефектах по их индикатрисам рассеяния и математического аппарата нейронных сетей, в целях повышения информативности ТП ремонта.

4. Разработана технология ремонта деталей и узлов ТПС при ТПП ремонта с интеграцией ЦД в ТП, тем самым повышены его информативность, безопасность и качество, что позволит исключить чрезмерную длительность технологических операций, снизив ручной процесс диагностирования при ремонте.

Технология внедрена в локомотивных депо России ООО «ЛокоТех-Сервис» и ООО «СТМ-Сервис», научно-производственных компаниях ООО «Диагностика», ООО «Wave Scan», ООО «ЯрЧПУ», на кафедре «Технология машиностроения» Ярославского государственного технического университета и кафедре «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» РУТ (МИИТ) в период 2012–2024 гг.

Методы исследования. В диссертационном исследовании применялись подходы и методы теории технических систем, дискретной математики, вычислительной математики, математического программирования, графов, планирования экспериментов, оптимизации ТП, системного анализа, а также современные научные инструменты, позволяющие целенаправленно исследовать и оптимизировать указанные ТП, обеспечивая наиболее эффективную ТПП ремонта. В процессе выполнения вычислительных экспериментов и анализа эффективности различных подходов к обработке данных измерений применялся ЦД объекта контроля, полученный в программных продуктах для автоматизированного проектирования и 3D-моделирования *SolidWorks* v. 24 и бета-версии системы автоматизированного проектирования (САПР) КОМПАС-3D *v.* 23, а также специализированный объектно-ориентированный язык программирования высокого уровня *Python* v. 3.13. В данном контексте с использованием библиотеки *TensorFlow* как бэкенда и фреймворка *Keras*, эффективно реализованы нейросетевые модели для различных задач машинного обучения и глубокого обучения. Макетные приложения создавались с использованием среды разработки *Delphi* v. 7, и мультифизической платформы *Comsol API*, дающей возможность моделировать различные физические процессы, включая акустику, теплопередачу, электромагнитные явления, механические взаимодействия и другие. Первичная

обработка табличных данных выполнялась в приложении *Microsoft Excel* и программном пакете *Comsol* для моделирования ультразвукового контроля (УЗК) стержня узла люлечного подвешивания электровоза серии ВЛ80.

Достоверность научных положений и результатов диссертационной работы подтверждаются экспериментальными исследованиями с высокой степенью воспроизводимости, статистической обработкой полученных данных с установленной вероятностью и необходимым числом повторных экспериментов, а также сравнением полученных выводов с результатами работ других авторов и актуальными нормативными документами. Эффективность разработанных технологии ремонта и роботизированного комплекса контроля подтверждена успешным их внедрением в процесс ремонта ТПС при ТПП. Адекватность моделей основана на строго обоснованных и корректно применённых принципах и законах физики твёрдого тела, методов математического анализа, моделирования, теории вероятностей и информационных теорий. Высокая степень совпадения теоретических расчетов с данными экспериментов и практическими результатами подтверждает соответствие предложенных математических моделей.

Личный вклад автора. Постановка цели и задач исследования, проведение теоретических и практических исследований, разработка технологии ремонта деталей и узлов ТПС при ТПП ремонта с интеграцией ЦД в ТП без демонтажа втулок.

Практическая реализация результатов диссертационной работы в локомотивном хозяйстве России удостоверена документами о внедрении, а также протоколами межведомственной комиссии, сопровождающими процесс постановки продукции на производство.

Реализация результатов работы. Итоги проделанной работы, позволили дополнить (актуализировать) следующие нормативные документы:

1. ЦАРВ.058.95.00.000 РК – руководство по выполнению среднего и капитального ремонта тепловозов серии 2ТЭ116УД.

2. ЦАРВ.004-2022 – программа и методика контрольных испытаний колесных пар тепловозов серии 2ТЭ25КМ, подвергнутых лазерному поверхностному термическому упрочнению.

3. ЦАРВ.005-2019 (опытный) – проект, посвященный модернизации узла люлечного подвешивания локомотивов, включая карту опытной эксплуатации.

А также разработать в рамках ТПП следующую технологическую и методическую документацию:

4. ЭП2К.21.15.000 – комплект технологической документации для полного освидетельствования и ремонта колесных пар электровозов серии ЭП2К, включая замену бандажей.

5. 026.25310.0002 – технологический процесс ремонта узла люлечного подвешивания локомотива ВЛ80 в системе IPS.

6. Технологические карты:

– НК СЛД-15 119М – на ремонт стержня люлечного подвешивания;

– НК СЛД-И 025К – на ремонт коллектора якоря тягового электродвигателя (в сборе);

– НК СЛД-И 004У, 005У, 045У, 047У – на обслуживание колесных пар локомотивов;

– НК ТК СЛД-И 070М – на выполнение ремонтных работ.

7. Методические рекомендации, регламентирующие порядок проведения ультразвукового контроля металлических конструкций, устройств, а также зданий и сооружений (Серия 32. Выпуск 11) под авторством коллектива. Издание выпущено в Москве ОАО «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2015 г. (ISBN: 978-5-93586-670-9).

8. 03.08.015.00.000 – эталонная линия для выполнения ремонта и полного освидетельствования колесных пар локомотивов в сервисных локомотивных депо.

9. 26.11.023.00.000 – каталог запасных частей, включающий цифровые модели деталей и узлов локомотивов для применения в аддитивных технологиях.

10. 026.25310.0001 – технологическая инструкция по изготовлению модельной оснастки с использованием 3D-печати методом послойного наплавления термопластика.

11. 026.25310.0003 – инструкция по проведению 3D-сканирования изделий с применением оптических сканеров *RangeVision Pro/Pro2M/Spectrum в* разных рабочих зонах сканирования.

Такие результаты подтверждают применение инновационных подходов и технологий в разработке и производстве, а также их практическую применимость в локомотивном хозяйстве.

Апробация работы. Полученные результаты диссертационного исследования, представлены, обсуждены и одобрены на научно-технических мероприятиях, таких как семинар «Современное состояние НК и пути его развития» (Москва, 2013), научно-практическая конференция «Актуальные проблемы приборостроения, информатики и социально-экономических наук» (Москва, 2013). Результаты работы активно обсуждались на XX Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике (Москва, 2014), II Международной научно-практической конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов» (Москва, 2015), а также на научно-практической конференции «Территория NDT 2016» (Москва, 2016). Вместе с тем они были представлены на ряде других значимых мероприятий, в том числе семинар «К вопросу о применении ультразвуковой томографии и голографии на машиностроительных заводах, нефтехимических комбинатах и других смежных производствах» (Москва, 2016), научно-практическая конференция «Территория NDT 2017» (Москва, 2017) и XXI Всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике (Москва, 2017).

Также, данные материалы стали предметом заинтересованного обсуждения на научно-производственной конференции «Дороги будущего. По пути инноваций» (Ярославль, 2018), II Всероссийском конкурсе «3D-технологии:

будущее российских локомотивов» от ТМХ (Москва, 2019), XXII Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и диагностикам (Москва, 2020), а также на LXXXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы» (Санкт-Петербург, 2021). Дополнительно, исследование получило признание участников Семьдесят четвертой Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием (Ярославль, 2021), а также обсуждалось на «Гагаринских чтениях – 2022» (Москва, 2022) и Всероссийской научно-практической конференции «Компьютерно-интегрированные технологии в машиностроении: проблемы и перспективы» (Ярославль, 2022). Кроме того, выводы исследования затрагивались на таких крупных встречах, как Международная научно-техническая конференция «Машиностроительные технологические системы» (Ростов-на-Дону, 2022) и Научно-производственная конференция «Дороги будущего. По пути инноваций» (Ярославль, 2023).

В 2023 году материалы работы были обсуждены на Сетевой научно-производственной конференции АО «ФПК» по неразрушающему контролю (Новосибирск) и Международной научной конференции «Современные технологии. Технические и естественные науки» (Архангельск). Кроме того, внимание к исследованиям было проявлено в рамках Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы и проблемы контрольно-надзорной деятельности в сфере транспорта: правовое регулирование, административное и судебное правоприменение» (Москва, 2023), Транспортного форума «Подвижной состав: производство, эксплуатация и ремонт» (Москва, 2024), и Семинара ВНИИЖТ о перспективах сотрудничества НОК РЖД с АНО «Агентство по технологическому развитию» (Москва, 2024). Итоговые результаты были представлены на Третьей Международной научно-технической конференции «Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы» (Ташкент, 2024), VIII Всероссийской научно-технической конференции с

международным участием «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов» (Омск, 2024) и Всероссийской конференции «Литейный интенсив: технологии современного производства» (Москва, 2024).

Материалы диссертации прошли подробное обсуждение и получили положительные отзывы на заседаниях кафедры «Электроники и электротехники» в ФГБОУ ВПО МИРЭА – Российского технологического университета (МГУПИ, МИТХТ) в 2018 году, научно-технического совета АО «НТЦ «Промышленная безопасность» (2019), а также Экспертного совета проектов развития железнодорожного транспорта и инфраструктуры при АНО «Инновационный инжиниринговый центр» (декабрь, 2024). Их важность и значимость также была подтверждена в ходе заседания кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» ФГАОУ ВО Российского университета транспорта в январе 2025 года.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано более 59 научных работ, в том числе 12 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК, 2 публикации в журналах, индексируемых в системах *Scopus/Web of Science*, а также одну монографию, в которой подробно изложены ключевые положения диссертации, связанные с вопросами ремонта ТПС. Кроме того, автором были получены 10 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и 2 патента на изобретения, а также другие результаты интеллектуальной деятельности.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Диссертационное исследование выполнено в рамках и в соответствии с паспортом специальности, утвержденным ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, по направлению 2.9.3 – «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация». Работа удовлетворяет требованиям и охватывает следующие разделы из «Области исследования», обозначенной в паспорте специальности: пункты 2, 3, 4 и 6.

1 ОБЗОР ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ С УЧЁТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ГОТОВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ К ОСВОЕНИЮ РЕМОНТА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТИПОВ ПРОДУКЦИИ. ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Железнодорожный транспорт на протяжении более чем столетия является ключевым элементом транспортной системы Российской Федерации, о чем свидетельствует его значительная роль в обеспечении эффективной связи между различными регионами страны и поддержке экономической и социальной структуры. Однако современное состояние железнодорожного транспорта сталкивается с серьёзными проблемами, требующими глубокого анализа и поиска решений. В этой связи современные вызовы, стоящие перед железнодорожной отраслью, требуют значительных улучшений как в технологиях, так и в технических средствах, включая совершенствование конструкции узлов и компонентов с целью увеличения срока службы ТПС, а также его технических и функциональных характеристик.

ТПС, наряду с инфраструктурой, представляет собой ключевой элемент системы перевозок, от функционирования которого напрямую зависят эффективность и результаты работы железнодорожного транспорта. Главным аспектом работы сервисных предприятий является обеспечение работоспособности и технической исправности ТПС, соответствующих требованиям безопасности движения, сохранности перевозимых грузов и пассажиров, при минимальных экономических затратах для реализации технологического развития и увеличения рентабельности [1 – 4]. Анализируя производственную деятельность предприятия, можно выделить пять её основных составляющих, взаимодействие которых оказывает значительное влияние на успешное функционирование организации: техническая, энергетическая, организационная, кадровая и экономическая.

Техническая в данном ряду занимает ключевое место, так как она формирует требования к остальным составляющим, определяя задачи и технические параметры предприятия. Ее границы, в соответствии с ГОСТ 27.004–85 [5], включают целостность взаимосвязанных средств технического оснащения, объектов труда и исполнителей, необходимых для осуществления заданных ТП в заранее установленных условиях.

1.1 Обзор технического и технологического отставания России по уровню развития железнодорожной техники

Обзор требует подробного рассмотрения нескольких ключевых аспектов: исторического контекста, текущего состояния, сравнения с ведущими производителями железнодорожного транспорта в разных странах мира, а также перспектив на будущее. Рассмотрим эти факторы последовательно.

Советский период: в период Советского Союза железнодорожный транспорт был одним из важнейших факторов развития экономики. Советская железнодорожная техника имела высокий уровень надежности и была весьма затратной, что объяснялось необходимостью поддержания инфраструктуры в условиях сложного климата и огромных расстояний. В этот период было произведено большое количество ПС, которые активно использовались не только в СССР, но и в странах Восточной Европы и Азии [6 – 8].

Постсоветский период: с распадом СССР в 1991 году начались стагнация и деградация железнодорожной инфраструктуры и техники. Экономический кризис, нехватка инвестиций и технологических инноваций привели к значительным потерям в этой отрасли. Лишь в конце 1990-х – начале 2000-х годов начались реформы, направленные на модернизацию железнодорожного транспорта [9]. Многие локомотивы и вагоны, использующиеся сегодня, были произведены ещё в советское время или в 1990-е годы, их срок эксплуатации подходит к концу.

В отличие от европейских и азиатских стран, в России развитие высокоскоростного железнодорожного транспорта находится на начальной стадии

[10, 11]. В последние два десятилетия на отечественных железных дорогах активно ведутся работы по развитию высокоскоростного железнодорожного сообщения (разработка и испытания электропоезда «Сокол», ввод в эксплуатацию электропоездов «Сапсан» и «Аллегро» на маршрутах движения Санкт-Петербург – Москва и Санкт-Петербург – Хельсинки, подготовка к реализации проекта по строительству высокоскоростной магистрали Москва – Казань, которую планируется продлить до Пекина, является одним из самых амбициозных, но его реализация пока сталкивается с множеством проблем [12]. В России в сфере машиностроения наблюдалось отставание в области проектирования кузовов и организации универсального производства кузовов, а также в разработке скоростных тележек, создании асинхронного тягового электропривода и микропроцессорных систем управления для поездов и их систем. Для разработки и внедрения высокоскоростных электропоездов на российских предприятиях были привлечены зарубежные партнеры, обладающие опытом в создании аналогичной техники, такие как *Siemens* и *Alstom*. В 2009 и 2010 годах на испытания были представлены высокоскоростные электропоезда «Сапсан» и «Аллегро».

В Европе лидируют Германия, Франция, Италия и Испания [13]. Эти страны имеют разветвленную сеть высокоскоростных железных дорог (*IntercityExpress* (*ICE*), *Train à Grande Vitesse* (*TGV*), *Frecciarossa* и другие), современный подвижной состав и передовые технологии управления перевозками. Европейская система управления движением поездов (*European Train Control System* (*ETCS*) использована на значительной части железнодорожных магистралей, что способствует повышению уровня безопасности и оптимизации эффективности движения.

Азия: Япония и Китай являются мировыми лидерами в области изготовления и эксплуатации высокоскоростных поездов. Японские «Синкансэн» и китайские (*China Railway High-speed* (*CRH*) достигли значительных успехов в области скорости, комфорта и надежности [14]. Китай также осуществляет активное

строительство новой железнодорожной инфраструктуры как внутри страны, так и в рамках проекта «Один пояс – один путь».

В США железнодорожный транспорт в основном ориентирован на грузовые перевозки [15]. Несмотря на то, что существует несколько пассажирских железнодорожных маршрутов, таких как *Amtrak*, страна значительно отстает в развитии высокоскоростных пассажирских перевозок по сравнению с Европой и Азией.

Сравнение российских и зарубежных железных дорог показывает, что каждая из систем обладает своими сильными сторонами и уникальными вызовами. В России, несмотря на значительное техническое развитие, существует ещё много возможностей для повышения уровня автоматизации и цифровизации, а также для внедрения дополнительных высокоскоростных линий. Анализ технического развития и технологического прогресса представлен в таблицах 1.1, 1.2.

Таблица 1.1 – Техническое развитие

Регион	Электрификация	Высокоскоростные поезда	Автоматизация и цифровизация	Экологичность
Россия	Высокая	Ограниченная	В стадии развития	Умеренная
США	Низкая	Отсутствует	Высокая	Умеренная
Европа	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая
Азия	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая

Сравнительный анализ технологического прогресса представлен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Технологический прогресс

Регион	Инновации в материалах	Инфраструктурные проекты	Грузовые перевозки	Пассажирские перевозки
Россия	Средние	Высокие	Умеренные	Высокие
США	Высокие	Высокие	Высокие	Низкие
Европа	Высокие	Высокие	Умеренные	Высокие
Азия	Высокие	Высокие	Высокие	Высокие

В то же время опыт других стран, таких как США, Европа и Азия, может быть полезен для адаптации передовых технологий и методик, что позволит значительно улучшить эффективность и устойчивость железнодорожного транспорта в России.

Благодаря реализации постановления Правительства РФ от 18 мая 2001 года № 384 [16], в XXI веке произошли значительные изменения в системе управления локомотивным комплексом. Предложенная модель обслуживания ТПС доказала свою эффективность в период 2014–2021 годов, несмотря на сложности в процессе адаптации. В настоящее время принятая стратегия, ориентированная на сервисное обслуживание и ремонт ТПС, остаётся актуальной [17].

С августа 2018 года в рамках объединения активов двух крупных компаний – АО «Трансмашхолдинг» и ООО «ЛокоТех-Сервис» – началось формирование общей операционной системы. Переданная под их управление структура охватывает весь жизненный цикл локомотива, включающий проектирование, производство, ввод в эксплуатацию, ТОиР и утилизацию (рисунок 1.1). В системе сервисного обслуживания находится свыше 15 тысяч единиц ТПС, с предполагаемой продолжительностью эксплуатации до 40 лет [18].

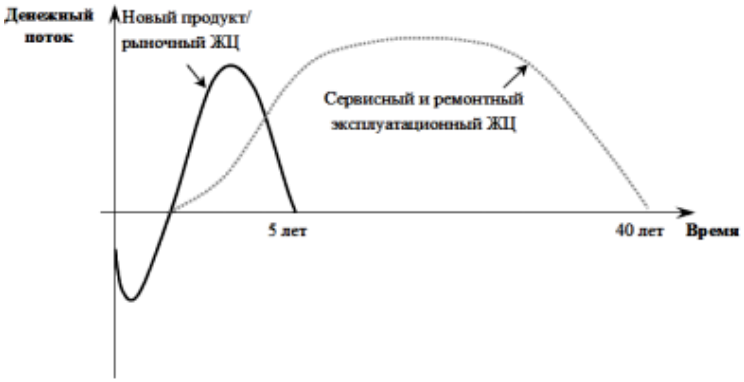


Рисунок 1.1 – Диаграмма жизненного цикла тягового подвижного состава

Сервисные организации ориентированы на оптимизацию затрат в процессе эксплуатации жизненного цикла ТПС. Зарубежные производители локомотивов, такие как *General Electric, Siemens, Bombardier, Alstom* и другие, не ограничиваются только выпуском продукции, но и реализуют программы сервисного ремонта ТПС на основе контрактов жизненного цикла (КЖЦ) в различных странах мира [19–22].

В настоящее время износ отечественного парка ТПС в среднем достигает 68,4 %, а средний возраст локомотивов превышает 27 лет [23]. Из общего парка превышение нормативного срока службы наблюдается у 52 % электровозов, 31 % тепловозов и 39 % тяговых агрегатов. Помимо того, около 40 % оборудования для погрузки и разгрузки грузов, вагоноопрокидывателей, и систем, занимающихся размораживанием смерзшихся грузов, требуют полной замены, а примерно 20 % необходимо модернизировать. Однако полностью обновить парк ТПС в кратчайшие сроки не представляется возможным [24], поскольку реформирование локомотиворемонтной отрасли в рамках перехода на сервисную модель ТОиР значительно изменило её экономические параметры [25].

В данных условиях повышение эффективности технической готовности производства при ремонте ТПС является актуальной задачей [26–30].

1.2 Техническая готовность производства

Современный подход к организации работы производственно-ремонтного предприятия основан на системном и процессном подходах. Системный подход помогает рассматривать компанию или организацию как единое целое – части связаны между собой и работают ради общей цели. Процессный подход, в свою очередь, фокусируется на том, как выполняются задачи: управления, координации, коммуникации и принятия решений.

В этой области особенно выделяются несколько значимых методов и идей, например, концепция управления качеством (*Total Quality Management* (*TQM*), разработанная А. Фейгенбаумом и Э. Демингом в 1980-х годах. Также важен опыт компании Toyota, которая предложила инновации вроде логистической концепции «точно в срок» и других методов бережливого производства (*Lean*), что впоследствии было адаптировано по всему миру [31–34].

Другие важные разработки включают подход «шесть сигм» от компании *Motorola*, который помогает улучшить качество процессов, и систему

сбалансированных показателей (*Balanced Scorecard*), созданную Капланом и Нортоном [35–39], которая стала популярным инструментом для стратегического управления. Все эти идеи направлены на то, чтобы организации работали более эффективно, слаженно и качественно, привлекая сотрудников к улучшению процессов.

1.2.1 Теоретические направления технической подготовки производства

Процесс выпуска любой продукции на производстве предваряется тщательной и всесторонней подготовительной работой. Техническая подготовка ремонта ТПС сводится к выполнению целого ряда мероприятий, среди которых особое внимание уделено проектированию, внедрению новых технологий ремонта и повышению эффективности существующих процессов. Данный подход предусматривает использование передовых технологий для оптимизации структуры подготовки и ремонта ТПС. Основополагающими направлениями подготовки выступают конструкторская подготовка и ТПП, которые формируют единую систему освоения ремонта различных серий ТПС. Подобные системы внедряются в сервисных депо, которые отвечают за ТОиР ТПС.

В процессе ТОиР ТПС необходимо строгое соблюдение межгосударственных стандартов (ГОСТ) и отраслевых стандартов (ОСТ). Регулирование требований к проведению НК осуществляется через нормативную документацию и стандарты [40-44]. Данные документы определяют требования к процессу контроля, применяемым видам (методам) НК, настроечным образцам, а также используемому оборудованию.

Качество деталей ТПС при ремонте проверяется на основе ремонтной и эксплуатационной документации, где описаны требования к недопустимым дефектам и применяемым видам (методам) НК. Технологическая документация (ТД) устанавливает параметры и порядок выполнения технологии контроля, включая организационные требования, используемое оборудование, параметры

контроля и условия труда и отдыха персонала. Непосредственно контроль выполняется аттестованным персоналом, сдавшим экзамены и получивших допуск на право проведения НК деталей и узлов ТПС, на аттестованных участках НК и лаборатории.

Система управления качеством НК включает экспертизу и испытания видов (методов) контроля, проверку наличия средств для выполнения контроля и мониторинг достоверности результатов, соответствующих требованиям ИСО/МЭК 17020 [45] и ИСО/МЭК 17025 [46] с участием независимых экспертов. Следует уделять особое внимание внедрению комплексного подхода к управлению качеством осваиваемой продукции, который обеспечит систематическое улучшение процессов ремонта (контроля), гарантируя тем самым высокую степень достоверности, точности и информативности результатов ремонта (контроля), обеспечивая соответствие установленным стандартам качества.

Свойства и назначение объектов производства, а также особенности их технологии напрямую влияют на организационную структуру предприятия и производственный цикл. В подготовительный период особое значение приобретает правильное проведение технической подготовки производства, которая составляет от 5 до 50 % от общей трудоемкости и стоимости подготовительных работ (таблица 1.3). Эти затраты постоянно растут, что объясняется усложнением конструкций ТПС, а также увеличением сложности конструкции, в связи с более высокими требованиями к функциональным и техническим характеристикам со стороны потребителей. Проектирование столь сложных изделий осуществляется на основе мультидисциплинарных исследований с применением инженерного анализа и компьютерных расчётов. Ошибки возникающие на этапе ТПП приводят к перепроектированию, что значительно увеличивает продолжительность и стоимость ТПП и освоения продукции. При этом высокая конкуренция рынка диктует необходимость освоения производства продукции в строго определённое время.

Таблица 1.3 – Объем технической подготовки производства

Объем – в общей подготовке производства	Характер производства	Доля ТПП в объеме производства, %
Высокий	Массовое	50
Средний	Серийное	30
Низкий	Индивидуальное	10
Умеренный	Полуавтоматизированное	25
Повышенный	Проектное	15

Данный метод помогает систематизировать подходы к управлению затратами на техническую подготовку производства в зависимости от специфики производства. При анализе стоит учитывать, как изменения в доле технической подготовки производства могут повлиять на общую эффективность и прибыльность различных видов деятельности в компании. Сервисные компании активно работают над снижением затрат на ТОиР ТПС, при этом гарантируя высокий уровень надежности и безопасности его эксплуатации. Одновременно возрастают требования к ответственности производителей оборудования за поддержание его технической исправности.

В этом разделе рассматриваются основные факторы, влияющие на техническую подготовку производства, и их отражение на техническом состоянии и качестве функционирования продукции в эксплуатации.

1.2.1.1 Технологическая подготовка производства

ТПП имеет первостепенное значение для организации эффективного процесса ТОиР различных серий ТПС. Это особенно актуально в сфере транспорта, где уровень надежности и безопасность эксплуатации напрямую связаны с качеством выполнения ТОиР.

ТПП представляет собой комплекс мероприятий, направленных на обеспечение конструктивной и технологической документацией, а также

средствами, необходимыми для выпуска продукции и ее деликатной обработки. Данный комплекс включает в себя НИОКР для создания комплекта рабочей конструкторской документации (РКД), комплекта технологической документации, разработку оснастки и приобретение оборудования. В процессе освоения также предполагается производство опытной партии, дооснащение до серийного производства и подтверждение запуска серийного производства. Основные этапы ТПП представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Основные этапы ТПП (общее представление)

№ п/п	Наименование этапа	Перечень работ
1	Исследовательско-проектные работы и разработка технологий	– Анализ конструктивных особенностей изделий. – Разработка технологических процессов производства. – Проведение опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ
2	Организация материально-технической базы	– Выбор и закупка оборудования, инструментов и оснастки. – Создание или модернизация производственных площадок. – Обеспечение производства необходимыми материалами и ресурсами
3	Разработка ремонтной КД и ТД	– Разработка и сопровождение КД и ТД, включающей технические условия, рабочие карты и инструкции по технологии. – Проектирование технологических карт и определение маршрутов прохождения изделия по этапам производственного цикла
4	Аттестация и сертификация	– Оценка компетенций персонала, выполняющего проекты по разработке новых технологий и организации производственных процессов. – Интеграция новых технологий ремонта
5	Внедрение новых технологий и стандартов	– Инвестирование в инновации и новые технологии. – Введение новых методов производства и контроля качества. – Принятие системы управления качеством (ISO, ГОСТ и другие стандарты)
6	Контроль и анализ производственного процесса	– Осуществление постоянного мониторинга и анализа всех этапов производственного цикла. – Проведение аттестации технологических процессов и рабочих мест. – Осуществление учета и составление отчетности по показателям и параметрам технологического процесса

Процесс разработки ТП при внедрении ремонта ТПС представляет собой один из ключевых этапов. Сложность их проектирования приводит к необходимости обработки большого объема данных и проведения сложных инженерных расчетов. Поэтому с момента появления первых ЭВМ начались попытки их использования для решения технологических задач.

Трудоемкость и себестоимость ремонта, зависит от сложности конструкции и требований, предъявляемым к объектам ремонта (контроля), а в случае ТОиР ТПС от сложности конструкции, требованиям к ремонту, определенной РКД.

ТПП включает в себя анализ данных о ТПС, включая его КД и требования

стандартов, определяющих его применение, эксплуатацию и испытания. На основе проведенного анализа разрабатываются комплекты рабочей ТД, которые включают маршрутные и операционные карты (ОК) с переходами контроля качества, а также карты, содержащие информацию об используемом оборудовании, инструментах, оснастке и приспособлениях. К числу этих документов относятся и технологические карты контроля (ТК), которые представляют собой важнейший элемент ТД на предприятиях, специализирующихся на освоении ремонта ТПС. Основными элементами данного процесса выступают управление данными о производственных технологиях и организация контроля качества отремонтированной продукции.

На этом этапе также разрабатывается рабочая КД, включая ремонтное руководство с перечнем деталей и узлов, подвергающихся НК, содержащее информацию о применяемых видах (методах) контроля. Кроме того, в документации указываются номер чертежа и наименование каждой детали, что представляет собой важную часть процесса обеспечения качества и безопасности в ходе ремонта.

Внедрение различных видов (методов) НК в процессы ремонта обосновано требованиями нормативной и/или КД, задающей нормы и правила изготовления, ремонта и эксплуатации деталей и узлов ТПС. Этими документами устанавливается обязательность проведения контроля качества с применением различных видов (методов) НК [47].

Система документации, обеспечивающая реализацию процедур НК при ремонте ТПС, включает нормативные и ТД. К нормативной базе относятся национальные и межгосударственные стандарты, стандарты организаций, а также иные документы, утвержденные уполномоченными органами. ТД соответствует ГОСТ 3.1102 [48] и состоит из инструкций и ОК, которые детализируют процедуры НК для производственных условий. Разработка и утверждение стандартов в области НК проводится в рамках положений ГОСТ 1.2 [49], тогда как ТД создают на основе требований ГОСТ 3.1105 [50] и ГОСТ 3.1502 [51].

Методики, относящиеся к НК, обязаны обеспечивать выявление недопустимых дефектов. Их эффективность подтверждается независимой экспертизой. При составлении документации требования к методикам и к самим специалистам, осуществляющим контроль, должны соответствовать международным нормам, таким как EN 473 [52], ГОСТ 30489 [53] и ISO 9712 [54].

Нормативная база по НК охватывает следующие направления:

– общие принципы организации контроля, применение средств для его выполнения, обеспечение метрологической достоверности, а также правила подтверждения соответствия закрепленным требованиям;

– основные определения, положения и области применения различных методов НК в зависимости от объектов контроля;

– установленные технические требования к средствам и методикам НК для конкретных объектов;

– типовые методики проведения НК, которые не содержат описания самого производственного процесса, но регламентируют методы применения средств контроля.

Технологическая часть документации по НК включает технологические инструкции (ТИ) и/или ТК, где детализированы этапы подготовки и выполнения процедур контроля. Эти документы стандартизируют применение видов (методов), средств и оборудования НК в рамках определённых производственных условий и процедур.

Для каждого конкретного объекта ремонта (контроля) или его группы разрабатывается отдельная ТД, где фиксируются все процессы с учётом требований нормативных документов. Это направлено на обеспечение точности, достоверности и воспроизводимости результатов контроля, а также на возможность объективной оценки качества проверяемых объектов ремонта.

ТИ по НК содержит следующие разделы.

1. Указание типов объектов контроля, а также их параметры, обуславливающие пригодность для НК (чистота поверхности, состояние покрытия, шероховатость и пр. в соответствии с ГОСТ 2789–73 [55]).

2. Перечисление нормативных документов, на которые опирается инструкция.

3. Указание зон контроля, характерных для них дефектов и способы их выявления.

4. Сведения о применяемых средствах НК, включая их технические характеристики и вспомогательное оборудование.

5. Требования к квалификации персонала, участвующего в НК, и к критериям их работы.

6. Основные параметры контроля, способы их настройки, а также регламенты действий: порядок, очередность, периодичность выполнения операций.

7. Характеристики методов НК и описание технологической последовательности операций.

8. Подходы к интерпретации данных, включая методы выделения полезного сигнала из шумов.

9. Критерии для оценки качества проверяемых объектов, включая основания для браковки.

10. Список регистрируемых параметров и результатов, требования к документированию и хранению протоколов контроля, а также форматы передачи данных (в том числе электронные базы).

11. Требования по организации рабочих мест сотрудников в соответствии с ГОСТ 12.2.003 [56], ГОСТ 12.1.003 [57], ГОСТ 12.2.049 [58] и другими стандартами.

12. Соблюдение норм и правил по электробезопасности (ГОСТ 12.1.019 [59]), пожарной безопасности (ГОСТ 12.1.004 [60]) и санитарным требованиям.

ОК НК составляются на основе утверждённых ТИ. Они могут быть разработаны также с использованием нормативных методик на выполнение

типовых процедур НК. Такие карты должны строго регламентировать порядок технологических операций и могут использоваться без необходимости применения дополнительных инструкций.

Особое внимание уделяется процессам ТОиР экипажной части локомотивов, наиболее отвечающей повышенным требованиям обеспечения безопасности движения. Выделим объект ремонта: узел люлечного подвешивания кузова магистрального электровоза серии ВЛ80в/и. Задача повышения эффективности производства на этих ремонтных участках решается посредством комплексного подхода, включающего в себя:

– внедрение цифровых и компьютеризированных технологий и средств объективного контроля;

– улучшение производственно-технологических систем и процессов ремонта ТПС;

– повышение качества и сокращение времени ТПП при освоении ремонта ТПС, что способствует долгосрочной устойчивости и конкурентоспособности железнодорожной индустрии.

Вместе с тем актуальной остаётся проблема повышения информативности процессов НК при ТПП ремонта в СЛД. В этом контексте целесообразно использование современных цифровых и компьютеризированных технологий, таких как НК, который играет ключевую роль в рамках производственно-технологических процессов, связанных с ремонтом ТПС, обеспечивая получение точных данных о его реальном техническом состоянии. Данные технологии и средства контроля позволяют проводить детальный анализ состояния деталей и узлов ТПС без их физического разрушения, что значительно повышает надежность и безопасность производственно-технологических систем и процессов ремонта ТПС.

НК включает в себя виды (методы) контроля и процедуры, направленные на обеспечение безопасности, надежности и долговечности ТПС, а также на предотвращение аварийных ситуаций и потенциальных нарушений в его эксплуатации, обеспечивая высокую точность в обнаружении потенциально

опасных дефектов и оценке общего состояния объектов ремонта. Таким образом, компании могут принимать обоснованные решения о необходимости ремонта или замены деталей и узлов ТПС, что способствует снижению затрат и увеличению срока службы как ТПС в целом, так и узлов, в частности. Кроме того, использование промышленных 3D-решений в комплексе с современными цифровыми технологиями (компьютерное моделирование, инженерный анализ, большие данные, облачные данные, интернет вещей и суперкомпьютерные вычисления) позволяет создавать ЦД – виртуальные модели физических объектов ремонта.

Эти цифровые «прототипы» – прототип физического объекта ремонта (контроля) разрабатываются на основе реальных данных с помощью технологий 3D-сканирования. Одним из ключевых достоинств ЦД является возможность их обновления прямо в ходе эксплуатации, что обеспечивает мониторинг изменений состояния ремонтируемых объектов в режиме реального времени. Интересно, что данный подход позволяет автоматизировать многие процессы и в ряде случаев создавать ЦД для эталонирования процесса роботизированного УЗК без непосредственного участия человека:

– моделирование акустических полей, создаваемых акустическими преобразователями и акустическими антенными решётками;

– моделирование взаимодействия акустических волн с несплошностями, локализованными в твёрдых телах ограниченных размеров (акустические методы отражения, прохождения и комбинированные);

– компьютерный анализ в широкой области изменения параметров контроля и возможных положений, форм, размеров и ориентаций дефектов.

Ключевую роль играет систематизированный подход к принятию решений, при котором учитывается весь спектр значимых факторов, связанных с объектами ремонта. Однако важно отметить, что окончательное решение о выбраковке и возможных мерах по оптимизации системы остается за специалистами. Они анализируют информацию, полученную с использованием видов (методов) НК и

ЦД, и на основании этого формулируют выводы и принимают соответствующие решения. Таким образом, интеграция НК и промышленных 3D-решений не только усиливает контроль и поддержание технического состояния ТПС, но и способствует более эффективному управлению ресурсами и повышению конкурентоспособности производств в условиях стремительно развивающейся цифровой экономики. Сказанное выше обусловливает актуальность данной диссертационной работы.

Данная диссертация направлена на развитие системного подхода как научного исследования, ориентированного на повышение производительности труда, ускорение внедрения современных технологий, инструментов НК и промышленных 3D-решений, а также на совершенствование технологического оснащения. Исследование проводится в соответствии с ключевыми целями, обозначенными в «Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года», утверждённой распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 года № 877-р [61], и в рамках программы «Цифровая экономика Российской Федерации», утверждённой распоряжением Правительства РФ от 28 июля 2017 года № 1632-р [62].

1.2.1.1.1 О параметрах автоматизации технологических процессов

Автоматизация управления основывается на информации, получаемой от технологических объектов, которые описываются через специфическую информацию – параметры, которые в техническом смысле представляет собой величину, характеризующую определённое свойство процесса, явления, системы или устройства. Существуют множество критериев для классификации параметров. Например, параметры, которые описывают процессы в рамках разных научных областей, таких как физика, химия и биология, делятся на физические, химические, биологические и другие.

С точки зрения качественно-количественного признака, параметры можно разделить на две группы: качественные и количественные. Качественные параметры, обычно оцениваемые органолептически, отражают характеристики, такие как цвет, вкус и запах, и имеют субъективный характер, что затрудняет их измерение с помощью технических средств. Логические заключения, основанные на таких параметрах, могут использоваться для контроля качества продукции, включая выводы о годности или соответствии определенным нормам.

Что касается количественных параметров, они определяются через измерения, которые дают прямую числовую характеристику. Поскольку большинство измерений в области контроля ТП связаны с изменением физических величин во времени, процесс измерения параметров сводится к оценке таких величин [63–65].

Некоторые качественные параметры могут быть переведены в количественные с помощью измерительных приборов, например, цветомеров, что позволяет получить количественные оценки цвета. Логические выводы могут быть обработаны автоматизированными системами и вычислительной техникой.

Классификация параметров автоматизируемых ТП может продолжаться по различным признакам, таким как характер физических величин. Параметры могут быть разделены на непрерывные и квантованные в зависимости от уровня квантования, при этом непрерывный параметр может принимать бесконечное количество значений в заданном диапазоне, в то время как квантованный имеет ограниченное количество значений.

По характеру дискретизации параметры могут быть непрерывными либо прерывистыми, то есть дискретизированными во времени или пространстве. Последние отражают состояние ТП только в определенные моменты времени или в заданных точках пространства.

В зависимости от целей извлечения информации параметры можно также классифицировать на пять категорий: для управления, идентификации, измерения, контроля и учета. Параметры управления важны для восприятия информации и

выполнения действий, параметры идентификации служат для «опознания» объектов или процессов, в то время как контролирующие параметры служат для определения соответствия состояния объекта заданной норме. Счетные параметры используются для определения числовых значений однотипных объектов.

По отношению к ТП параметры подразделяются на входные, промежуточные и выходные. Входные параметры описывают качество и количество исходных материалов, промежуточные отражают ход процесса, а выходные характеризуют общие технико-экономические показатели.

Также параметры могут быть классифицированы по информативности. Информативные параметры представляют собой измеряемые величины или величины, связанными с измеряемыми. Неинформативные параметры не имеют функциональной связи с измеряемыми величинами, но могут влиять на измерительные приборы.

Что касается возможности контроля, параметры могут быть контролируемыми и неконтролируемыми. Первые определяются посредством показаний приборов системы автоматизации, тогда как вторые характеризуются случайными процессами.

По направлению управления параметры делятся на управляемые (отражающие состояние процесса) и управляющие (определяющие воздействия для поддержания режима).

Наконец, параметры системы автоматизации могут быть сосредоточенными, характеризующими состояния локальных объектов, и распределенными, отражающими величины, которые имеют распределение в пространстве.

1.2.1.1.2 Разработка и использование автоматизированной системы для комплексной подготовки производства

В современной отечественной и мировой практике ТОиР ТПС заметна тенденция к постепенному снижению объемов планово-предупредительных методов ремонта и осуществлению подхода, основанного на фактическом

состоянии техники. Это обусловлено активным развитием и внедрением [66, 67] автоматизированных систем управления (АСУ) производственно-технологическими процессами, микропроцессорных систем управления локомотивами (МСУ), систем автоматизированного проектирования КД и ТД (САПР КТП), а также автоматизированных систем технической диагностики (АСТД). Такие системы интегрируются в оборудование, выполняются в виде бортовых устройств на базе МСУ или могут быть представлены в виде стационарных и переносных деповских АСТД. Применение таких технологий позволяет эффективно решать задачи ТПП при ремонте ТПС, разрабатывать ТД, управлять качеством продукции и улучшать документооборот на всех этапах жизненного цикла ТПП. Отсутствие таких систем делает продукцию отечественных предприятий неконкурентоспособной и снижает её качество в глазах международного рынка.

Внедрение автоматизированной системы конструкторско-технологической подготовки производства (АС КТПП) является важным шагом к модернизации и оптимизации производственно-технологических процессов на предприятиях [68–70]. Это позволяет повысить эффективность работы, улучшить качество продукции и сократить затраты.

Сокращение затрат на поддержку ЖЦ изделия – одна из целей (*Continuous Acquisition and Lifecycle Support* (*CALS*) – непрерывная информационная поддержка ЖЦ продукции) [71]. Распространен также термин (*Product Lifecycle Management* (*PLM*) – управление жизненным циклом продукции), имеющий сходное значение [72, 73]. Современные промышленные информационные технологии базируются на концепции единого информационного пространства (ЕИП), объединения информационных ресурсов промышленного предприятия [74].

Сегодня данная концепция широко применяется производителями и ремонтными предприятиями для повышения эффективности на всех этапах жизненного цикла ТПС. Процесс объединения управленческих и производственно-технологических процессов основан на применении *PLM* систем [75] и систем

автоматизированного проектирования. Для проектирования и подготовки производства необходимо выполнение проектных и технологических задач в рамках единого цифрового пространства, что делает возможным взаимодействие специалистов из разных подразделений, организаций и даже стран, обеспечивая возможность их совместной работы над разработкой изделия в режиме реального времени [76–79]. Автоматизация основных процессов позволяет добиться большей гибкости при управлении ТПП ремонта ТПС, обеспечить высокое качество ремонта и повысить экономическую эффективность сервисного предприятия. В частности, для решения задач, связанных с управлением процессами разработки ТП и постановки на производство новых серий ТПС, необходимо обеспечить ее интеграцию с АС КТПП, что невозможно сделать без изменения структуры и принципов управления процессами КТПП путем создания единого информационно-программного пространства для работы с диагностическими данными в рамках соответствующей автоматизированной системы.

Многоуровневая структура автоматизации производственных процессов включает в себя АС КТПП, системы контроля и сбора данных (S*upervisory Control And Data Acquisition* (*SCADA*), системы управления производственными операциями (*Manufacturing Execution System* (*MES*) и системы управления предприятием (*Enterprise Resource Planning* (*ERP*). Данная архитектура обеспечивает комплексное и эффективное управление всеми аспектами бизнес-процессов, что позволяет отслеживать выполнение заказов и управлять ресурсами в режиме реального времени.

Интеграция технологий ЦД и интернета вещей (*Industrial Internet of Things* (*IIoT*) играет ключевую роль в повышении уровня автоматизации и улучшении предсказуемости процессов на производстве, способствуя созданию концепции «умных предприятий». В результате применение современных информационных технологий обеспечивает значительное увеличение эффективности и гибкости управления на различных уровнях производственно-технологического процесса,

что, в свою очередь, способствует повышению конкурентоспособности сервисных предприятий в условиях динамично развивающегося рынка.

Как подчеркивается в исследовании [80] внедрение АС КТПП позволяет значительно ускорить процессы подготовки производства, повышает их точность и эффективность и нацелено на следующие результаты:

– автоматизация процессов позволит снизить ручной труд и исключить человеческий фактор;

– интеграция с *ERP* системами обеспечит согласованность всех этапов производственного цикла [81];

– комплексные отчёты и аналитические данные позволяют принимать обоснованные управленческие решения.

1.2.1.1.3 Анализ использования автоматизированных решений для конструкторско-технологического проектирования

Первые исследования, связанные с интерактивной компьютерной графикой, были инициированы в поздние 1950-е и ранние 1960-е годы [82–84]. Основной целью этих разработок было повышение продуктивности инженеров-технологов, конструкторов и проектировщиков. Это было достигнуто путем создания инструментов для разработки, проектирования, визуализации, документирования и сохранения информации о продуктах в программных системах, что позволяло легко вносить изменения в будущем (рисунок 1.2).

Рисунок 1.2 – Консоль системы DAC-1, General Motors, 1950-е гг.

Первые пользователи систем (*Computer-Aided Design* (*CAD*), (*Computer-Aided Manufacturing* (*CAM*), (*Computer-Aided Engineering* (*CAE*) приходили из аэрокосмической, автомобильной и электронной отраслей. Некоторые из крупнейших американских компаний, таких как *General Motors, IBM, Lockheed-Georgia, Itec Corp.* и *McDonnell* (*McDonnell Douglas*), разработали собственные системы *CAD/CAM/CAE* для внутреннего применения. Впоследствии некоторые из этих разработок были превращены в серийные коммерческие продукты, например системы *Unigraphics* от *McDonnell Douglas* и *CADAM* от *Lockheed*.

К концу 1960-х годов на рынке появилось несколько поставщиков CAD/CAM/CAE-систем, таких как компания *Calma* (1968 г.), а также *Application* и *Computervision* (1969 г.), которые предлагали решения «под ключ» [85].

Развитие рынка CAD/CAM/CAE-систем можно условно разделить на три ключевых этапа, каждый из которых охватывал около десяти лет. Первый этап начался в 1970-е годы и ознаменовался появлением научно-практических достижений, доказывающих возможность проектирования сложных промышленных изделий. На этом этапе работа с системами велась через графические терминалы, подключенные к мэйнфреймам компаний *IBM* и *Control Data*, а также к мини-ЭВМ, таким как *PDP*/11 (разработка *Digital Equipment Corporation*) и *Nova* (производство *Data General*). Из-за иерархической структуры ресурсов, когда слишком много пользователей одновременно обращались к центральному процессору, возникала значительная нагрузка, что снижало эффективность работы [86]. В тот период пользователи CAD/CAM/CAE-систем сталкивались с ограничениями, связанными с использованием массивных вычислительных устройств, где распределение ресурсов происходило на основе заданных приоритетов. Это объяснялось тем, что технологии микропроцессоров ещё не достигли необходимого уровня развития.

Важные достижения в компьютерной индустрии 1960–1970-х годов, способствовавшие прогрессу CAD/CAM/CAE-технологий, привели к значительному снижению стоимости мэйнфреймов, появлению

микрокомпьютеров в 1970-х и объединению микропроцессоров с математическими сопроцессорами в 1980-х, что, в свою очередь, способствовало реализации распределенных систем. Микропроцессоры и сопроцессоры стали основой современных инженерных рабочих станций и персональных компьютеров. В течение 1980-х годов наблюдался постепенный переход CAD-систем с мэйнфреймов на персональные компьютеры (ПК), которые обеспечивали более высокую скорость работы и были дешевле многозадачных систем, согласно данным компании *Dataquest* [87].

Информационная интеграция задач, решаемых предприятиями, получила значительное развитие. В 1970–1980-х годах CAD/CAM/CAE-системы прошли этап активной эволюции, позволяя более эффективно выполнять проектные работы [88]. На втором этапе, охватывающем 1980-е годы, началась широкая популяризация и распространение CAD/CAM/CAE-технологий для массового использования [89]. В этот период произошел переход от трехмерного каркасного моделирования к твердотельным методам.

К середине 1980-х годов ресурс возможностей архитектуры *Motorola* был полностью исчерпан. На основе концепции микропроцессоров с сокращенным набором команд (*Reduced Instruction Set Computer* (*RISC*) были созданы новые чипы для рабочих станций, работающих под управлением *ОС Unix*, таких как *Sun SPARC* [90–93]. Применение архитектуры *RISC* существенно увеличило скорость работы CAD-систем.

Начиная с конца 1980-х годов и вплоть до сегодняшнего дня развитие механических CAD-систем (*MCAD*) было направлено на внедрение технологий твердотельного, поверхностного, параметрического и конструктивно-элементного моделирования, а также на повышение уровня их интеграции с функционалом CAM-подсистем [94–98]. MCAD-системы становятся все более сложными и функционально расширенными, направленными на интеграцию функций и создание «сквозных» моделлеров.

CAD-системы особенно эффективны при внесении изменений в

существующие проекты и их повторении, когда геометрия деталей формируется на основе модификации существующей. Этому способствуют доступ CAD-систем к базам данных завершенных проектов, а также возможность заимствования аналогов или стандартных деталей и сборочных единиц. Однако для эффективного использования этих возможностей необходимо наличие электронных баз данных с мощными средствами поиска и хранения информации – систем класса *PDM* (управление данными о продукте) [99].

В 1980-х годах в Советском Союзе под руководством Н. Г. Бруевича, Г. К. Горанского, Н. М. Капустина, С. П. Митрофанова, В. В. Павлова и В. Д. Цветкова [100–103] были организованы научные школы, которые значительно продвинули разработки теоретических основ автоматизации ТП управления на международный уровень. Ведущие организации, занимающиеся данной проблематикой, такие как Институт технологий и конструкторских решений (ИТК, Минск), НИИ автоматизированных технологий (НИАТ, Москва), Ленинградский институт точной механики и оптики (ЛИТМО, Ленинград), Центральный научно-исследовательский институт технологии и информатики (ЦНИТИ, Москва), Московский авиационный институт (МАИ) и Московский высший технический университет имени Н.Э. Баумана (МВТУ), провели теоретические исследования, в результате чего были созданы и внедрены комплексы автоматизированных систем технологического назначения. Первые системы разрабатывались для электронных вычислительных машин (ЭВМ) серии «Минск», а с развитием технологий и переходом на более современные ЭВМ, включая ЕС ЭВМ и СМ ЭВМ, осуществлялся дальнейший их прогресс.

В рамках разработанных систем особое внимание уделялось системам автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) и средств технологического оснащения (САПР СТО).

Значительный вклад в теорию и практику управления процессами комплексной ТПП, включая применение АС КТПП, внесли как отечественные, так и зарубежные специалисты [104]. Следует отметить специалистов:

В. И. Аверченкова [105], Ю. Д. Амирова [106, 107], Б. М. Базрова [108–110], Г. Б. Евгенева [111], А. А. Заруфьяна [112], В. Г. Кононенко [113], Д. Д. Куликова [114–116], С. П. Митрофанова [117], В. А. Смирнова [118], А.П. Семенов [119, 121], а также иностранных специалистов, таких как Д. М. Андерсон [122], П. Мертенс [123, 124], Р. Б. Чейз [125, 126], С. Эппингер [127], К. Ульрих [128] и многие другие. Обобщение положительного опыта привело к созданию комплекса стандартов для Единой системы технологической подготовки предприятия (ЕСТПП) и Единой системы технологической документации (ЕСТД) [129]. Данные стандарты закрепили достижения СССР в области автоматизации ТПП и оказали значительное влияние на готовность промышленных предприятий к широкому использованию ЭВМ в ТПП [130].

Переход к новым поколениям ЭВМ, включая персональные, потребовал значительных инвестиций в разработку новых систем. Однако в условиях экономических изменений 1990-х годов и отсутствия государственной поддержки полноценный переход САПР на персональные ЭВМ реализовать не удалось, что ограничило использование новых идей, выработанных на основе анализа работы существующих промышленных САПР.

Третий этап развития рынка CAD/CAM/CAE-систем, который начался в 1990-х годах и продолжается до настоящего времени, отличается значительным совершенствованием функциональности данных систем и их широким распространением в высокотехнологичных отраслях, где они доказали свою эффективность. Особенно в контексте технологий и средств НК, который позволяет проводить проверки качества без повреждения продукции, что имеет ключевое значение для многих промышленных производств [131].

С середины 1990-х годов происходила активная разработка микротехнологий, что позволило компании *Intel* значительно снизить стоимость производства своих транзисторов и одновременно повысить их производительность. Это создало условия для успешного конкурирования рабочих станций на платформе ПК с системами *RISC/Unix*, которые были популярны во

второй половине 1990-х и удерживают сильные позиции в проектировании интегральных схем [132]. В настоящее время в сферах, связанных с проектированием конструкций, механическим инжинирингом и разработкой печатных плат, практически полное господство удерживают операционные системы *MS Windows NT* и *MS Windows 2000* [133].

Состояние современного рынка автоматизации характеризуется растущим интересом промышленных предприятий к CAD/CAM/CAE-технологиям. Например, в 1996 году объём мирового рынка этих систем вырос до 2,5 млрд долларов США, сохраняя устойчивый тренд увеличения на 10–15 % ежегодно [134]. Аналитические компании *Dataquest* и *IDC* отметили, что начиная с 1997 года рабочие станции на платформе *Windows NT/Intel* начали обгонять Unix-станции по объемам продаж, что также указывает на успех *Windows* в сфере автоматизации [135].

За прошедшие годы стоимость лицензий на CAD/CAM/CAE-системы значительно снизилась, что также способствовало их популяризации [136, 137]. Согласно прогнозам аналитической компании *CIMdata*, рынок *PLM* ожидает восстановление и увеличение объемов продаж в ближайшем будущем [138].

Эксперты подчеркивают важность использования этого периода восстановления для внедрения инновационных технологий, привлекая не только проектировщиков, но и другие группы сотрудников. Основные поставщики CAD/PLM-решений активно работают над расширением своего рынка [139–141]. Данные шаги открывают возможности внедрения новых видов (методов) НК и повышения информативности ТП, что особенно актуально в современных производственных условиях (рисунок 1.3).

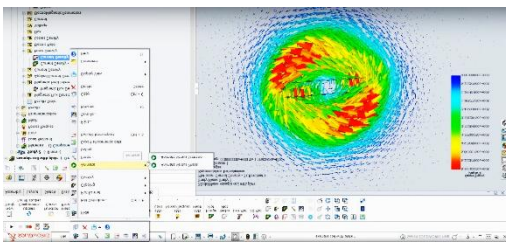


Рисунок 1.3 – Система компании Dassault Systemes – SolidWorks

В условиях увеличения нагрузки на инженеров и необходимости ускоренного проектирования качественной продукции поставщики САПР и *PLM* акцентируют внимание на технологиях, полезных как для новых, так и для существующих пользователей. Это особенно важно в контексте внедрения промышленных 3D-решений и комплексного НК. Совмещение прямого моделирования с технологиями НК и 3D-сканирования открывает новые возможности для инженеров. В этом контексте прямое моделирование становится ценным инструментом для оперативных изменений в моделях по мере получения данных о состоянии объектов.

Сегмент *CAD* остается доступным для появления новых участников, которые активно пользуются шансами внедрять передовые технологии. Среди компаний, заметно повлиявших на развитие отрасли, можно выделить *Hexagon*, *Trimble*, *SpaceClaim* (ставшую частью *Ansys*) и *GrabCAD* (приобретенную *Stratasys*). Эти и другие компании способствуют распространению ключевых направлений, таких как виртуализация, облачные решения и мобильные технологии, которые стали неотъемлемыми элементами стратегий развития производителей [142].

Применение САПР открывает возможности для всесторонней оптимизации производственно-технологических процессов на всех этапах – от закупки материалов и комплектующих до управления ремонтом ТПС. Следует подчеркнуть, что современные САПР [143] позволяют не только формировать КД, но и создавать файлы, которые могут быть напрямую загружены в станки и 3D-принтеры с числовым программным управлением (ЧПУ). Такое решение дает возможность эффективно организовать распределенное производство, снижая вероятность ухудшения качества выпускаемой продукции.

1.2.1.1.4 Автоматизированные системы проектирования – основа современной промышленности в эпоху Индустрии 4.0

САПР позволяет оптимизировать производство на всех этапах: от закупок до управления выпуском запчастей, обеспечивая создание файлов для станков и 3D-

принтеров с ЧПУ. Это поддерживает распределённое производство и формирует экосистему из малых и средних компаний, а мировой рынок САПР прогнозирует рост на 6,6 % в год. В 2023 году объем мирового рынок таких систем составит $ 12,2 млрд (рисунок 1.4).

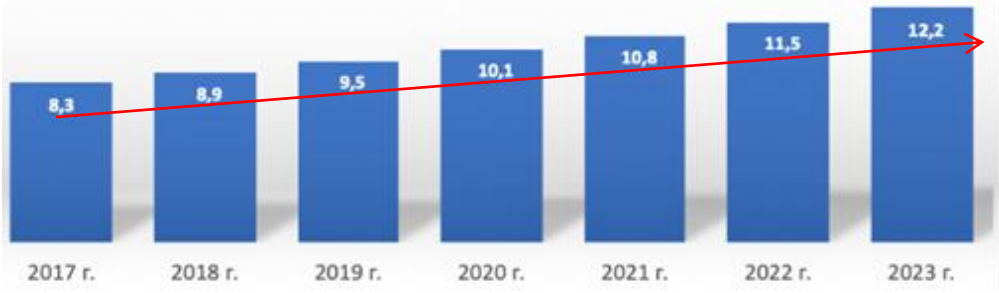


Рисунок 1.4 – Прогноз развития мирового рынка САПР, $ млрд.

Одной из перспективных тенденций развития САПР становится переход на облачные технологии, при котором пользователю предоставляется временный доступ к системе [143]. Ключевые мировые поставщики САПР – компании *Autodesk Inc., Dassault Systemes, Trimble Inc., Gstarsoft Co. Ltd., 3D Systems Corporation, Aveva Group PLC, Hexagon AB, IronCAD LLC* и *Siemens AG* [144–159]. В России разработаны, широко и успешно применяются несколько национальных систем автоматизированного проектирования «тяжелого» класса, например «КОМПАС» компании АСКОН. Для успешного развития цифровой экономики России сохранение и развитие национальных наработок в области систем автоматизированного проектирования, их широкая интеграция в формируемые структуры Индустрии 4.0 – один из важных приоритетов.

1.2.1.2 Условия технологической готовности производства по освоению ремонта новых видов продукции

Технологическая готовность производства к освоению новых видов продукции или их ремонту является важнейшим фактором, определяющим надежность ТПС в процессе эксплуатации. В этом разделе рассматриваются условия обеспечения технологической готовности производства, позволяющей

успешно осваивать новые виды продукции и обеспечивать их высокую надёжность и качество функционирования после ремонта. Рассмотрим основные условия обеспечения технологической готовности производства.

1. Техническое оснащение:

– внедрение передового оборудования, соответствующего современным научным и техническим достижениям;

– интеграция автоматизированных систем управления производством для повышения точности и эффективности выполнения операций, использование цифровых технологий для мониторинга и анализа данных производства.

2. Обучение и развитие кадрового потенциала:

– профессиональная подготовка: организация программ обучения и повышения квалификации для рабочих и инженерных кадров.

3. Управление качеством и контроль:

– организация систематического контроля на всех этапах производственно-технологического цикла, использование диагностических и измерительных приборов для оценки качества выпускаемой продукции;

– аттестация и сертификация технологий ремонта (контроля).

4. Логистика и управление цепочками поставок. Эффективная организация снабжения и поставок является необходимым условием для выполнения планов по освоению ремонта ТПС и предусматривает:

– оптимизацию логистических процессов, разработку оптимальных маршрутов и схем поставок, внедрение информационных систем для управления логистикой;

– сотрудничество с надежными поставщиками: заключение долгосрочных контрактов с проверенными поставщиками оборудования и материалов. Создание стратегических партнерств для обеспечения стабильности поставок.

5. Надежность ТПС в эксплуатации. Качество выполнения ремонтных работ напрямую зависит от соблюдения всех требований, изложенных в ремонтной документации, что соответствует концепции технологической готовности производства. Данная информация о выполнении вышеуказанных требований

может быть получена с использованием различных методов, среди которых выделяются следующие:

– расчеты и исследования, натурные испытания, цифровые испытания, мониторинг процессов как на этапе ремонта, так и в процессе эксплуатации, а также сбор отзывов потребителей. Внесение исправлений и улучшений на основе полученной обратной связи;

– оценка надежности, безотказности и долговечности продукции в различных условиях эксплуатации.

Основные условия обеспечения технологической готовности производства отражены на рисунке 1.5.

Рисунок 1.5 – Основные условия обеспечения (достижения) технологической готовности производства

Важность технологической готовности производства для освоения новых видов продукции и их ремонта нельзя недооценивать, поскольку она является одним из важных факторов, определяющим надежность ТПС в процессе эксплуатации.

Все представленные условия взаимосвязаны и влияют на повышение надёжности ТПС, обеспечивая высокую степень их качества и эффективности после проведенных ремонтов. Вместе они формируют комплексный подход,

который необходим для успешной адаптации производства к требованиям современного рынка и обеспечения его конкурентоспособности.

1.2.1.3 Факторы, отрицательно влияющие на технологическую готовность ремонтного производства

Технологическая готовность ремонтного производства часто сталкивается с различными негативными факторами, которые могут существенно затруднить или полностью остановить производственно-технологические процессы освоения ремонта ТПС.

В этом подразделе рассматриваются основные факторы, оказывающие отрицательное влияние на технологическую готовность ремонтного производства:

1. Технические и технологические риски:

– износ и устаревание оборудования: использование устаревшего и изношенного производственного оборудования, которое не соответствует современным техническим требованиям, затрудняет внедрение новых технологий и снижает качество продукции;

– отсутствие инноваций или недостаток внедрения инновационных технологий и решений могут привести к снижению конкурентоспособности продукции. Производственные процессы остаются менее эффективными и более затратными;

– пропуски в ТП: небрежные или непродуманные процессы на производстве могут привести к неоднородности и нестабильности продукции, увеличивая процент брака.

2. Финансовые риски:

– ограничение финансовых ресурсов ведет к задержке или отмене важных модернизационных проектов, улучшения инфраструктуры, закупки нового оборудования и материалов;

– высокие затраты на внедрение новых технологий: они могут оказаться неприемлемыми для предприятия с ограниченным бюджетом.

3. Организационные риски:

– недостаток квалифицированных кадров, а также отсутствие систематического обучения и повышения квалификации персонала существенно замедляют процессы освоения новых видов продукции;

– неэффективное управление: плохая организация управления производственными процессами, недостаточная координация между отделами и уровень бюрократизма могут привести к неэффективному использованию ресурсов и задержкам в производстве.

4. Логистические риски:

– непредсказуемость поставок: не зависящие от производства перебои в поставках материалов и комплектующих, задержки и логистические проблемы могут остановить производственные линии и нарушить сроки выполнения заказов;

– проблемы складирования и управления запасами: нехватка складских площадей и неэффективное управление запасами могут привести к простоям и дополнительным затратам.

5. Внешние риски:

– экономические и политические нестабильности могут значительно повлиять на планы по развитию производства и внедрению новых технологий;

– изменения в законодательстве и регламентах могут потребовать дополнительных ресурсов на адаптацию к новым требованиям, что замедляет технологический прогресс.

6. Экологические и социальные риски:

– воздействие на окружающую среду: жесткие экологические нормы и требования могут усложнить процессы производства, требуя дополнительных инвестиций в экологические проекты и технологии;

– социальные факторы: недовольство локального сообщества, трудовые конфликты и другие социальные проблемы могут снизить производительность и увеличить риск отраслевых потрясений.

Успешное преодоление перечисленных негативных факторов требует системного подхода, включающего своевременное обновление оборудования, обучение персонала, эффективное управление ресурсами и гибкость в адаптации к изменениям внешней среды. Лишь в случае успешного учета и минимизации этих факторов производство сможет достичь высокой технологической готовности и гарантировать надежность и качество ТПС в эксплуатации.

1.2.1.4 Достижение технологической готовности производства по освоению ремонта тягового подвижного состава

Надежная работа ТПС критически важна для обеспечения безопасности и эффективности транспортных систем. Для достижения установленного уровня надежности, который определяется в технических условиях (ТУ) на изделия или ТПС, необходимо обеспечить высокое качество ремонта. Это подразумевает выполнение полного спектра операций, направленных на восстановление работоспособности и эксплуатационного ресурса объекта ремонта (контроля) в соответствии с требованиями, изложенными в рабочей КД. Важным аспектом данного процесса является внедрение новых инновационных технологий, которые способствуют удовлетворению указанных требований и оптимизации ремонта за счет снижения трудоемкости и себестоимости, а также улучшения ряда характеристик изделия после выполнения ремонта. Это, в свою очередь, позволяет повысить уровень надежности продукции в соответствии с согласованными запросами заказчика, в частности, ОАО «РЖД».

В этом разделе рассматриваются основные факторы повышения технологической готовности производства, что является необходимым условием для поддержания и повышения надежности ТПС при ремонте и эксплуатации (рисунок 1.6, пп. 1–7, рисунок 1.7, пп. 9–12).

1. Анализ текущего состояния технологической готовности:

– оценка существующей производственной базы: проведение комплексного анализа имеющихся производственных мощностей, оборудования и технологий

для выявления их текущей производительности и пригодности для внедрения новых видов продукции;

– идентификация узких мест: выявление и устранение слабых звеньев в существующих производственных процессах, которые могут мешать эффективному внедрению новых технологий и продуктов.

2. Внедрение передовых технологий:

– автоматизация производственно-технологических процессов: внедрение систем автоматизации и роботизации для улучшения качества продукции, повышения скорости производства и снижения человеческого фактора.

3. Развитие человеческих ресурсов:

– обучение и переподготовка персонала: регулярные тренинги, повышение квалификации и переподготовка сотрудников. Особое внимание следует уделять новым технологиям и методам работы, чтобы сотрудники были готовы к использованию новейшего оборудования и программного обеспечения;

– создание кадрового резерва: формирование группы специалистов различного профиля и квалификации, готовых к быстрому включению в работу при необходимости;

– мотивация и стимулирование инноваций: создание системы поощрений и мотивации для сотрудников, направленной на стимулирование их участия в процессе внедрения новых технологий и повышения качества продукции. Важно учесть, что эффективность кадрового резерва напрямую зависит от их постоянного обучения и повышения квалификации.

4. Интеграция системы управления качеством в соответствии с требованиями ISO 9001 [160]: внедрение международных стандартов управления качеством.

5. Разработка инновационных ТП ремонта.

6. Трансфер технологий:

– налаживание связей с университетами и научными организациями с целью проведения совместных научных изысканий и создания инновационных технологий;

– установление коллаборации с компаниями-производителями оборудования и компонентов для обмена профессиональным опытом и интеграции современных технологических решений.

7. Разработка системы предиктивного обслуживания:

– внедрение систем мониторинга состояния оборудования и компонентов в реальном времени для своевременного выявления потенциальных неисправностей;

– применение методов обработки *Big Data* и технологий машинного обучения с целью предсказания возможных отказов оборудования и организации предиктивного обслуживания. Такой подход способствует сокращению простоев и повышению общей надежности системы (рисунок 1.6, пп. 1–7).

Рисунок 1.6 — Основные факторы повышения технологической готовности производства (пп. 1–7)

8. Совершенствование системы управления качеством. Внедрение стандартов качества: применение международных стандартов, таких как ISO [160], для формирования единой системы управления качеством. Это позволит стандартизировать производственно-технологические процессы и повысить надежность продукции.

9. Научно-исследовательская и опытно-конструкторская деятельность (*Research and Development* (*R&D*). Современные материалы и технологии: разработка и использование новых материалов, а также усовершенствованных методик, направленных на повышение эксплуатационных качеств и увеличение срока службы ТПС.

10. Сокращение издержек и повышение эффективности производственно-технологических процессов:

– применение подходов принципов бережливого производства (*Lean*): реализация концепции минимизации потерь на всех этапах производства для повышения общей продуктивности и эффективности использования ресурсов;

– оптимизация управленческих и логистических процессов: совершенствование внутренних операций компании и улучшение логистических цепочек с целью ускорения доставки материалов, обеспечения стабильного снабжения и сокращения продолжительности производственного цикла.

11. Информационные технологии и цифровизация:

– применение методов цифровизации, в том числе промышленный интернет вещей *IIoT* (интеллектуальные датчики) и технологии анализа больших данных, для более высокой эффективности контроля и управления производственными процессами;

– интеграция передовых систем для координации, мониторинга и оптимизации всех этапов производства, а также повышения качества планирования и контроля операций.

12. Работа с данными и их аналитическая обработка:

– применение методов работы с большими массивами данных для прогнозирования возможных сбоев, выявления причин неисправностей и совершенствования производственно-технологических процессов.

– применение машинного обучения и искусственного интеллекта для автоматического выявления аномалий, рекомендаций по ТОиР и улучшению качества продукции (рисунок 1.7, пп. 8–12).

Рисунок 1.7 — Основные факторы повышения технологической готовности производства (пп. 8–12)

Внедрение современных технологий, модернизация оборудования, обучение персонала и развитие систем управления качеством необходимы для эффективного ТОиР ТПС. Интеграция данного комплекса мер в единую архитектуру ремонта позволит значительно повысить надёжность и увеличить срок службы ТПС, а также улучшить его эксплуатационные характеристики.

Утверждать, что потребность в комплексе мер отсутствует при соблюдении всех требований рабочей КД, поддержании надлежащего уровня знаний и управлении качеством ремонта, удовлетворяющего заказчика, было бы некорректно. Потребность в инновациях может проявляться в различных обстоятельствах: она может стать очевидной в случае выявления проблем или недостатков, возникнуть в ответ на требования заказчика, касающиеся повышения стандартов качества ремонта, а также в связи с ужесточением норм и правил, установленных действующими ГОСТ или заводом-изготовителем. Кроме того, при анализе текущих процессов может быть обнаружена возможность их оптимизации через внедрение новых технологий, что потенциально может значительно ускорить, удешевить и упростить выполнение ремонтных работ. Успешная реализация этих мер не только повысит качество ремонта и надежность ТПС, но и увеличит общую эффективность сервисного предприятия, что способствует

устойчивому развитию и повышению конкурентоспособности в современных условиях.

В данном контексте экономические интересы занимают центральное место в процессе принятия решений. Например, в ситуации, когда повышение надежности тягового электродвигателя (ТЭД) в два раза сопряжено с увеличением его стоимости в пять раз, для таких организаций, как ОАО «РЖД», может оказаться более целесообразным приобретение нового ТЭД и его замена на половине существующего ресурса, чем осуществление дорогостоящего ремонта. Таким образом, как уже было упомянуто, ключевое значение имеет не только техническая сторона рассматриваемого вопроса, но и экономический аспект, который должен быть учтен при проведении соответствующей работы.

1.2.2 Конструкторская подготовка производства участка ультразвукового контроля стержня люлечного подвешивания локомотивов

Конструкторская подготовка ремонтного производства при освоении ремонта ТПС представляет собой комплекс мероприятий, направленных на разработку ремонтной КД, которая является необходимой и достаточной для технического обеспечения восстановления эксплуатационного ресурса объекта ремонта (контроля) и обеспечения его функционирования в межремонтный период. Разработанные ремонтные документы устанавливают виды (методы) НК деталей и узлов ТПС во время ремонта, а также формулируют и другие требования к ремонтируемым деталям и узлам ТПС, а руководство по ремонту содержит перечень деталей и узлов, подвергающихся контролю.

Одним из наиболее эффективных видов (методов) НК является УЗК, позволяющий выявлять внутренние дефекты в материалах без их разрушения. На участке УЗК для стержня люлечного подвешивания локомотивов серии ВЛ80 необходимо провести тщательную конструкторскую подготовку, которая является сложной и многогранной задачей. Она требует тщательного планирования, современного оборудования, квалифицированного персонала и строгого

соблюдения норм безопасности. Только при выполнении всех этих условий можно гарантировать высокую надежность и безопасность эксплуатации подвижного состава. Ниже представлен подробный процесс подготовки с описанием каждого этапа:

1. Получение объекта ремонта: определение типовых характеристик стержня люлечного подвешивания, а также его состояния для диагностики; подготовка рабочего места для приемки объекта.

2. Получение комплекта документации:

– руководство по эксплуатации (получение и изучение документации, содержащей рекомендации по эксплуатации узла) для понимания режимов работы и возможных проблем;

– ТУ на изделие;

– КД завода изготовителя (изучение чертежей, схем и пр.).

На втором этапе, опираясь на КД завода изготовителя, осуществляется разработка ремонтной документации (РД), которая включает в себя ремонтные чертежи, руководства по ремонту, а также конструкторские чертежи для ремонтной оснастки, приспособлений, специализированного инструмента и прочее. На основании созданной РД и КД формируется ТД.

3. Разработка ремонтного руководства и ремонтных чертежей (на основании изученной документации завода изготовителя разрабатываются руководство по ремонту и ремонтные чертежи).

Этапы конструкторской подготовки должны быть строго регламентированы и документированы в соответствии с требованиями Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) [161, 162]. В ходе процесса важно обеспечить обратную связь между всеми участниками – от инженеров до контролёров – для достижения максимально эффективных результатов и обеспечения безопасности эксплуатации стержня люлечного подвешивания. Всю документацию следует хранить, структурируя её для быстрого доступа в будущем для возникновения ситуации, требующей повторного анализа и контроля.

1.2.3 Организационная подготовка производства

Охватывает целый комплекс процессов и действий, направленных на эффективно организованный производственный процесс.

Рассмотрим ключевые шаги подготовки предприятия к организации производства:

1. Отдельное внимание уделяется взаимодействию между подразделениями, что способствует рациональному использованию ресурсов. Проводится оценка необходимых площадей и оборудования для выпуска новой продукции, разрабатываются планировочные решения для цехов и участков с целью оптимизации их работы, а также проектируются изменения существующих помещений для приведения их в соответствие с новыми задачами. Кроме того, совершенствуется система оперативного планирования производства, чтобы обеспечить более эффективное выполнение операций, что способствует более точному расчёту и выполнению производственных задач).

2. Разработка проекта технологического обслуживания основного производства: этот этап сосредоточен на проектировании и оптимизации внутреннего транспортного потока, что включает составление планов движения предметов труда, так как от этого зависит бесперебойность производства, формирование эффективных систем контроля новой продукции для обеспечения её качества.

3. Разработка организации и оплаты труда: на этом этапе акцент ставится на проектирование рационального разделения и кооперации труда, которое включает определение оптимальных смешанных и единичных режимов труда, что позволяет повысить продуктивность, выбор и обоснование системы оплаты труда и премирования, мотивируя сотрудников на качественное выполнение своих задач.

4. Организация материально-технического обеспечения производства предусматривает анализ потребности в материальных ресурсах и составление

заявок на необходимое оборудование и материалы, выбор надёжных поставщиков и формирование с ними крепких договорных отношений для гарантии бесперебойных поставок, установление связи с потребителями для понимания их потребностей и планирования необходимого объёма производства.

5. Создание нормативной базы для внутризаводского планирования, которая включает в себя:

– расчёт необходимых трудовых, материальных и календарных норм (это критически важно для формирования себестоимости новой продукции, что позволяет оценить её конкурентоспособность на рынке;

– определения размеров нормативов запасов и оборотных средств, что влияет на финансовую устойчивость предприятия.

Организационная подготовка производства играет важнейшую роль в минимизации затрат, повышении эффективности производственно-технологических процессов и улучшении качества продукции. Она позволяет интегрировать все элементы системы управления для достижения оптимального результата.

1.2.4 Сравнительный анализ основных этапов ремонта (создания) опытного образца и получения допуска на эксплуатацию в соответствии с установленными требованиями

Проведём сравнительный анализ основных этапов ремонта (создания) опытного образца и получения допуска на эксплуатацию в соответствии с международным стандартом EN 50126[1] и российскими стандартами ОСТ 32.181[2], ГОСТ 15301[3] и ГОСТ 15902[4] (таблица 1.5).

1 EN 50126: "Жизненный цикл надежности, готовности, ремонтопригодности и безопасности железнодорожной техники"

2 ОСТ 32.181: " Система разработки и постановки продукции на производство. Порядок заказа, разработки, постановки на производство, проведения испытаний и утилизации железнодорожной техники"

3 ГОСТ Р 15301: " «Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство»"

4 ГОСТ 15902: " Система разработки и постановки продукции на производство. Железнодорожный подвижной состав. Порядок разработки и постановки на производство"

Таблица 1.5 – Сравнительный анализ основных этапов

Этапы/Стандарты	EN 50126	ОСТ 32.181	ГОСТ 15301	ГОСТ 15902
Концепция и ТЗ	Концепция и определение системы	Разработка ТЗ	Разработка ТЗ	Определение требований
Анализ исходных данных	Системные требования и спецификация	Сбор и анализ исходных данных	Проектирование	Проектирование и разработка
Проектирование	Архитектурная разработка и проектирование	Проектирование процесса	Изготовление опытного образца	Изготовление опытного образца
Производство	Производство и внедрение	Изготовление опытного образца	Испытания опытного образца	Испытания на надежность
Испытания и валидация	Проверка и валидация	Испытания и доводка	Приёмка продукции	Анализ результатов и корректировка
Внедрение и эксплуатация	Эксплуатация и техническое обслуживание	Внедрение и серийное производство	—	Серийное производство и эксплуатация
Выведение из эксплуатации	Выведение из эксплуатации и утилизация	—	—	—

Ключевые стадии процесса можно представить следующим образом.

1. Формирование концепции и определение структуры системы: на данном этапе разрабатывается концептуальная модель системы и согласовываются её основные подходы и принципы.

2. Определение требований и создание спецификации: осуществляется разработка перечня требований к системе и составляется её детализированная спецификация, описывающая функциональные и технические характеристики.

3. Архитектурная разработка системы: разработка архитектуры системы.

4. Системный проект и разработка: детальное проектирование и разработка системы.

5. Производство и внедрение: производство компонентов и интеграция системы.

6. Проверка и валидация: проверка соответствия системы установленным требованиям и тестирование.

7. Эксплуатация и техническое обслуживание: эксплуатация системы и обслуживание в ходе жизненного цикла.

8. Выведение из эксплуатации и утилизация: процедуры для безопасного выведения из эксплуатации и утилизации системы.

Стандарт EN 50126 [163] охватывает управление полным ЖЦ железнодорожных систем, акцентируя внимание на надежности, готовности, ремонтопригодности и безопасности (*Risk Assessment Method* (*RAMS*).

ОСТ 32.181 [164] определяет базовые принципы проектирования ТП, которые играют ключевую роль в эффективной разработке и внедрении новых продуктов. Алгоритм включает несколько ключевых этапов, начиная с разработки технического задания, где формулируются цели и задачи проекта. На следующем этапе происходят сбор и анализ исходных данных, что предоставляет необходимую информацию для разработки процесса. Затем проводится само проектирование, в рамках которого разрабатывается ТП и выбирается соответствующее оборудование.

После теоретического этапа наступает практический: осуществляется изготовление опытного образца, что позволяет протестировать концепцию на практике. Испытания и последующая доводка дают возможность оценить эффективность разработанного процесса, выявить возможные недостатки и внести корректировки. Наконец, успешное завершение всех предыдущих этапов ведёт к внедрению оптимизированного процесса в серийное производство, что знаменует собой финальную стадию проектирования.

Таким образом, последовательное выполнение этих этапов обеспечивает высокое качество и эффективность проектируемых ТП, что, в свою очередь, способствует успешной реализации производственных задач.

ГОСТ 15301 устанавливает общие технические условия и правила приёмки продукции [165]. Этапы включают.

1. Разработка технического задания (ТЗ): определение требований к продукции.

2. Проектирование и разработка: проектирование продукции с учётом требований ТЗ.

3. Создание прототипа: разработка и производство экспериментального образца для проведения проверок.

4. Тестирование прототипа: выполнение испытаний, направленных на подтверждение соответствия установленным требованиям.

5. Передача продукции: подготовка документов для приёмки и утверждения изделия, после чего оно допускается к эксплуатации.

Стандарт регулирует общие технические условия и правила приёмки продукции, описывая ключевые этапы процесса. Сначала разрабатывается техническое задание, в котором определяются требования к продукции. Затем осуществляется проектирование с учётом этих требований, после чего изготавливается опытный образец для испытаний. Далее проводятся испытания для проверки соответствия продукции установленным требованиям. В финале осуществляется приёмка продукции с оформлением соответствующей документации и допуском к эксплуатации.

ГОСТ 33943–2016 [166] устанавливает общие требования к надежности продукции. Основные этапы включают.

1. Формирование требований к надежности продукции.

2. Проектирование и разработка продукции с учётом требований по надежности.

3. Изготовление опытного образца продукции.

4. Проведение испытаний для проверки надежности.

5. Анализ результатов испытаний и внесение необходимых изменений.

6. Внедрение продукции в серийное производство и обеспечение её эксплуатации на протяжении жизненного цикла.

Стандарт устанавливает важные общие требования к надежности продукции, охватывая ключевые этапы процесса от определения требований до серийного производства. На первом этапе формулируются конкретные требования к надежности, что служит основой для дальнейшей работы. Затем происходят проектирование и разработка продукции с учётом этих требований. После этого

изготавливается опытный образец, который проходит испытания на надежность для проверки соответствия установленным требованиям. Результаты испытаний анализируются, и при необходимости вносятся корректировки в проект. Завершающим этапом является внедрение продукции в серийное производство и обеспечение её эксплуатации в течение всего жизненного цикла, что обеспечивает выполнение обещанных характеристик надежности.

Сравнительный анализ этапов ремонта (создания) опытного образца и получения допуска на эксплуатацию, основанный на международном стандарте EN 50126 и российских стандартах ОСТ 32.181, ГОСТ 15301 и ГОСТ 15902, позволяет выделить общие и отличительные черты в этих процессах.

Во-первых, общее внимание к. Все рассматриваемые стандарты акцентируют внимание на необходимости управления полным жизненным циклом изделий и систем. Стандарт EN 50126 определяет этапы от концепции до утилизации, акцентируя внимание на надежности, готовности, ремонтопригодности и безопасности. В то время как российские стандарты, такие как ОСТ 32.181 и ГОСТ 15902, акцентируют внимание на проектировании, надежности и испытаниях на различных стадиях разработки и производства.

Во-вторых, схожесть в основных этапах. Все стандарты включают этапы, связанные с разработкой технического задания, проектированием, изготовлением опытного образца, проведением испытаний и финальной приёмкой или валидацией продукции. Это подчёркивает значимость тщательной подготовительной работы и проверки на всех стадиях, что в итоге обеспечивает высокое качество и надежность конечного продукта.

В-третьих, акцент на испытаниях и валидации. Все стандарты подчёркивают важность проведения испытаний на соответствие установленным требованиям. Результаты этих испытаний являются критически важными для определения готовности изделия к эксплуатации. В рамках EN 50126 проводятся проверка и валидация, тогда как в российской практике также предусмотрены испытания на надежность согласно ГОСТ 15902.

Однако имеются и различия в подходах и акцентах.

1. Стандарт EN 50126 ориентирован на железнодорожные системы и их особенности, что требует более комплексного подхода к управлению надёжностью на этапе эксплуатации и технического обслуживания.

2. Российские стандарты, в частности ГОСТ 15301 и ГОСТ 15902, более акцентированы на технических условиях и приёмке конкретных изделий, что может быть менее гибким в сравнении с международными практиками, направленными на системный подход и долгосрочную эксплуатацию.

Таким образом, интеграция опыта и подходов, описанных в стандартах EN 50126 и российских ГОСТах, может способствовать более эффективному управлению процессами в области надежности и безопасности как железнодорожного, так и другого высокотехнологичного оборудования.

1.2.5 Производство промышленных продуктов с использованием технологий цифрового моделирования

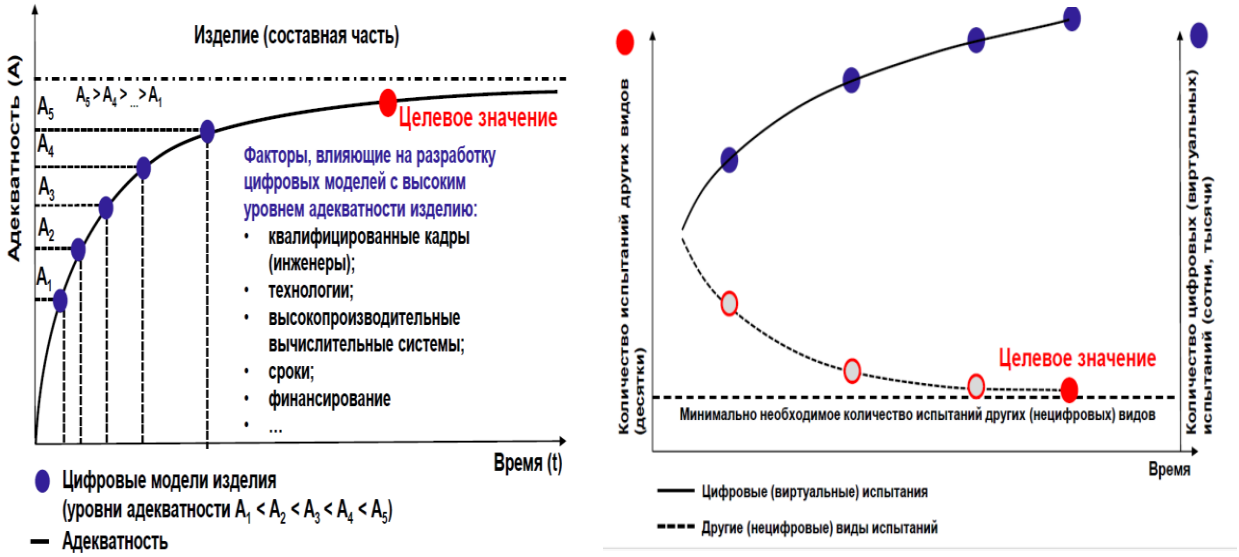
ЦД изделия представляет собой систему, которая включает в себя цифровую модель данного изделия, а также двусторонние информационные связи с самим изделием или его компонентами, при условии наличия физического прототипа [167]. Концепция применения ЦД при ремонте является частью четвёртой промышленной революции и призвана помочь предприятиям быстрее обнаруживать физические проблемы, точнее предсказывать их результаты и производить более качественный ремонт. Технология ЦД относится к одному из важнейших трендов цифровых трансформаций производства, который характерен для мировой и отечественной сферы информационно-коммуникационных технологий производства. Технология ЦД считается ключевой сквозной для умного производства (Smart Manufacturing). В январе 2021 года специалисты Центра НТИ СПбПУ совместно с РФЯЦ-ВНИИЭФ представили для публичного обсуждения проект первой редакции национального стандарта .

Для оптимизации процесса создания и управления этими ЦД важную роль играют цифровые платформы. Цифровые платформы представляют собой интегрированные среды, которые позволяют собирать, хранить, обрабатывать и анализировать данные, получаемые от различных источников, включая реальные изделия, системы сенсоров и другие ИТ-решения. Эти платформы обеспечивают необходимую инфраструктуру для разработки, тестирования и внедрения ЦД, что способствует универсализации и стандартизации подходов к моделированию, а также дает возможность исследовательским и промышленным организациям эффективно управлять жизненным циклом изделий.

Цифровые платформы также играют ключевую роль в объединении междисциплинарных знаний и ресурсов. Они позволяют различным участникам, включая инженеров, аналитиков и проектировщиков, сотрудничать в режиме реального времени, что значительно ускоряет процессы разработки и внедрения новых технологий. В результате, использование цифровых платформ способствует повышению качества и надежности ЦД, улучшая их функциональные характеристики и адаптивность к изменениям в условиях эксплуатации.

Проектирование сложных и высокотехнологичных продуктов с использованием цифровых платформ требует тонкого балансирования множества взаимосвязанных параметров. Однако управление тысячами показателей зачастую выходит за рамки человеческой интуиции и аналитических возможностей даже самых опытных инженеров. Проведение цифровых (виртуальных) испытаний позволяет определить параметры в пределах заданных интервалов, что открывает пространство для глубокого комплексного мониторинга и анализа взаимного влияния этих характеристик. Такой подход формирует базу для разработки нескольких версий конструкции, которые могут различаться с точки зрения экономической эффективности, технологий производства или используемых материалов, что в итоге позволяет выстроить гибкую стратегию вывода на рынок инновационной продукции.

В ходе цифровых виртуальных испытаний определяются количественные и (или) качественные характеристики свойств объекта испытаний как результата исследования свойств цифровой модели данного объекта. При этом важно обеспечить высокую адекватность модели – соответствие модели моделируемому изделию (или процессу) по обоснованному перечню характеристик. На степень адекватности цифровой модели влияют внешние воздействующие факторы, такие как квалифицированность задействованного инженерно-технического персонала, производительность вычислительных систем, сроки реализации проектов, финансирование и др. (рисунок 1.8, *а*, *б*).



а) *б*)

Для разработки цифрового двойника создаётся многоуровневая система требований, которая позволяет проверять значение показателей, необходимых для удовлетворения требований к изделию, установленным диапазоном значений, а также анализировать их взаимное влияние. Достижение требований достигается проведением цифровых (виртуальных) испытаний. При этом достигается:
а) высокая степень соответствия модели — точное отражение моделируемого изделия на основе обоснованного набора характеристик; б) уменьшение количества испытаний благодаря проведению необходимого числа цифровых (виртуальных) тестов

Рисунок 1.8 — Характеристики, задающие уровень адекватности цифровой модели

Использование ЦД и цифровых платформ позволяет заменить дорогое оборудование для стендовых испытаний, требуемое на этапе проверки и подтверждения экспериментального прототипа изделия.

Ремонт (изготовление) новых изделий и продуктов для железнодорожного транспорта определено ГОСТ 15.902–2014 [168]. Стандарт распространяется на

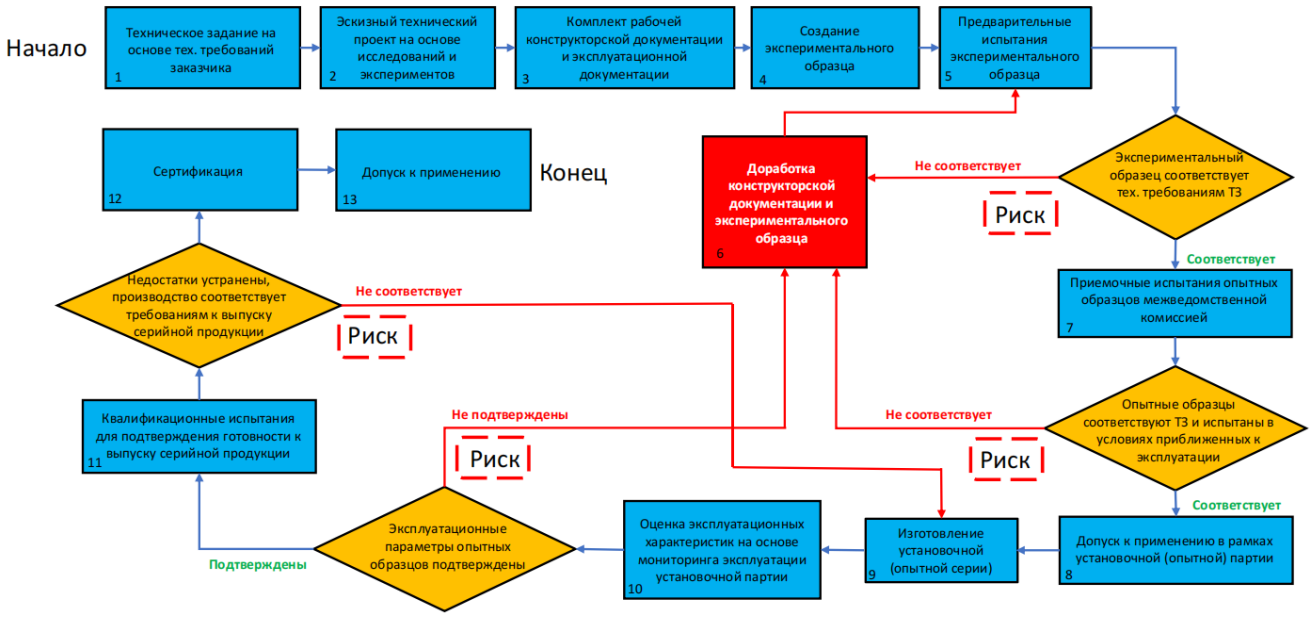
этапы работ по постановке продукции на производство на стадиях жизненного цикла подвижного состава, формирует исходные требования для разработки изделия.

В процессе производства изделия в соответствии с традиционной схемой, установленной ГОСТ 15.902–2014, предусматриваются такие стадии (рисунок 1.9):

– разработка технических требований к изделию и выполнение эскизного проекта на основе результатов научных исследований и экспериментов;

– разработка КД на опытное изделие; изготовление опытного образца изделия; проведение предварительных испытаний для оценки соответствия опытного изделия техническим требованиям ТЗ и готовности образца к проведению приёмочных испытаний;

– проведение приёмочных испытаний для разрешения выпуска установочной серии; подконтрольная эксплуатация опытных образцов для оценки эксплуатационных параметров; квалификационные испытания для подтверждения готовности производства к серийному выпуску продукции; сертификация или лицензирование продукта.



При несоответствии экспериментальных образцов требованиям ТЗ и ГОСТ реализуются риски и этапы: 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 повторяются, что увеличивает временной цикл постановки на производство

Рисунок 1.9 – Классическая модель постановки на производство в соответствии с ГОСТ 15.902–2014

Современное развитие ЦД тесно связано с концепцией «Жизненного цикла продукта». В то время как начальные требования, указанные в техническом задании, обычно ограничиваются несколькими значениями, на этапах производства их число может исчисляться десятками, а иногда и тысячами. Именно это количество определяет уровень детализации характеристик ремонтируемого изделия, а также степень контроля над формированием его финального облика. Данная модель обеспечивает создание продукта, полностью отвечающего запросам потребителя, с проверкой на соответствие заявленным характеристикам, подтверждённым результатами опытной эксплуатации изделия благодаря многократному проведению испытаний опытных образцов.

Однако следует отметить, что изделие или продукт, изготавливаемый по ГОСТ 15.902–2014 на этапах верификации и валидация изделия, подвержен значительным рискам, связанным с недостаточным анализом свойств конечного продукта, что приводит к необходимости проведения дополнительных ОКР и возврату к начальной стадии изготовления продукта. Тем самым постановка на производство продукта по существующей модели в случае разработки высокотехнологичного сложного изделия сопряжено со значительными сложностями и не определено по времени.

Решением данной проблемы является применение цифрового (умного) проектирования, которое позволяет за счёт исследования цифровых моделей реальных или изготавливаемых объектов получить опытный образец, удовлетворяющий требованиям ТЗ и дополнительно проверенный по широкому спектру характеристик и свойств в ходе проведенных цифровых (виртуальных) испытаний на цифровых испытательных стендах и цифровом полигоне.

В качестве примера подготовки производства с использованием ЦД рассмотрен проект разработки и постановки на производство Уральским дизельным моторным заводом газопоршневого двигателя ГПД-185 в кооперации с партнёром по НИОКР – Южно-Уральским государственным университетом, г.

Челябинск. В рамках проекта был проведён комплекс работ по цифровому моделированию будущего газопоршневого двигателя ГПД-185.

Центром компетенций НТИ СПбПУ в период с 2014 по настоящее время успешно реализуется применение технологии ЦД промышленных изделий и процессов с использованием цифровой платформы *CML-Bench* на предприятиях российской промышленности.

Применение технологии ЦД на стадии разработки и изготовления изделия позволяет исключить ошибки в проектировании и обеспечить изготовление уникального продукта с нужными потребителю характеристиками и свойствами, а также сократить время выхода на рынок разработанного продукта.

Развитие и рациональное использование возможностей производственных предприятий невозможно в полной мере без использования инструментов цифровизации и автоматизации проектирования.

Создание ЦД изделий как промежуточная технология создания «умного» цифрового производства востребована для промышленных предприятий России. В настоящее время для её реализации имеется и наращивается нормативная база, совершенствуются программное обеспечение и инструменты автоматизации и инжиниринга.

С развитием технологий цифровизации и автоматизации производственно-технологических процессов становятся возможными более точные и эффективные методы ТПП. Это включает: использование систем автоматизированного управления производством (ERP, MES-системы); применение ЦД для моделирования и оптимизации ТП. ЦД представляют собой мощный инструмент для управления производственными процессами и эффективного использования ресурсов (таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Различия в требованиях к постановке продукции ремонтной продукции

Постановка ТПС в соответствии с требованиями ГОСТ Р 15.201–2000 [169]	Постановка ТПС с использованием ЦД в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57700.37–2021 [170]
В ходе НИОКР выполняются мероприятия, направленные на создание нового	Выполняется разработка ЦД – цифровая модель физического объекта или процесса с потоками

Постановка ТПС в соответствии с требованиями ГОСТ Р 15.201–2000 [169]	Постановка ТПС с использованием ЦД в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57700.37–2021 [170]
продукта, отвечающего заявленным техническим требованиям. При НИОКР выполняется проектирование, конструирование и тестирование прототипов и моделей перед началом производства. Стадии выполнения НИОКР включают: – разработку теоретической основы; – выполнение исследовательских мероприятий; – реализацию практической деятельности, связанной с разработкой новых образцов продукции (экспериментальная часть); – проведение опытных и экспериментальных испытаний для проверки создаваемого продукта По результатам НИОКР формируется комплект КД на изделие, по которому создается экспериментальный образец или ряд образцов, если рассматриваются несколько вариантов продукта	данных, обеспечивающими конвергенцию между физическими и виртуальными объектами ремонта. Виды ЦД бывают. 1. *DTP* (*Digital Twin Prototype*) – ЦД-прототип Представляет собой модель, описывающую объект, для которого он является прототипом. Включает в себя данные и характеристики, необходимые для разработки и создания физического аналога данного объекта. 2. *DTI* (*Digital Twin Instance*) – ЦД-экземпляр Предназначен для описания конкретного физического объекта и сохраняет связь с ним на протяжении всего жизненного цикла 3. *DTA* (*Digital Twin Aggregate*) – агрегированный ЦД. Является вычислительной системой, обеспечивающей доступ ко всем доступным двойникам-экземплярам. Объединяет в себе данные как ЦД, так и их прототипов. Позволяет собирать данные и обмениваться ими. ЦД представляет экспериментальный образец в цифровом виде, обладающая теми же характеристиками, что и физический прототип
Создание экспериментального образца	Не требуется при наличии ЦД
Проведение предварительных испытаний экспериментального образца для оценки контроля качества результатов, полученных на этапах ОКР и соответствие образцов техническим требованиям. Испытательный процесс организован в соответствии с программами и методиками испытаний	ГОСТ 16504 [171] идентифицирует 46 видов испытаний, которые выполняются в соответствии с разработанной программой и методикой
Доработка КД и экспериментального образца	Изменения при необходимости вносятся в цифровую модель, исключая необходимость изменения экспериментального образца
Проведение приемочных испытаний экспериментального образца для оценки контроля качества результатов, полученных на этапах ОКР и соответствие образцов техническим требованиям. Испытания выполняются по	Выполняются цифровые (виртуальные) испытания для подтверждения количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата исследования свойств ЦД. Испытания выполняются по разработанной программе и методике испытаний

Постановка ТПС в соответствии с требованиями ГОСТ Р 15.201–2000 [169]	Постановка ТПС с использованием ЦД в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57700.37–2021 [170]
разработанной программе и методике испытаний	
Доработка КД и опытного образца	Изменения при необходимости вносятся в цифровую модель, исключая необходимость изменения экспериментального образца
При необходимости после проведения приемочных испытаний выполняется сертификация продукции	При необходимости после проведения приемочных испытаний выполняется сертификация продукции
Подтверждение эксплуатационными испытаниями качества продукции	Подтверждение эксплуатационными испытаниями качества продукции
Корректировка КД на основе данных, полученных в процессе опытной эксплуатации	Внесение изменений в цифровую модель и КД на основании результатов, полученных в ходе опытной эксплуатации
Проведение квалификационных испытаний для подтверждения готовности производства к выпуску серийной продукции	Выполняются цифровые (виртуальные) испытания для подтверждения количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата исследования свойств ЦД
Как результат, сокращается период времени постановки продукции на производство за счет сокращения экспериментальных вариантов продукции, количества испытаний	

Внедрение концепций Индустрии 4.0 и *IIoT* для повышения взаимодействия и синхронизации всех элементов производства позволяет лучше прогнозировать возможные проблемы, оперативно реагировать на изменения и повышать общую эффективность производственной деятельности.

1.2.6 Цифровые двойники и цифровая сертификация изделий высокотехнологичной промышленности

7 ноября 2023 года Председатель Правительства Российской Федерации Михаил Мишустин подписал распоряжение № 3113-р «О цифровой трансформации обрабатывающих отраслей» (Распоряжение) [172]. Документ направлен на обновление существующих и утверждение новых стратегических направлений цифровой трансформации ключевых отраслей экономики с горизонтом планирования до 2030 года. В задачах Распоряжения заложены: рост производительности труда, увеличение доли ВВП в производственных секторах,

повышение уровня жизни населения через достижение цифровой зрелости, оптимизацию бизнес-процессов и развитие управленческих механизмов. Также документ предусматривает устойчивость производственно-технологических процессов и непрерывность их управления за счет внедрения преимущественно российских технологий, программного обеспечения и доверенных программно-аппаратных средств.

Эти бизнес-процессы основаны на применении (*Model Based Engineering* (*MBSE*) подхода [173], системного проектирования на основе моделей при разработке изделий в различных отраслях промышленности с использованием «Цифрового макета» (*Digital Mock Up*) [174] и использования программных решений для управления информацией о продукте (*Product Data Management, PDM*) [175] и контроля жизненного цикла изделия (*Product Lifecycle Management, PLM*) [176].

Модельно-ориентированная системная инженерия (*MBSE*) – это подход к системной инженерии, который использует модели для предоставления различных аспектов системы, а именно описания поведения, функций и физических характеристик системы. В *MBSE* система разрабатывается с использованием компьютерных, математических моделей и симуляций. Эти модели создаются с использованием программных инструментов, которые позволяют имитировать и анализировать поведение системы. Модели создаются автономными, что означает возможность их повторного использования и обновления по мере необходимости на протяжении всего процесса разработки.

Модельно-ориентированная системная инженерия включает в себя структурированную структуру для разработки системы на протяжении её ЖЦ. Данная структура предусматривает.

1. Исследование требований – выявление потребностей заинтересованных сторон и их последующее преобразование в системные требования, которые оформляются в виде технического задания на проектирование.

2. Разработку модели – разработка цифровой модели с использованием программных инструментов для моделирования и анализа поведения системы.

3. Системную интеграцию – интеграция созданной модели в более крупную системную модель для имитации поведения и анализа поведения системы в целом.

4. Проверку и подтверждение – проведение тестирования модели системы для обеспечения ее соответствия установленным системным требованиям.

5. Введение системы в эксплуатацию – практическая реализация системы с объединением программных и аппаратных элементов.

Идея создания ЦД впервые была представлена в 2002 году Майклом Гривзом, ученым из Мичиганского университета, и детально описана в его работе «Происхождение цифровых двойников» [177]. По его взгляду, «в оптимальных условиях ЦД способен предоставить всю ту информацию, которую можно было бы получить непосредственно от физического объекта».

Сегодня под понятием ЦД подразумевается виртуальная модель реального объекта или процесса, которая используется для повышения эффективности работы предприятий. Эта концепция стала ключевым элементом Четвертой промышленной революции, предоставляя компаниям возможность оперативно находить проблемы на физическом уровне, более точно прогнозировать результаты своей деятельности и выпускать продукцию высокого качества.

ЦД рассматриваются как одна из ключевых технологий, лежащих в основе концепции «Умного производства» (*Smart Manufacturing*) [178]. Однако современные информационно-производственные системы (ИПС), используемые на машиностроительных предприятиях, не обладают необходимым функционалом для их полноценного внедрения в ТПП и управления изготовлением продукции. Кроме того, такие системы оказываются недостаточно эффективными для анализа и оптимизации потоков материалов на этапе производственных операций.

Главной особенностью этапов жизненного цикла производственно-технологических систем (ПС) по сравнению с этапами ЖЦ ТПС является их подверженность функциональным и структурным модификациям. Это связано с

необходимостью проводить техническое перевооружение при смене номенклатуры производимой продукции, а также с задачей повышения эффективности оборудования и сокращения времени производственного цикла. Такие изменения приводят к формированию обновлённых конфигураций информационно-производственных систем.

Цель цифровизации производственно-технологических процессов становится обеспечение прозрачности всех этапов производства и возможность оперативного контроля над текущими изменениями. Это дает возможность на основе ЦД многокритериальной оптимизации эффективно управлять материальными потоками. Применение ЦД производства позволяет имитировать планируемые изменения, оценивать их потенциальные последствия и реализовывать улучшения на уровне производственных подразделений. Важной задачей при этом является получение обратной связи между ЦД процесса и его реальными характеристиками в режиме реального времени. Это требует анализа массивов *Big Data*, которые генерируются с использованием технологий индустриального *IIoT*.

Важным применением цифрового инжиниринга является создание экспериментально-цифровой платформы сертификации. Важно, что ключевым событием для возможности применения цифровой сертификации на основе цифрового инжиниринга стало утверждение национального стандарта ГОСТ Р 57700.37-2021 [179], а также включение термина «цифровая сертификация» в редакции Центра компетенций НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии» в распоряжение Правительства РФ № 3113-р от 07.11.2023 г. «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности, относящихся к сфере деятельности Министерства промышленности и торговли РФ» [180]. Распоряжение надо в список включить Данные документы стали частью необходимого нормативного базиса для проектирования и испытаний промышленных изделий для подтверждения необходимых требований.

«Цифровая сертификация» – бизнес-процесс, целью которого является прохождение с первого раза всего комплекса натурных, сертификационных, рейтинговых и прочих испытаний.

1.2.7 Моделирование и управление состоянием объектов ремонта в реальном времени. Цифровой двойник в неразрушающем контроле

Основные преимущества использования ЦД в НК.

1. Точное воспроизведение: ЦД обеспечивает полное соответствие реальному объекту, включая его форму, конструктивные элементы и физические характеристики. Это делает возможным проведение достоверных симуляций различных условий использования и воздействия окружающей среды.

2. Непрерывный мониторинг: благодаря внедрению сенсоров и технологий сбора данных, ЦД постоянно синхронизируется с реальным объектом, отображая его текущее состояние. Это позволяет оперативно выявлять отклонения и выявлять потенциальные риски.

3. Прогнозирование на основе данных: при помощи алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта ЦД способен предсказывать, как объект будет функционировать в будущем. Это дает возможность более точно оценивать риски и разрабатывать эффективные планы профилактики.

4. Оптимизация процессов НК: использование ЦД позволяет оптимизировать процессы НК, предотвращая излишние проверки и фокусируясь на наиболее критичных зонах.

5. Обучение и симуляция: ЦД предоставляют отличные возможности для обучения персонала и симуляции различных сценариев аварийных ситуаций без риска для реальных объектов.

6. Снижение затрат и рисков: технология ЦД позволяет значительно снизить расходы на техническое обслуживание и ремонт, а также минимизировать риски, связанные с физическим доступом к труднодоступным или опасным объектам.

ЦД представляет собой инновационный инструмент, который революционизирует подход к НК объектов и систем, обеспечивая ряд значительных преимуществ. Во-первых, реалистичное моделирование позволяет точно отражать текущее состояние объекта, что способствует детальному анализу различных сценариев эксплуатации и воздействия внешних факторов. Это обеспечивает более глубокое понимание поведения объекта в различных условиях.

Во-вторых, мониторинг в реальном времени через интеграцию сенсоров гарантирует, что информация о состоянии объекта всегда актуальна. Это, в свою очередь, позволяет оперативно выявлять аномалии и потенциальные проблемы, что увеличивает безопасность и надежность эксплуатации.

Кроме того, предсказательная аналитика на основе данных машинного обучения и искусственного интеллекта открывает новые горизонты для прогнозирования будущих состояний объектов. Это позволяет не только более точно планировать техническое обслуживание, но и внедрять профилактические меры, что существенно повышает общее качество обслуживания.

Использование ЦД также способствует оптимизации процессов НК, позволяя фокусироваться на наиболее критичных зонах, минимизируя излишние проверки. Это создаёт более эффективный подход к мониторингу и контролю объектов.

Ещё одним важным фактором является возможность обучения и симуляции. ЦД предоставляют уникальные возможности для подготовки персонала к различным сценариям, включая аварийные ситуации, без риска для реальных объектов и оборудования.

Наконец, снижение затрат и рисков является одним из главных преимуществ внедрения данной технологии. ЦД помогают существенно уменьшить расходы на техническое обслуживание и ремонт, а также минимизировать риски, особенно при работе с опасными или труднодоступными объектами.

Таким образом, ЦД в НК не только повышает эффективность контроля, но и становится стратегическим инструментом для управления состоянием объектов, повышая безопасность и сокращая затраты.

1.2.8 Интеграция данных в цифровом двойнике: создание динамической модели для эффективного неразрушающего контроля

Для расчета матрицы ЦД объекта ремонта в контексте УЗК необходимо учитывать ряд факторов. Ключевыми из них являются физические характеристики объекта, параметры ультразвуковых волн, а также динамика распространения этих волн в материале. Ниже представлен общий процесс расчёта и модельного представления.

1. Определение параметров объекта, во-первых, необходимо собрать информацию о физических характеристиках объекта:

– материал (например, сталь, алюминий и т. д.);

– геометрия объекта (длина, ширина, высота, форма);

– плотность материала *(\(\rho\))*;

– скорость звука в материале *(\(c\))*;

2. Параметры ультразвуковых волн:

– частота *(\(f\))*;

– амплитуда *(\(A\));*

– длина волны *(\(\lambda\))*, которая определяется как:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

3. Построение сетки (дискретизация). Для численного моделирования объект разделяется на мелкие элементы (ячейки), чтобы создать сетку *(mesh)*, где размер ячейки определяется по следующим критериям:

– размер ячейки должен быть значительно меньше длины волны *(\(\lambda\));*

– число ячеек должно обеспечивать высокое разрешение и точность моделирования.

4. Расчёт матрицы ЦД. Эта матрица может быть *2D* или *3D* в зависимости от сложности и требований исследования. Элементы матрицы содержат значения физических параметров, таких как плотность и скорость звука, для каждой ячейки сетки.

Рассмотрим матрицу ЦД *D* (*x*, *y*, *z*) для 3D-объекта. Пусть объект представляет собой прямоугольный параллелепипед с размерами *\(L_x \times L_y \times L_z\)*.

Матрица *D* (*x*, *y*, *z*) будет иметь размерности:

\[

\text{Размеры матрицы} = \left(\frac{L_x}{\Delta x}\right) \times \left(\frac{L_y}{\Delta y}\right) \times \left(\frac{L_z}{\Delta z}\right)

\],

где *\(\Delta x\)*, *\(\Delta y\)* и *\(\Delta z\)* – шаги дискретизации по соответствующим осям.

Элементы матрицы могут содержать значения плотности и скорости звука:

\[

D(x_i, y_j, z_k) = \begin{pmatrix}

*\rho(x_i, y_j, z_k) *

c(x_i, y_j, z_k)

\end{pmatrix}

\]

5. Моделирование распространения ультразвуковой волны. На следующем этапе проводится численное моделирование распространения ультразвуковой волны в объекте. Для этого используются методы численного решения волнового уравнения, такие как метод конечных разностей (*Fused Deposition Modeling* (*FDM*), метод конечных элементов (*Finite Element Method* (*FEM*) или метод пограничных

элементов (*Boundary Element Method* (*BEM*) [181–183]. Решение волнового уравнения в трехмерном пространстве имеет вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right),$$

где u – амплитуда ультразвуковой волны; c – скорость звука.

6. Анализ результатов. После моделирования данных полученные результаты анализируются для выявления дефектов, таких как трещины, пустоты и т. д. Анализ результатов можно провести с использованием визуализаций, таких как ультразвуковые С-сканы и В-сканы [184].

ЦД объекта ремонта в контексте УЗК – это мощный инструмент, который позволяет детально исследовать и анализировать поведение ультразвуковых волн в объекте. Точный расчет матрицы ЦД является ключевым этапом для достижения высокой точности и достоверности результатов контроля.

1.2.9 Сравнительный анализ концепции управления ремонтом тягового подвижного состава корпорациями транспортного машиностроения

Порядок постановки на производство продукции производственно-технического назначения в соответствии с требованиями ГОСТ 15.301. На всей продолжительности своей деятельности промышленные компании сталкиваются с задачей по ремонту (выпуску) нового продукта для обеспечения своей конкурентоспособности или улучшения существующей линейки продукции. Данная процедура четко регламентирована требованиями действующего в Российской Федерации национального стандарта ГОСТ 15.301 «Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки

продукции на производство» (ГОСТ 15.301). Порядок и последовательность внедрения изделия в процесс производства, установленные ГОСТ 15.301, не могут изменяться производственными компаниями и обязательны к выполнению при ремонте (выпуске) новой продукции.

Основные этапы постановки продукции на производство по ГОСТ 15.301 можно унифицировать для сравнения применения их требований для внутренних стандартов компаний транспортного машиностроения (ОАО «РЖД», АО «Синара Транспортные Машины», АО «Трансмашхолдинг» (Приложение) и представить в виде следующей этапности выполнения.

Этап 1 – разработка технического задания (ТЗ) на ОКР: на основе анализа маркетинга и патентных исследований формируются требования к созданию будущего продукта. По окончании этапа 1 утверждается ТЗ на ОКР, согласованное с Заказчиком продукта, с указанием требований к разрабатываемому продукту.

Этап 2 – НИР. Выполняются работы поискового, теоретического и экспериментального характера с целью определения технической возможности создания нового продукта в определенные сроки. По окончании этапа 2 на основе НИР утверждаются и передаются эскизный проект и технический проект нового продукта.

Этап 3 – создание проектной и производственной документации: на основе результатов проведённых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ подготавливается полный комплект документации, включающей проектные и технологические материалы, определяющие основные характеристики нового изделия. При необходимости разрабатываются эксплуатационные и ремонтные документы, в которых прописываются правила использования, технического обслуживания и ремонта продукции.

Этап 4 – производство прототипа изделия: с целью проверки соответствия составленной технической документации заданным требованиям и для выбора оптимального варианта (при наличии альтернативных решений) создаются опытные образцы. Эти экземпляры проходят стендовые и эксплуатационные

тестирования для подтверждения выполнения всех требований технического задания.

Этап 5 – предварительные испытания опытных образцов: проводятся с целью предварительной проверки и оценки степени соответствия опытного образца продукции требованиям ТЗ, определение окончательного объема изменений КД и доработки конструкции, а также определение дополнительных объемов испытаний. По результатам предварительных испытаний формируется протокол испытаний с подтверждением требований ТЗ и дорабатывается методика приемочных испытаний (уточняется объем испытаний). По выявленным несоответствиям дорабатываются КД и ТД. Разработанной КД и ТД после устранения замечаний, выявленных в ходе предварительных испытаний, присваивается литера «О» (ГОСТ 2.503–2023 [185]).

Этап 6 – проведение приемочных испытаний опытных образцов. Этап нацелен на окончательную проверку и подтверждение соответствия разработанного опытного образца установленным требованиям технического задания. На основании проведённых испытаний принимается решение о готовности результатов опытно-конструкторской работы (ОКР) для представления приемочной комиссии. По итогам испытаний составляются протокол приемочных испытаний и акт комиссии. В случае выявления несоответствий проводятся доработки КД и ТД. При положительном заключении приёмочной комиссии КД и ТД присваивается литера «$О_1$».

Этап 7 – сертификация продукции: положительные результаты приемочной комиссии являются основанием для проведения сертификационных испытаний, для подтверждения соответствия обязательным требованиям стандартов и технических регламентов (ТР) в аккредитованных государственных учреждениях. По результатам этапа производственным предприятием получается сертификат соответствия или свидетельство установленного образца, подтверждающие соответствие продукта необходимым требованиям.

Этап 8 – подготовка и организация производства (внедрение в производство). Этап включает выполнение мероприятий, направленных на подготовку производственных мощностей к изготовлению, ремонту или выпуску новой (модернизированной или модифицированной) продукции в установленных объёмах, которая соответствует требованиям КД. Подготовка производства предусматривает наличие положительных результатов ОКР, перечисленных в этапах 1–8, и дополнительные работы в части проработки цепочек поставок ТМЦ для изготовления новой продукции, обеспечение производства необходимым технологическим оборудованием, оснасткой и средствами измерительного контроля, аттестацию персонала.

Этап 9 – выпуск установочной партии. В процессе адаптации производства на основе КД осуществляется изготовление установочной партии продукции. Это позволяет подтвердить готовность производственных мощностей к выполнению ремонта или серийному выпуску изделий в соответствии с установленными требованиями и в запланированных объёмах (ГОСТ 2.103–2013 [186]). Выполнением этапа считается завершение ремонта (выпуска) количества опытных изделий, определенных приемочной комиссией. При этом каждая единица установочной серии продукции должна пройти приемо-сдаточные испытания (подтверждение соответствия требований КД при изготовлении) и период подконтрольной эксплуатации для подтверждения параметров эксплуатационной надежности.

Этап 10 – проведение квалификационных испытаний: осуществляется проверка путём тестирования установочной партии или первой серийно произведённой продукции. Основная цель данных испытаний – определить степень готовности предприятия к выполнению ремонта или выпуску изделий данного типа в запланированном объёме, в соответствии с требованиями ГОСТ 16504–81 [187]. Квалификационные испытания выполняются в соответствии с разработанной и согласованной с Заказчиком, программой и методикой квалификационных испытаний. Результаты квалификационных испытаний оформляются протоколом

испытаний, который передается квалификационной комиссии с остальными документами, подтверждающими успешное завершение предыдущих этапов ОКР и постановки продукции на производство.

Этап 11 – квалификационная комиссия: квалификационной комиссией проверяется соответствие ТП производства новой продукции требованиям серийного ремонта (выпуска) продукции в объемах, необходимых Заказчикам. Результаты квалификационной комиссии оформляются актом. После устранения недостатков, указанных в акте квалификационной комиссии, КД и ТД присваивается Литера «А», которая подтверждает постановку продукции на серийное производство.

Этап 12 – доработка конструкции на технологичность: отработка конструкции предусматривает выявление её недостатков конструкции и улучшение за счет изменения конструкции. При этом достигается снижение материалоемкости, себестоимости, трудоемкости для изготовления продукции. Результатом доработки продукции на технологичность является ремонт (выпуск) извещений об изменении конструкции серийного изделия, согласованного с Заказчиком.

Понимая важность и финансово-экономические риски от нарушения данных этапов, компании в рамках управления качеством отремонтированной (выпускаемой) продукции, применяя процессный подход, регламентируют данную деятельность внутренними стандартами, которые описывают концептуальный подход к процессу постановки нового продукта на ремонтное производство от идеи до его серийного выпуска и при его реализации применяют современные инструменты менеджмента.

1.2.9.1 Особенности процедуры разработки и постановки на ремонтное производство тягового подвижного состава

Основным потребителем продукции железнодорожного назначения в России является компания ОАО «РЖД», осуществляющая грузоперевозки и пассажироперевозки на территории Российской Федерации.

При разработке новых серий ТПС и их компонентов для ОАО «РЖД» компании-производители обязаны руководствоваться ГОСТ 15.902–2014 «Система разработки и постановки продукции на производство». Железнодорожный подвижной состав. Порядок разработки и постановки на производство». Данный стандарт дополняет отдельные требования этапов постановки продукции на производство ГОСТ 15.301 применительно к железнодорожному подвижному составу, включая локомотивы, моторвагонный подвижной состав, специальный подвижной состав, грузовые и пассажирские вагоны, а также к их компонентам.

Так, в рамках требований ГОСТ 15.902 дополнены требования о подготовке эскизного и технического проекта нового продукта по результатам научных исследовательских работ. Подробно регламентированы требования к испытаниям, включая состав документов для проведения испытаний и предоставления комиссии для оценки соответствия. Дополнено требование о проведении опытного пробега новой техники для оценки эксплуатационных характеристик и требований надежности подвижного состава. Регламентированы форма и содержание актов межведомственной и квалификационной комиссии, а также требование по формированию плана мероприятий по выявленным несоответствиям, указанным в акте, и его выполнению.

Для компаний, осуществляющих деятельность по ремонту и обслуживанию железнодорожной техники, указаны требования для разработки ремонтной документации (РД) и постановки продукции по ней на производство.

Порядок постановки продукции на ремонтное производство локомотивов и их составных частей регламентирован в ОАО «РЖД» Порядком организации

процесса постановки локомотивов и их составляющих на ремонтное производство, а также выполнения приемочных испытаний, утвержденный распоряжением ОАО «РЖД» № 2237/р от 12.10.2018 г. (Регламент № 2237/р). Данный документ устанавливает требования к проведению приемочных комиссий, описывает критерии оценки качества отремонтированной продукции и устанавливает комплектность документов для предъявления комиссии. Регламент 2237/р устанавливает также перечень продукции, подлежащей обязательной постановке на ремонтное производство, в который входят локомотивы и узлы, входящие в их состав, влияющие на безопасность движения железнодорожного транспорта.

Применение национального стандарта ГОСТ 15.902 и Регламента 2237/р позволяет определять требования к продукции, изготавливаемой для применения на железнодорожном транспорте, а также регламентирует требования к качеству ремонтной продукции.

Компании, осуществляющие разработку и изготовление продукции для ОАО «РЖД», обязаны соблюдать требования указанных стандартов, а также, если они им не противоречат, использовать собственные стандарты и методики, регламентирующие данную деятельность.

Основными крупными поставщиками железнодорожного подвижного состава для ОАО «РЖД» являются компании АО «Синара – Транспортные Машины» и АО «Трансмашхолдинг». При анализе документов, регламентирующих управление созданием новой продукции в компаниях, можно сделать вывод о схожей концепции вывода на рынок новой продукции данных компаний.

1.2.9.2 Концепция управления *выпуском новой продукции компании АО «Синара – Транспортные Машины» (АО «СТМ»)*

АО «СТМ» выполняет управление по созданию новых продуктов на основании внутренних Методических указаний «Управление проектами по созданию новых продуктов» МУ-СТМ.И-О2-02. Данный документ определяет концепцию создания нового продукта путем проектного менеджмента. Для

создания продукта формируется проектный офис и определяется проектная команда с назначением руководителя проектов и куратора проекта из числа руководства компании. Определяются менеджеры проекта с определением функций и полномочий в рамках проекта. Для старта проекта по созданию продукта необходимо решение коллегиальных органов компании.

Создание продукта при проектном управлении рассматривается как ЖЦ проекта, начиная с идеи продукта и заканчивая его серийным производством (рисунок 1.10).

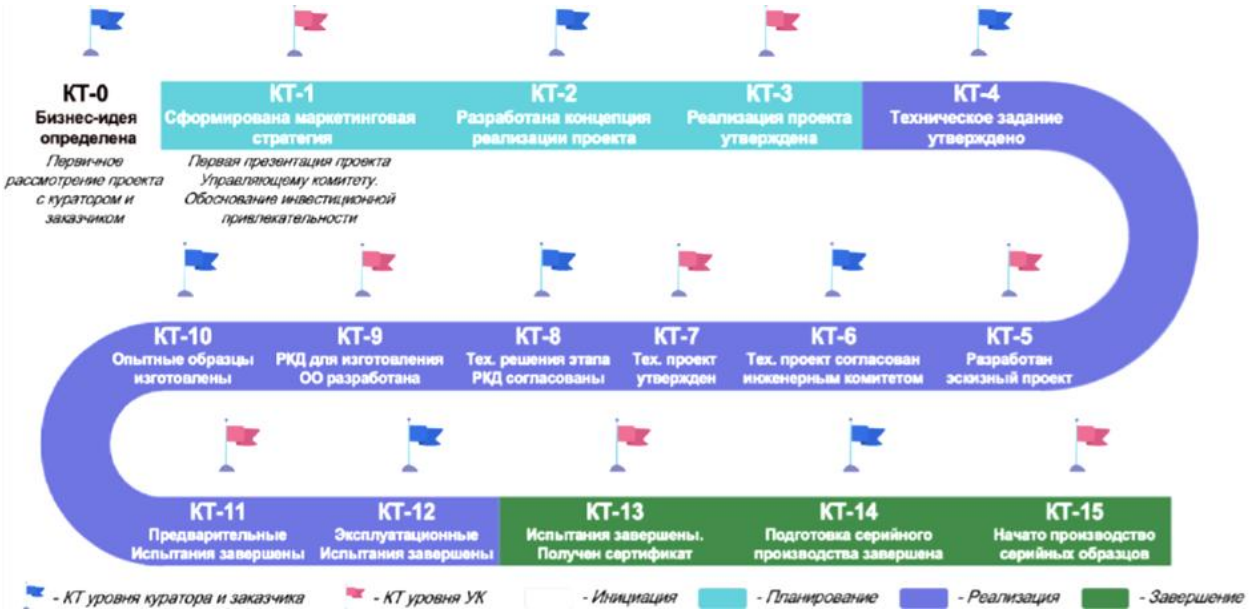


Рисунок 1.10 – Схема жизненный цикла проекта освоения ремонта продукции

На этапе ЖЦ проекта определяются контрольные точки, которые позволяют определять достижимость целей на промежуточных этапах проекта и оценить степень создания продукта.

При формировании проекта по освоению ремонта (созданию) нового продукта определяются цели, которые в рамках реализации проекта предполагается достичь, и требования при планировании и реализации проекта, при этом процесс управления требованиями должен основываться на поставленных целях и состоит из этапов:

– 1-й этап – определение перечня заинтересованных сторон проекта (стейкхолдеров), формирование интересов и требований стейкхолдеров, разработка планов по снижению их потенциальных негативных влияний;
– 2-й этап – классификация требований, определение критичных параметров и требований стейкхолдеров по уровням разработки (системном, функциональном, логическом и физическом);
– 3-й этап – разработка модели и сценариев использования требований, внедрения данных моделей и сценариев;
– 4-й этап – контроль выполнения планов по снижению потенциального негативных влияний стейкхолдеров;
– 5-й этап – управление изменениями требований;
– 6-й этап – анализ выполнения требований.

Завершающим этапом по работе с требованиями являются анализ выполнения требований и разработка планов корректирующих мероприятий для улучшения всей системы управления. По результатам данного этапа менеджером по требованиям формируется отчет по анализу выполнения требований.

Применение системы управлением требованиями АО «СТМ» позволяет создавать продукт, удовлетворяющий требованиям всех заинтересованных сторон.

Рассмотрение процесса выпуска новой продукции в качестве жизненного цикла проекта от идеи до серийного выпуска продукта с промежуточными контрольными точками позволяет эффективно оценивать степень реализации проекта (создания продукта).

1.2.9.3. Концепция управления выпуском новой продукции компании АО «Трансмашхолдинг» (АО «ТМХ»)

Процесс создания новой техники в АО «ТМХ» также основан на создании проектного офиса в соответствии с регламентом «Порядки ввода в эксплуатацию новой техники предприятий, входящих в группу лиц АО "Трансмашхолдинг"», утверждённого приказом АО «Трансмашхолдинг» № 271 от 17.12.2020 г. В связи

с применением «дивизионной» структуры управления, когда отдельным профильным направлением деятельности занимается обособленное структурное подразделение, проектная команда формируется на основе профильного дивизиона. Руководителем проекта назначается руководитель дивизиона.

Проектная команда при создании и вводе в эксплуатацию новой техники формирует планы:

– формирования анализа данных по продукту; обучения персонала сервисных и эксплуатационных депо;

– формирования комплекта запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП) для замены в период гарантийного пробега;

– аудита предприятий;

– формирования склада товарно-материальных ценностей (ТМЦ), ЗИП, переходного комплекта деталей и узлов для обслуживания и ремонта;

– обеспечения депо технологическим оборудованием, специальным инструментом;

– формирования проектной команды на уровне депо; финансирования проекта.

По результатам проработки всех этапов реализации проектов руководитель команды управления вводом новой техники в эксплуатацию формирует сводный бюджет и график финансирования, которые согласовываются с производственным предприятием ТМХ, сервисным предприятием ТМХ, Дирекцией по экономике и финансам «Трансмашхолдинг».

После поступления новой техники команда управления выполняет мониторинг её эксплуатации и фиксирует все выявленные нарушения. По результатам подконтрольной эксплуатации формулируются выводы о:

– соответствии условий эксплуатации параметрам, заложенным в ТУ на изделие; качестве работы сервисных групп;

– достаточности обучающих материалов для качественной подготовки персонала; соответствии ЗИП и переходного комплекта реальной потребности;

– соответствии текущих затрат на ремонт и обслуживание с расчетными;

соответствии производственных площадей, складских помещений и уровня квалификации персонала требованиям;

– соответствии параметров надежности изделия в соответствии с техническими условиями (ТУ);

– соответствии эксплуатационных показателей новой техники параметрам, указанным в ТУ.

При выявлении отклонений по показателям команда управления вводом новой техники в эксплуатацию совместно с проектной командой депо разрабатывают корректирующие мероприятия к Плану ввода в эксплуатацию.

Решение о завершении ввода изделия в эксплуатацию выносится на рассмотрение после трёх месяцев стабильного подтверждения нормативных значений показателей эксплуатации изделия и при согласовании с руководством сервисного и эксплуатационного депо, утверждается руководителем профильного дивизиона. После подписания приказа о завершении ввода в эксплуатацию изделия команда управления вводом в эксплуатацию новой техники прекращает свою деятельность.

1.2.9.4 Использование модельно-ориентированного подхода системной инженерии для совершенствования процесса внедрения новой железнодорожной продукции в производство

Концепции создания и ввода в новой продукции АО «СТМ» и АО «ТМХ» принципиально не отличаются и основаны на применении процессного подхода к созданию нового продукта. Ключевым элементом данного процесса является проработка требований к создаваемому продукту на этапах проектирования для удовлетворения заинтересованных сторон. В настоящее время требования, предъявляемые к продукту, подтверждаются путём многократных испытаний (приемо-сдаточных, предварительных, приёмочных, эксплуатационных, квалификационных), результаты которых подтверждают его соответствие. При ошибках в проектировании данные испытания повторяются, что при создании

сложных технологических продуктов сопряжено с увеличением длительности во времени выпуска продукта на рынок. Это влечёт риск утраты ключевых преимуществ продукта в сравнении с аналогичной продукцией других компаний и высокими экономическим и имиджевым издержками.

На всех стадиях разработки продукции, начиная с этапа проектирования, используется виртуальная копия изделия, испытания, сертификацию, подготовку производства, опытной эксплуатации и серийного производства. После запуска продукта в производство за счет обмена данными с прототипом ЦД позволяет получать и анализировать решения по усовершенствованию конструкции продукта на основе изучения цифровых моделей.

Технология ЦД, помимо создания цифровой модели для детализации свойств проектируемого изделия и уровня контроля над обликом перспективного сложного высокотехнологического продукта, к которым непосредственно относится техника (локомотив, путевая машина и др. продукты), ускорения процесса постановки на производство, представляет интерес для анализа производственной системы предприятий.

Главная задача ЦД связана с построением и эксплуатацией оптимизированной ИПС, в которой конфигурация производственных ресурсов сбалансирована с алгоритмами управления и параметрами потока отказов новой техники. ЦД позволяют использовать виртуальную ПС для выполнения такой оптимизации и выполнять виртуальное управляющее воздействие в ходе имитации функционирования ПС. Это позволяет выполнить модернизацию и диверсификацию производства для обслуживания, ремонта и эксплуатации новой техники, что, в свою очередь, определяет время выполнения производственных заказов и формирует цену продукции.

Применением цифрового инжиниринга является создание экспериментально-цифровой платформы сертификации продукции. Важно, что ключевым событием для возможности применения цифровой сертификации на основе цифрового инжиниринга стало утверждение национального стандарта

ГОСТ Р 5770037–2021, а также включение термина «цифровая сертификация» в редакции Центра компетенций НТИ СПбПУ. Эта информация была выше. Данные документы стали частью необходимого нормативного базиса для проектирования и испытаний промышленных изделий для подтверждения необходимых требований.

Цифровая сертификация – это инновационный бизнес-процесс, основанный на проведении масштабного числа виртуальных испытаний, охватывающих как отдельные компоненты, так и всю систему в целом, с целью гарантировать успешное прохождение полного набора натурных, сертификационных и других проверочных процедур с первой попытки.

Применение цифровой сертификации в отрасли транспортного машиностроения требует создания отраслевых стандартов, которые позволят, основываясь на применении *MBSE*, сокращать количество испытаний (засчитывать цифровые испытания за испытания опытного образца), использовать результаты цифровых испытаний при сертификации продукции на соответствие обязательных требований технических регламентов. Это значительно сократит время процедуры постановки на производство сложных технологических продуктов.

Умный инжиниринг также предусматривает применение на этапах проектирования технологии обратного инжиниринга – разработка КД путем применения средств 3D-сканирования и исследований свойств физического прототипа. Данный подход актуален для разработки импортозамещающих изделий, которые необходимы для обеспечения технологического суверенитета. Разработка КД путем реверс-инжиниринга при отсутствии возможности её официального получения зачастую является единственной возможностью определения требований на проектируемое изделие. Также применение обратного инжиниринга актуально при разработке ремонтной КД. В комплексе с использованием компьютерно-цифрового моделирования реверс-инжиниринг позволяет разрабатывать цифровые 3D-модели высокой адекватности.

На этапах проектирования и создания опытных образцов прорабатываются технические решения на технологичность изготавливаемого продукта. При этом для снижения себестоимости предпочтительно уменьшать количество сложных процессов изготовления деталей (ковка, штамповка, литье и другие). Замещение данных ТП технологией аддитивного (АТ) производства изготовления деталей на 3D-принтерах позволяет существенно оптимизировать процесс ремонта.

Применение умного инжиниринга, включая проектирование на основе модельно-ориентированной системной инженерии, реверс-инжиниринга, АТ, позволяет создавать сложные технологические продукты, удовлетворяющие требованиям потребителей.

Внедрение АТ на производстве определено одной из целей цифровой трансформации в [172]. Результатом внедрения в производство умного инжиниринга является повышение финансово-экономических результатов от освоения ремонта (выпуска) новой продукции.

1.3 Локомотивы с люлечным подвешиванием в России и мире

Локомотивы с люлечным подвешиванием представляют собой важный элемент в истории железнодорожного транспорта, сохраняя свои уникальные особенности и преимущества как в России, так и в других странах мира.

Люлечное подвешивание – это вторая ступень рессорного подвешивания, предназначенная для передачи вертикальных и поперечных воздействий от кузова на раму тележки и снижения горизонтальных и вертикальных воздействий на путь. Люлечное подвешивание представляет собой систему, при которой кабина или другие элементы локомотива крепятся к кузову с помощью специальных механизмов, позволяющих выполнять вертикальные и горизонтальные движения. Это обеспечивает большую устойчивость, комфорт и интенсивность работы локомотива, особенно на кривых и неровных участках пути.

Преимущества люлечного подвешивания:

1. Уменьшение вибраций: в качестве второй ступени рессорного подвешивания снижает динамические колебания, тем самым обеспечивая плавность, отсутствие рывков и ударов.

2. Долговечность: подобное опциональное решение способствует более равномерному распределению нагрузок по конструкции, увеличивая срок службы локомотива и снижая эксплуатационные расходы.

За пределами России использование люлечного подвешивания также находит свое применение:

1. Дизельные локомотивы серий *GE* и *Alstom*: производители активно применяют подобные системы для повышения безопасности и комфорта в локомотивах, работающих в сложных климатических условиях.

2. Электровозы *Bombardier* и *Siemens*: в Европе такие технологии используются в новых моделях, соответствующих современным требованиям по устойчивости и экологии.

3. Австралийские и канадские локомотивы: многие компании в этих странах также начали использовать люлечное подвешивание для работы на различных путях и снижению износа.

Ниже приведены примеры таких локомотивов в разных странах, включая производителей, наименования, модели и серии.

США: 1. *General Electric* (*GE*):

– наименование – *GE Dash 8-40BW*;

– модель/ серия: *Dash 8*;

– описание: локомотив, используемый для грузовых перевозок, оснащённый системой люлечного подвешивания, что улучшает сцепление и управляемость.

2. *Electro-Motive Diesel (EMD)*:

– наименование – *EMD SD70ACe;* модель/ серия: *SD70*;

– описание: грузовой локомотив, использующий технологии, которые обеспечивают устойчивость и повышенный комфорт.

Китай: 1. *CRRC Corporation:*

– наименование – *CRH380A*;

– модель/серия: *CRH*;

– описание: высокоскоростной пассажирский локомотив с люлечной подвеской для обеспечения большей безопасности и комфорта во время движения.

2. *China South Locomotive & Rolling Stock Corporation (CSR):*

– наименование – *HXD3B*;

– модель/ серия: *HXD*;

– описание: дизельный электролокомотив, обеспечивающий высокие эксплуатационные характеристики.

Индия: 1. *Indian Railways*:

– наименование – *WAP-7*;

– модель/ серия: *WAP*;

– описание: электровоз, широко используемый на индийских железных дорогах, с улучшенной подвеской для комфорта пассажиров.

2. *Chittaranjan Locomotive Works (CLW)*:

– наименование – *WAG-9*;

– модель/ серия: *WAG;* описание: грузовой электровоз, спроектированный с использованием технологий люлечного подвешивания.

Канада: 1. *Bombardier*:

– наименование: *Bombardier ALP-46*;

– модель/ серия: *ALP*;

– описание: электровоз, предназначенный для пассажирских маршрутов с высоким уровнем комфорта и безопасностью.

2. *GE Transportation*:

– наименование: *ET44AC*;

– модель/ серия: *Evolution Series*;

– описание: грузовой локомотив, который применяет технологии подвески для повышения производительности.

Европа: 1. *Siemens:*

– наименование – *Siemens Vectron*;

– модель/ серия: *Vectron*;

– описание: модульный электровоз, который может использоваться для грузовых и пассажирских перевозок, с особым акцентом на комфорт и стабильность.

2. *Bombardier* (*Alstom*):

– наименование: – *Bombardier Talent 2*;

– модель/ серия: *Talent*;

– описание: региональный дизель-поезд, использующий люлечное подвешивание для повышения комфорта и снижения вибрации.

В России данный тип подвешивания был активно применён в локомотивах, таких как:

– серии ЭП200 и ЭП1: электровозы нового поколения также используют эту технологию для повышения маневренности и стабильности;

– электровозы, такие как 2ЭС4К и 3ЭС4К, представляют собой современные образцы ПС, обладающие продвинутыми технологиями и конструктивными особенностями, которые улучшают их эксплуатационные характеристики. Оба типа электротяги – двухсекционные восьмиосные 2ЭС4К и трёхсекционные двенадцатиосные 3ЭС4К – оснащены модернизированным люлечным подвешиванием, которое обеспечивает лучшие условия для работы локомотива и увеличивает его надежность; электровоз 2ЭС5К – имеет также модернизированную конструкцию люлечного подвешивания. Электровоз состоит из кузова и двух двуосных бесшкворневых тележек, что обеспечивает необходимую маневренность и устойчивость на кривых участках пути. Электровозы 2ЭС4К, 3ЭС4К и 2ЭС5К представляют собой значительный шаг вперед в области локомотивостроения. Их усовершенствованная конструкция не только улучшает эксплуатационные характеристики, но и способствует более эффективному управлению ПС, что является важным аспектом для повышения безопасности и надежности железнодорожного транспорта в целом;

– серия ВЛ80в/и (люлечное подвешивание, используемое на электровозах данной серии, представляет собой важную конструктивную особенность, которая значительно улучшает эксплуатационные характеристики и общую эффективность работы ПС). Современные разработки с применением люлечного подвешивания обеспечивают высокую производительность и соответствие требованиям безопасности.

Таким образом, системы люлечного подвешивания электровозов являются ключевыми элементами в экипажной части, обеспечивая безопасность и эффективность в работе. Они обеспечивают улучшенное управление, комфорт и долговечность, что делает их незаменимыми в современных условиях эксплуатации.

1.3.1 Оценка влияния основных конструктивно-технологических факторов качества (технологии ремонта) на дефектность деталей и узлов локомотивов серии ВЛ80

ВЛ80в/и — это серия электровозов, разработанных для работы на железных дорогах Советского Союза и России (рисунок 1.11). Электровозы ВЛ80 начали разрабатываться в 1960-х годах на Новочеркасском электровозостроительном заводе (НЭВЗ).

Рисунок 1.11 – Фотография электровоза серии ВЛ80

Они стали основными грузовыми электровозами на магистральных линиях Советского Союза. Сегодня эти локомотивы продолжают активно использоваться на железных дорогах России, Казахстана и других стран постсоветского пространства.

Качество ремонта локомотивов серии ВЛ80в/и напрямую влияет на обеспечение требуемого заказчиком уровня надежности и безопасности в межремонтный период. В этом разделе рассматриваются основные конструктивно-технологические факторы, влияющие на дефектность деталей и узлов, а также их вклад в техническое состояние ТПС.

Рассмотрим основные конструктивно-технологические факторы качества (рисунок 1.12).

1. Качество исходных материалов:

– выбор качественных материалов, используемых при восстановлении деталей и узлов ТПС (электроды, флюсы, напыления) и обслуживании (вода, масла, электролит, кислоты, щёлочи). Качественные материалы способствуют увеличению долговечности и надежности выполненных ремонтных работ;

– постоянный контроль качества сырья и комплектующих на этапе поставки снижает риск появления дефектов в будущем.

2. Точность и качество изготовления деталей: точность механической обработки:

– недостаточная точность обработки может привести к увеличению люфтов, износу и преждевременному отказу деталей;

– качество сварочных соединений: низкое качество сварки может стать причиной трещин и разрушений конструкций.

3. ТП ремонта:

– неправильный монтаж узлов и деталей может привести к их преждевременному выходу из строя;

– применение высокоточных и современных инструментов позволяет повысить качество выполненной работы;

– испытания и диагностика после выполнения работ позволяют выявить и устранить скрытые дефекты.

4. Квалифицированный персонал с достаточным опытом работы и профессиональных навыков способен выполнять ремонтные работы качественно и эффективно:

– строгое соблюдение технологических карт и инструкций снижает вероятность возникновения ошибок в процессе ремонта.

5. Влияние температуры, влажности и загрязненности воздуха на качество выполнения ремонтных работ не должно быть недооценено.

6. Внедрение мер по защите элементов конструкции от воздействия окружающей среды увеличивает срок их службы.

Рисунок 1.12 – Основные конструктивно-технологические факторы качества

Совокупное влияние всех вышеперечисленных факторов определяет уровень дефектности деталей и узлов локомотивов (рисунок 1.13).

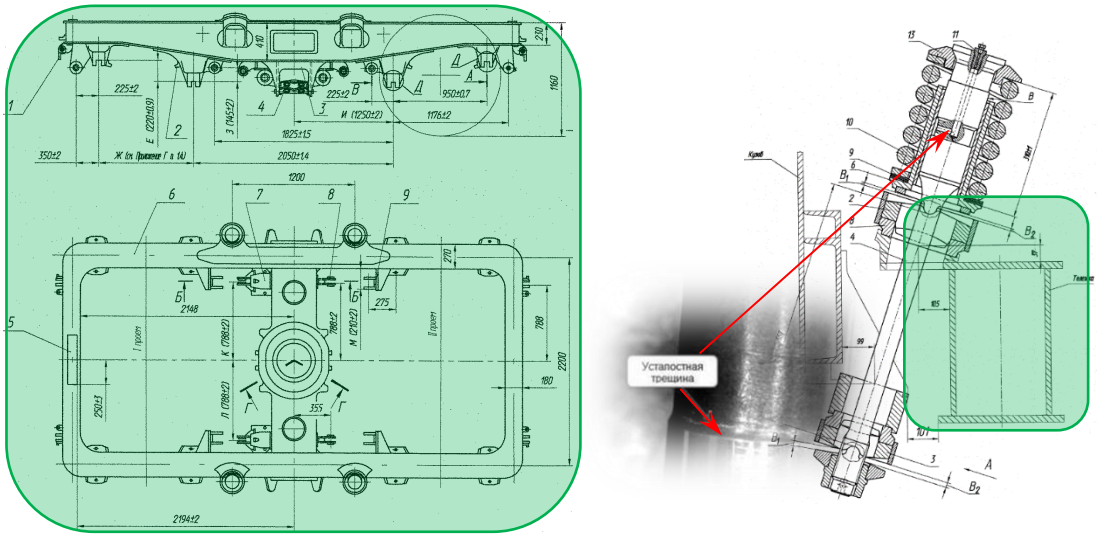


Рисунок 1.13 – Трещина (дефект) стержня узла люлечного подвешивания

Основными признаками того, что конструктивно-технологические факторы положительно влияют на ремонт, являются:

– снижение частоты отказов 1 и 2 категории на 1 млн. км. узлов и деталей ТПС в процессе эксплуатации;

– увеличение межремонтного интервала;

– повышение общей надежности и безопасности работы ТПС.

Техническое состояние ТПС определяется с помощью диагностики:

– диагностика позволяет своевременно выявлять и устранять потенциальные проблемы;

– мониторинг состояния ходовой части, систем торможения и силовых агрегатов имеет ключевое значение;

– быстрая и качественная реакция на появившиеся проблемы способствует поддержанию высокого уровня эксплуатационной готовности техники.

Оценка влияния конструктивно-технологических факторов качества на дефектность деталей и узлов ТПС является многогранным процессом. Важно учитывать как внутренние факторы (например, соблюдение технологии ремонта и квалификацию персонала), так и внешние (экологические условия и качество используемых материалов). Комплексный подход к организации ремонтных работ позволяет минимизировать число отказов и обеспечивать надежную эксплуатацию ТПС.

1.3.2 Причины износа и повреждения деталей и узлов тягового подвижного состава при эксплуатации

В процессе эксплуатации транспортных средств, включая ТПС, детали и узлы подвергаются различным видам износа и повреждения:

– нарушения при эксплуатации;

– нарушения технологии ремонта;

– конструкционные недостатки;

– влияние окружающей среды;

– естественный регресс (старение металла, трение).

Причины этих процессов могут быть очень разные и связаны как с условиями эксплуатации, так и с качеством самих материалов. Рассмотрим основные причины износа и повреждения деталей и узлов ТПС (рисунок 1.14).

1. Механический износ возникает в результате трения между контактирующими поверхностями деталей и узлов. Это наиболее распространенная причина износа. Причины:

– недостаток смазки приводит к увеличению трения и ускоренному износу, попадание абразивных частиц в систему может усиливать механический износ;

– неправильная установка и регулировка деталей могут привести к неравномерному распределению нагрузки.

2. Коррозия – это процесс разрушения материалов под воздействием химических веществ, влаги и кислорода. Причины:

– наличие агрессивных сред (например, солей на рельсах) ускоряет коррозионные процессы, непокрытые или плохо защищённые детали более подвержены коррозии;

– неправильное хранение подвижного состава может привести к образованию коррозионных повреждений.

3. Усталостное разрушение характеризуется накоплением микротрещин в материалах из-за циклических нагрузок. Причины;

– циклические нагрузки (частое нагружение и разгружение деталей (например, колеса на рельсах) могут привести к усталостному разрушению);

– отсутствие контроля за состоянием (необнаружение начальных признаков усталости может привести к внезапному выходу детали из строя).

4. Термическое воздействие можно разделить на перегрев и переохлаждение. Причины:

– перегрев может привести к изменениям структуры материала и снижению его механических свойств;

– влияние низких температур может привести к хрупкости материалов.

5. Некоторые случаи повреждений происходят из-за дефектов, возникающих на этапе производства или монтажа. Причины:

– использование несертифицированных или бракованных материалов может привести к преждевременному выходу из строя;

– неправильная установка или сборка механических узлов могут вызвать дополнительные нагрузки и повреждения.

6. Условия эксплуатации могут существенно влиять на износ и повреждение деталей. Причины:

– плохое состояние путей может вызвать дополнительные колебания и скорости, которые негативно влияют на ТПС;

– влияние окружающей среды (температура, излучение, влага, загрязнённость воздуха и т. д.).

Рисунок 1.14 – Причины износа и повреждения деталей и узлов тягового подвижного состава

Изучение причин износа и повреждения деталей и узлов ТПС имеет критическое значение для организации эффективного технического обслуживания и обеспечения надёжной эксплуатации. Понимание этих причин позволяет разрабатывать методы профилактики и улучшения надежности подвижного состава, а также оптимизировать процесс ТОиР с целью повышения безопасности и долговечности оборудования.

1.3.2.1 Причины износа *и повреждения стержня люлечного подвешивания локомотивов серии ВЛ80*

Помимо основного электрического оборудования, значимым компонентом электровоза является экипажная часть, в конструкции которой применяется люлечное подвешивание. Эта система оказывает существенное влияние на уровень комфорта и безопасность управления, создавая более благоприятные условия для работы в кабине машиниста и снижая утомляемость экипажа.

Рама тележки электровоза (рисунок 1.15) выполняет комплекс задач. Она принимает вертикальную нагрузку с кузова через кронштейны люлечного подвешивания и равномерно распределяет её между колесными парами с использованием рессорного подвешивания. Также рама принимает продольные тяговые и тормозные усилия через буксовые поводки, передавая их кузову через механизм шаровой связи и шкворневой узел. Кроме того, рама воспринимает боковые горизонтальные нагрузки от колесных пар, возникающие при движении на участке криволинейного пути, и служит основой для объединения всех механических элементов (колесных пар, тяговых двигателей, буксовых узлов и других) в единую конструкцию.

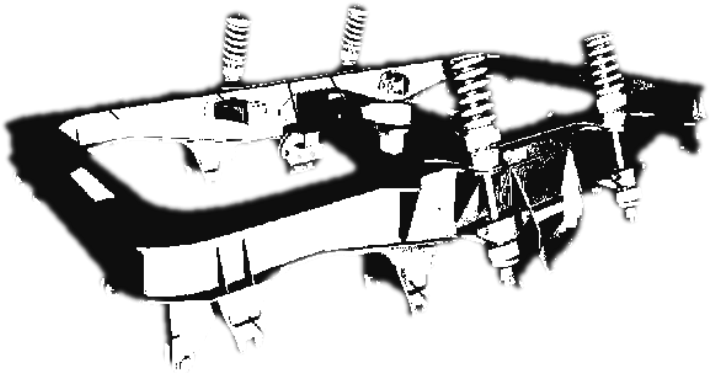


Рисунок 1.15 – Рама тележки электровоза серии ВЛ80в/и с предустановленными узлами люлечного подвешивания

Рама тележки выполнена в виде цельносварной конструкции, состоящей из двух боковых элементов коробчатого сечения, соединенных двумя поперечными концевыми брусьями и одним шкворневым брусом. Боковые элементы изготавливаются из прокатной стали толщиной 12 и 14 мм, собираются из четырех

стальных листов и сварены таким образом, чтобы получилась коробка переменной высоты сечения. В нижней части каждой боковины размещены четыре кронштейна для крепления системы буксовых поводков. Эти кронштейны выполняются из стали методом литья и представляют собой единый узел вместе с кронштейнами для рессорных стоек. На средней части боковин устанавливаются дополнительные усилительные пластины с двумя кронштейнами для подвесных элементов люлечного механизма (всего 4 кронштейна на одну тележку). Также по обеим сторонам каждой боковины размещены два кронштейна, предназначенные для монтажа гидравлических демпферов колебаний (таких кронштейнов всего 4 на тележку). В средней секции боковины расширяются, достигая ширины 410 мм, чтобы усилить конструкцию, так как в этой зоне возникают наиболее значительные нагрузки во время торможения и тяговой работы. Высота боковин в краевых участках составляет 198 мм.

Концевые поперечные брусья изготавливаются из стальных листов толщиной 14 и 16 мм, соединенных в прямоугольное сечение с постоянной высотой 198 мм. На них привариваются элементы для фиксирования тормозных рычажных передач. На переднем брусе сверху закрепляется специальный закалённый стальной лист, предназначенный для опоры ролика устройства, предотвращающего разгрузку тележки.

Шкворневой поперечный брус изготавливают из литой стали в виде коробчатого элемента с постоянным сечением и толщиной стенок 20 мм. Для повышения прочности брус снабжается дополнительными ребрами жесткости. На его краях размещены цилиндрические цапфы в виде трубок для надежного крепления к боковинам тележки. В центральной части шкворневого бруса закреплен цилиндрический корпус, который служит узлом для установки шарового соединения шкворня. По бокам этого корпуса находятся крепления для монтажа тягового электродвигателя (ТЭД), а также узлы, используемые в тормозной рычажной системе. Технические параметры тележки электровоза ВЛ80С представлены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Технические параметры тележки электровоза ВЛ80С

Наименование	Значение
Тип тележки	двухосная
База тележки, мм	3000
Тяговый электродвигатель	НБ-418К6
Масса	21 670 кг
Подвешивание тягового двигателя	опорно-осевое
Рессорное подвешивание буксового узла	индивидуальное
Тормозная рычажная передача	рычажная, с двусторонним нажатием колодок
Расстояние между внутренними торцами бандажей	$1\,440^{+1}_{-3}$ мм
Ширина бандажа	140^{+3}_{-1} мм
Толщина нового бандажа по кругу катания	90^{+5} мм

При проведении ремонтов в объемах ТР2 и ТР3 выполняются все операции, предусмотренные для ремонта ТР1, а также дополнительно осуществляются работы, такие как подъем кузова, выкатка и разборка тележек, дефектовка, обслуживание и ремонт рам тележек, а также колесно-моторных блоков.

При проверке состояния тележки оценивается состояние боковин рамы и связывающих брусьев, включая кронштейны люлечного подвешивания, поводки букс, элементы тормозной рычажной передачи, тормозные цилиндры, ручной тормоз, гидравлические гасители колебаний, подвески тяговых электродвигателей, рессорного подвешивания, а также труб и рукавов, подающих песок. Контролируются боковые опоры, тяговые устройства, приливы и кронштейны, предназначенные для предотвращения падения деталей на путь, и другие вспомогательные кронштейны. Особое внимание уделяется отсутствию трещин в структурных элементах и сварных швах рамы. При обнаружении трещин или надрывов выполняется их заварка, а усилительные накладки привариваются в строгом соответствии с инструкциями по сварке при ремонте электровозов.

Если износ кронштейнов для люлечного подвешивания превышает 10 % в поперечном сечении, они восстанавливаются с помощью наплавки, после чего проводится механическая обработка для восстановления чертежных размеров. В случае ослабления посадки втулок в кронштейны либо достижения предельного износа втулки заменяются новым комплектом. Размеры всех отверстий и накладок деталей рамы тщательно проверяются, а при превышении допустимой выработки

отверстия ремонтируются с использованием запрессовки новых втулок. Замене подлежат накладки на концевых брусьях крепления опорных роликов противоразгрузочных устройств, а также вертикальных и горизонтальных упоров, если их износ превышает нормативы. Для изготовления новых втулок и накладок используются материалы, указанные в чертежах.

Проводится контроль гнезд шкворневого бруса, предназначенных для установки шаровых связей. Клиновые пазы на кронштейнах рамы под поводки букс проверяются с помощью шаблона. Допустимый зазор между дном паза и узкой гранью шаблона при условии прилегания не менее 50 % к стенке паза составляет минимум 1 мм. В шкворневом брусе дополнительно проверяется резьба М12 для крепления крышки и резьба М30 для стаканов противоотносного устройства. Изучается состояние наличников и обечайки боковой опоры — наличники заменяются, если глубина их выработки превышает 2 мм, а при меньших дефектах они подлежат шлифовке. После монтажа новой обечайки проводится проверка герметичности соединений, которую выполняют методом наполнения керосином.

Расстояние между осями опорных конусов в шкворневых балках тележки должно совпадать с расстоянием между осями соответствующих гнезд рамы кузова, допускается отклонение ±2 мм. При необходимости регулировки расстояния между осями опорных конусов выполняется поворот эксцентричных конусов на раме тележки, при этом смещение допускается только вдоль продольной оси электровоза. Прогиб рамы кузова без установленного оборудования, измеряемый по наружным линиям нижнего обвода между шкворнями, не должен превышать следующих значений:

– в вертикальном направлении – вверх не более 12 мм, вниз не более 17 мм;

– в горизонтальной плоскости измерение прогиба на расстоянии между внутренними центральными опорами или шкворнями допускается в пределах 25 мм.

При сборке люлечного подвешивания на раме тележки следует ставить отремонтированные детали на прежние места: а) подобрать пружины с комплектом

регулировочных прокладок. Общая высота комплекта под нагрузкой 68,7 кН (7 тс) должна составлять 310±1 мм; б) надеть пружину с комплектом прокладок поз. 9 на стакан поз. 6 (рисунок 1.16); в) собрать стержень поз. 4 с верхней опорной шайбой поз. 13 и вставить в стакан поз. 6; г) установить на кронштейн рамы тележки опоры поз. 8, прокладки поз. 2 так, чтобы кулачки опор входили в желоба прокладок. Оси симметрии кулачковых опор и желобов прокладок должны со впадать с поперечной и продольной осями тележки; д) застропить стержень поз. 4 в сборе со стаканом поз. 6 и установить кронштейн на раме тележки на прежние места; е) установить на стержень балансир поз. 5, опору поз. 8, прокладку поз. 3, опору поз. 1 и навернуть гайку поз. 12. Установить шплинты в том положении, которое они занимали до разборки; ж) собрать в той же последовательности остальные опоры.

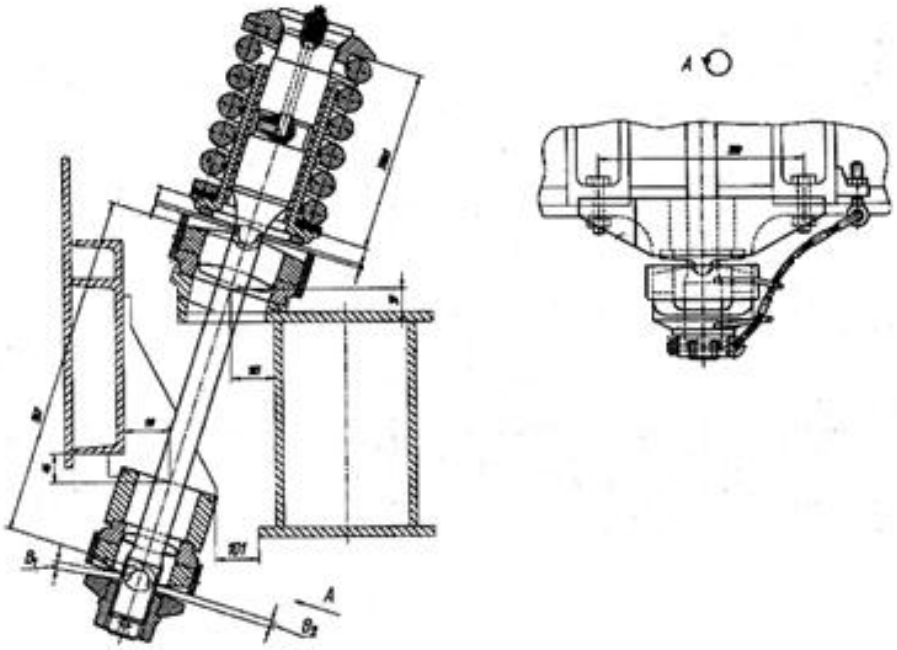


Рисунок 1.16 – Люлечное подвешивание

Конструкция состоит из нескольких ключевых элементов, которые взаимодействуют друг с другом (рисунок 1.17).

1. Стержень – это основной элемент, на который передаётся вертикальная нагрузка от кузова;

2. Кронштейны – фиксируют кузов на нижнем шарнире, обеспечивая надёжное соединение с рамой тележки;

3. Балансир – уравновешивает нагрузки и позволяет обеспечить равномерное распределение веса;

4. Нижний шарнир – состоит из нескольких опор и прокладок, которые удерживают нижний шарнир на стержне, затянутом гайкой, и стопорится шплинтом;

5. Страховочный трос – служит для предотвращения падения элементов нижнего шарнира в случае обрыва стержня, обеспечивая дополнительную безопасность.

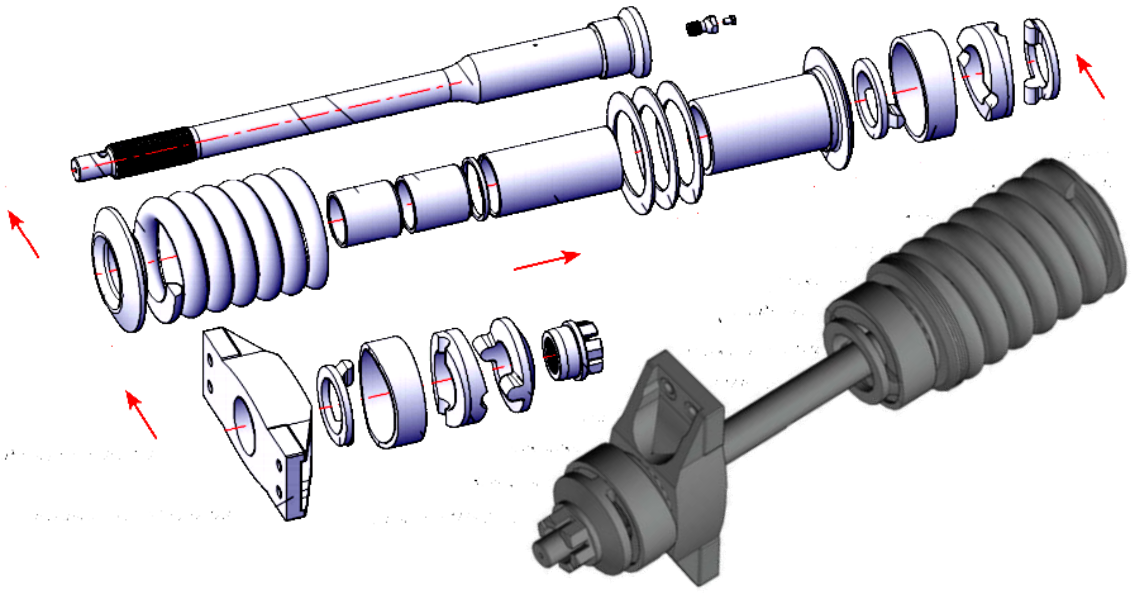


Рисунок 1.17 – Люлечное подвешивание кузова (в сборе)

Проблема обеспечения надлежащего технического состояния узлов и элементов конструкции электровозов, таких как серийные модели ВЛ10, ВЛ85, ВЛ15 и ВЛ80, представляет собой значительный фактор, требующий детального анализа и принятия целенаправленных мер для повышения их надежности и безопасности в эксплуатации. Особенно вызывающим беспокойство является тот факт, что до 80 % узлов могут подлежать списанию в ходе ТР3, что подчёркивает острую необходимость систематического контроля и диагностики их состояния.

Наиболее характерные виды износа, обнаруживаемые в процессе эксплуатации, относятся к соединениям, задействованным в продольном движении подвижного состава. Одним из ключевых признаков аварийного состояния является диагональная выработка стаканов, максимальная глубина которой располагается в плоскости, параллельной продольной оси кузова. Данный износ может служить симптомом неблагоприятных эксплуатационных условий и указывать на общую нагрузку, воздействующую на подвеску.

Кроме того, смятие терца цилиндрического выступа верхней опоры шарнира указывает на возможные перегрузки или недостатки в конструктивных характеристиках узлов, что может привести к изменению геометрии соединений и, как следствие, к снижению их надежности. Анализ выработки предохранительного кольца прокладки подтверждает, что данная деталь не способна эффективно функционировать в заданных рабочих условиях, что может привести к утечкам или другим гидравлическим неисправностям.

Значительное внимание следует уделить износу поверхности стержня в галтельной части и в области контакта с кронштейном, вызывающему риск его обрыва, что является особенно критическим, поскольку последствия такого обрыва могут быть сопряжены с серьёзными авариями. Эти обстоятельства подчёркивают необходимость регулярного мониторинга состояния узлов и деталей электровозов с целью обеспечения их безопасной и эффективной эксплуатации. Несмотря на то, что стержень не относится к дорогостоящим деталям, его замена требует подъёма всего кузова, что подразумевает выполнение операций, аналогичных тем, что проводятся при техническом обслуживании. Таким образом, этот ремонт становится достаточно затратным [188, 189].

Рассмотрим анализ отказов данного узла из различных источников. По данным [190], общее количество отказов за период 2014–2015 гг. составило 37 шт., по данным автора при заводском ремонте (на заводах АО «Желдорреммаш») – 1560 шт., за период 2020–2022 гг. – 2 шт. (рисунок 1.18).

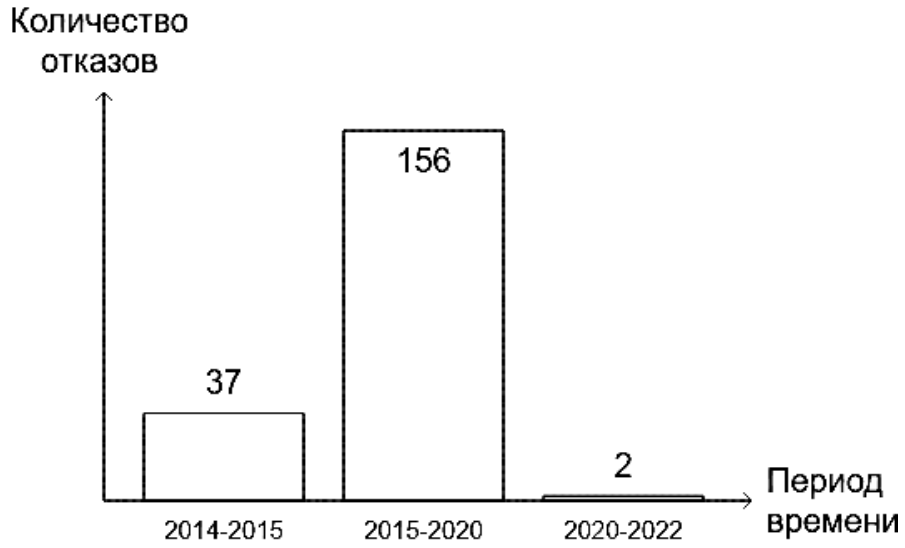


Рисунок 1.18 – Отказы узла люлечного подвешивания

Стержень люлечного подвешивания, в частности, подвергается значительным нагрузкам и воздействиям. Проблема износа стержней представляет собой серьезную задачу, которая остается актуальной с момента начала эксплуатации электровозов ВЛ80в/и. В настоящее время ситуация усугубляется дефицитом марганцевистой стали, что делает изготовление фланца стакана еще более сложным. Дополнительно стоит отметить, что при необходимости замены стержней требуется подъем всего кузова, как при ТОиР и заводских ремонтах. Данный процесс является трудоемким и затратным, что добавляет сложности в обслуживании электровозов. Рассмотрим основные причины этих процессов как в условиях эксплуатации, так при ремонте:

1. Локомотивы серии ВЛ80 эксплуатируются в условиях высоких динамических нагрузок, связанных с движением по неровным рельсам и маневрами. Передача нагрузки – нагрузка от кузова передается через несколько деталей, начиная с съемной шайбы и заканчивая верхним шарниром, который также состоит из двух опор и прокладки. Циклические нагрузки: постоянные удары и вибрации при движении по неровным путям. Смена направлений: поперечные силы и нагрузки при движении по поворотам и разгонных участках. Важно отметить, что вертикальная нагрузка равномерно распределяется на пружины,

которые тарируются под нагрузку в 7000 кгс. Настоящая высота пружины должна составлять 310 ± 1 мм, что позволяет корректировать ее размер с помощью прокладок при необходимости.

2. Динамические характеристики – люлечное подвешивание обеспечивается системой шарниров, которые позволяют стержню колебаться под воздействием горизонтальных перемещений кузова. Это способствует более мягкому восприятию динамических нагрузок, возникающих при движении, и улучшает стабильность. При горизонтальном перемещении тележки относительно кузова углы наклона подвесок меняются, но горизонтальные составляющие оставляются одинаковыми, что создаёт результирующую силу, способствующую возврату тележки в исходное положение.

Механический износ: трение между контактирующими поверхностями приводит к механическому износу стержня. Причины:

– недостаточная смазка (несвоевременное или неправильное смазывание ведёт к увеличению трения);

– попадание абразивных частиц (пыль и грязь на поверхности стержня могут усиливать износ).

Коррозия: влияние внешней среды на металлические детали подвески. Причины: влага и химические реагенты (воздействие влаги и химических веществ (например, солей на рельсах); конденсат: образование коррозии внутри узлов при разнице температур.

Повреждения при ТОиР (рисунок 1.19).

1. Механические повреждения: повреждения, возникшие в процессе разборки и сборки подвески. Причины:

– неаккуратные действия (удары инструментами или неправильное использование оборудования;

– нарушение технологий (неправильные методы разборки и сборки, нарушение последовательности операций).

2. Термическое воздействие (воздействие высоких температур при выполнении ремонтных работ). Причины:

– сварка и пайка (неправильное выполнение сварочных работ может привести к перегреву и изменению структуры металла;

– индукционный нагрев (неравномерное нагревание стержня при ремонте).

3. Ошибки при установке: описание – неправильная установка стержня или его компонентов. Причины:

– неправильное позиционирование (неправильный монтаж может привести к увеличению нагрузок на стержень);

– неравномерное затягивание (нарушение равномерности затягивания крепежных элементов).

4. Некачественное обслуживание. Причины:

– ненадлежащее планирование ТО (некачественное выполнение плановых ревизий, как следствие несвоевременное выявление износа);

– отсутствие контроля за состоянием узлов подвески.

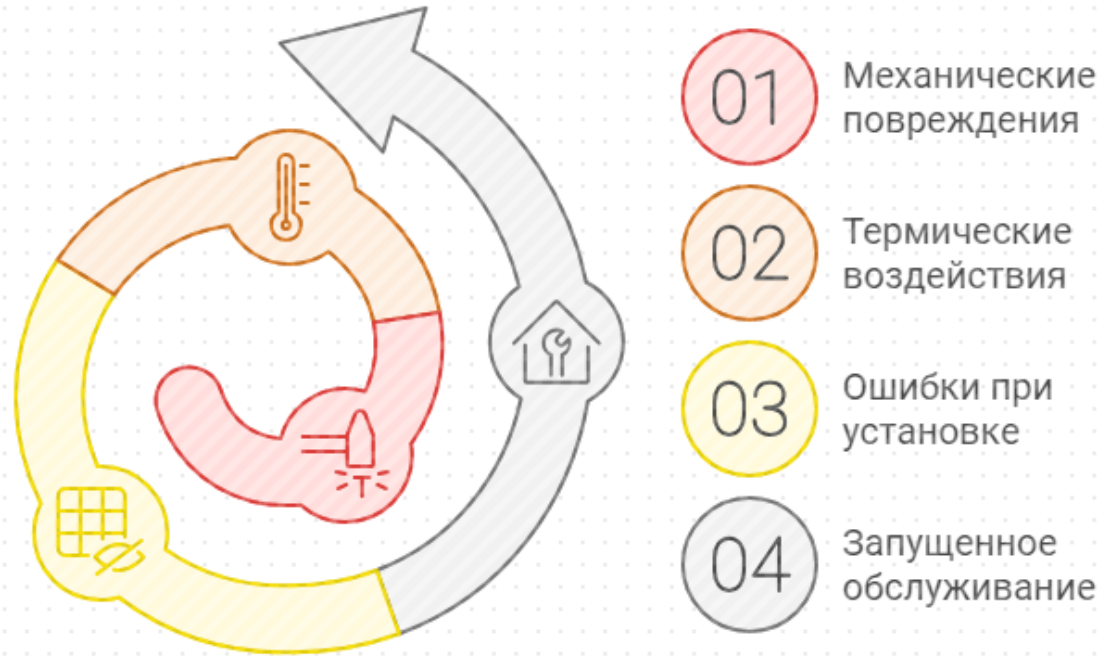


Рисунок 1.19 – Основные повреждения при техническом обслуживании и ремонте

В целях снижения процента износа и исключения повреждений при обслуживании и ремонте ТПС стержня люлечного подвешивания электровозов серии ВЛ80 рекомендуется [191]:

– осуществлять регулярные осмотры и техническое обслуживание;

– обеспечивать своевременное и качественное смазывание узлов; использовать защитные покрытия для защиты от коррозии;

– модернизация конструкции: внесение конструктивных изменений, направленных на снижение концентраций напряжений и улучшение распределения нагрузки;

– обучать персонал правильным методам разборки и сборки узлов;

– контролировать качественное выполнение сварочных и монтажных работ;

– строгое соблюдение ТП при ремонте и замене деталей;

– регулярное использование ультразвуковой, магнитной и других видов диагностики для раннего выявления микроповреждений;

– мониторинг состояния (установка данных систем состояния подвески), позволяющих оперативно реагировать на изменения в её работе.

В результате проведённых исследований стало очевидно, что эффективность работы узла люлечного подвешивания локомотивов серии ВЛ80 напрямую связана с выбором материалов, используемых в его конструкции. Выявленные причины износа и повреждений стержня люлечного подвешивания, включая воздействие эксплуатационных условий и качество обслуживания, указывают на необходимость организационных и технических изменений, направленных на повышение надежности и безопасности железнодорожного транспорта.

Учитывая необходимость снижения износа стержней, усовершенствование подвески будет происходить за счет снижения износа трением стержня в галтеле, что практично реализовывать, изменяя материал самих втулок. Установлено, что Замена стальных втулок на полиамидные является обоснованным шагом в процессе модернизации узла с целью проведения НК без его разборки.

1.3.2.2 Причины замены стальных втулок на полиамидные

В 1992 году проект № Э2341.00.00.ТО «Усовершенствование люлечного подвешивания» (Проект) [192] по модернизации узла люлечного подвешивания, в части замены стальных втулок на полиамидные и оборудования втулками из полиамида, был успешно реализован без доработки конструкции узла несколькими депо Северной железной дороги (ТЧ-1 Ярославль и ТЧ-11 Вологда), что позволило отказаться от проведения выкатки тележек при ТР-2 (200 тыс. пробега) и обеспечило пробег стержней люлечного подвешивания 8ТН.174.226 без повреждений до ТР-3 (400 тыс. км пробега, рисунок 1.20).

Рисунок 1.20 – Технология литья полиамидных втулок в формы из гранулированного полиамида ПА6-210/310

Техническое описание и инструкция по эксплуатации небыли утверждены в установленном порядке и не была проведена опытная эксплуатация. Следует также отметить, что заложенный в проект материал (литьевой полиамид ПА6-210/310 ОСТ-06-С9-83 [193]) для отливки заготовок (втулка) по технологии литья в нагреваемую пресс-форму на прессе ЛПГ-63 не удовлетворяет показателям качества (литьевые поры, нарушение геометрии, хрупкость), что свою очередь не позволяет использовать его для разработки комбинированной технологии контроля стержня узла люлечного подвешивания локомотива без его разборки, так как есть риск повреждения втулки, как следствие выход из строя основного узла.

Основные причины в модернизации узла направлены:

– на снижение стоимости производства втулок (рисунок 1.21);

– на улучшение качества его работы и повышения надежности, уменьшения количества плановых и внеплановых ремонтов (исключение выкатки тележек при ТР-2 (200 тыс. км. пробега) и обеспечение пробега стержней люлечного подвешивания (8ТН.174.226) без повреждений до ТР-3 (при 400 тыс. км пробега), что в свою очередь позволит обнаружить предотказное состояние в узле люлечного подвешивания без его разборки и выпресовки Втулки на предыдущем ТР-1 не представляется возможным, что впоследствии приводит к повреждению стержня (8ТН.174.226) при пробеге 150–200 тыс. км. с момента комплектовки из-за сверхнормативного износа стальной втулки (8ТН.294.018).

Рисунок 1.21 – Технология сборки узла люлечного подвешивания локомотивов

Рассмотрим технологические и эксплуатационные преимущества стержня узла люлечного подвешивания с полиамидными втулками (рисунок 1.22).

1. Совместимость материалов:

– проверка совместимости полиамидных втулок с другими материалами, использующимися в узлах;

– оценка термических и механических характеристик полиамида по сравнению с оригинальными стальными втулками.

2. Точный подбор размеров:

– изготовление заготовок полиамидных втулок в соответствии с заданными допусками и техническими требованиями;

– обеспечение точности посадочных размеров для минимизации люфта и зазоров.

3. Методы установки:

– установка полиамидных втулок требует особого подхода к обеспечению необходимой плотности посадки;

– избегание перегрева и механических повреждений при монтаже.

4. Контроль качества:

– проверка качества изготовленных втулок на соответствие техническим требованиям;

– проведение испытаний на износоустойчивость, прочность и устойчивость к внешним воздействиям.

5. Уменьшение износа и трения:

– полиамид обладает хорошими антифрикционными свойствами;

– меньший коэффициент трения, стойкость к износу и самосмазывающиеся свойства полиамида уменьшают необходимость в частом обслуживании и замене втулок.

6. Устойчивость к химическим воздействиям:

– полиамиды не подвержены коррозионным процессам, в отличие от стальных материалов, и хорошо переносят контакт с маслами, смазочными материалами и различными агрессивными веществами, что способствует увеличению срока эксплуатации втулок.

7. Температурная устойчивость:

– изучение эксплуатационных температурных диапазонов и их влияние на свойства полиамида;

– оценка работоспособности полиамидных втулок при повышенных температурах, которые могут возникать в результате трения или внешних факторов;

8. Тестирование и валидация.

Рисунок 1.22 – Основные преимущества применения полиамидных втулок

Эксплуатационные преимущества (рисунок 1.23).

1. Снижение затрат на обслуживание:

– увеличенный срок службы полиамидных втулок снижает частоту и стоимость технического обслуживания;

– меньше количество смазочных материалов, необходимых для работы узлов.

2. Повышенная надежность:

– улучшенные эксплуатационные свойства полиамидных втулок способствуют увеличению надежности работы локомотива.

3. Экологические преимущества:

– уменьшение необходимости использования смазок способствует улучшению экологической ситуации;

– переработка полиамидных втулок может быть более экологически чистой по сравнению с переработкой стальных втулок.

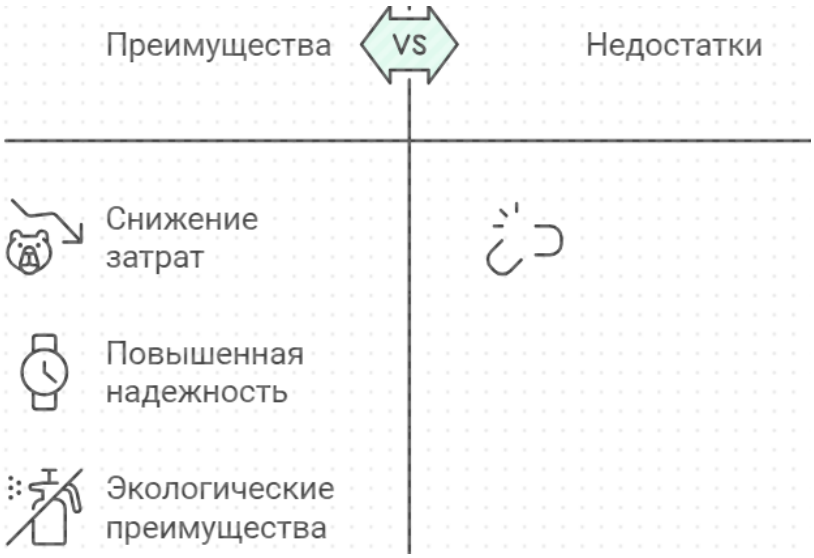


Рисунок 1.23 – Эксплуатационные преимущества применения полиамидных втулок

Экономические преимущества представлены (рисунок 1.24).

1. Сравнительный анализ затрат:

– сравнение стоимости производства и установки полиамидных втулок с аналогичными затратами на стальные втулки;

– оценка экономии на обслуживании благодаря повышенной долговечности и снижению необходимости в смазочных материалах.

2. Невосприимчивость к химическим влияниям. Дополнительно, благодаря низкому уровню износа и увеличенному ресурсу полиамидных втулок, сокращаются расходы на их замену и обслуживание.

3. Надёжность и безопасность:

– убедиться, что полиамидные втулки соответствуют всем действующим стандартам и требованиям безопасности;

– введение систем мониторинга состояния для своевременного выявления износа или повреждений втулок [194].

Полиамид позволяет проводить контроль как было отмечено выше с поверхности втулки.

Рисунок 1.24 – Экономические преимущества использования полиамида

Замена стальных втулок на полиамидные в узлах подвешивания тележки локомотивов серии ВЛ80 представляет собой перспективное направление, способное привести к значительным улучшениям в весе конструкции, снижению износа и трения, а также увеличению срока службы узлов. Важно учитывать все технологические, экономические и операционные факторы, проводить тщательные испытания и анализы для успешной реализации данного перехода.

Проект модернизации узла люлечного подвешивания, выполненный в 1992 г., показал большие преимущества в эксплуатации ТПС. Замена стальных втулок на полиамидные исключила необходимость выкатки тележек при техническом обслуживании (ТР-2) и увеличила межремонтный пробег стержней до 400 тыс. км без повреждений. Однако технология не была официально утверждена и не имеет систематической опытной эксплуатации, что может привести к рискам и проблемам с качеством продукции.

1.4 Оценка научных работ, направленных на совершенствование методов оценки надежности, оптимизацию процессов технического обслуживания и повышения эффективности ремонта тягового подвижного состава

Оценка и контроль надежности продукции считается одной из важнейших характеристик производственной деятельности. Надежность объекта определяется, как сохранение рабочих параметров, обеспечивающие выполнение заданных функций в установленных условиях эксплуатации, ТОиР, транспортировки и хранения в течение определенного времени.

Надежность ТПС на железных дорогах РФ, а также методы ТОиР, внося значительный вклад посредством научных исследований: М. М. Агапова [195], А. Ю. Балакина [196], В. П. Бугаева [197–199], А. А. Воробьева [200], А. В. Горского [201–206], И. В. Дмитриенко [207], И. П. Исаева [208], А. Г. Кузнецова [209], В. С. Наговицына [210], А. К. Омарбекова [211], А. Т. Осяева [212], Р. А. Постникова [213], В. Т. Стрельникова [214], А. В. Скребкова [215], П. А. Устича [216], Н. Г. Шабалина [217].

Учитывая увеличение числа систем мониторинга, усложнение технических решений в модернизируемом и ремонтируемом подвижном составе, а также повышенную интенсивность их эксплуатации, которая нередко превышает расчетные возможности используемых компонентов, становится очевидной необходимость принятия мер для повышения общей надежности оборудования. В связи с этим требуется создание усовершенствованной системы технического обслуживания и ремонта, ориентированной на сокращение числа внезапных отказов в процессе эксплуатации и снижение затрат, связанных с внеплановыми ремонтными работами.

Создаваемые условия открывают широкие перспективы для формирования инженерных подходов, направленных на оценку надежности технических систем. Это позволяет уже на этапе проектирования интегрировать экономически обоснованные параметры надежности, а на стадии производства – эффективно поддерживать их. Для локомотиворемонтных депо первоочередной задачей

становится обеспечение заданного уровня надежности при оптимизации процессов обслуживания и ремонта. Реализация этого требует аккумулирования достоверной и всеобъемлющей информации, что невозможно без тщательной фиксации всех отказов оборудования, неисправностей и планово-внеплановых ремонтов подвижного состава.

Несмотря на то, что значительные объемы данных регулярно собираются производственными и ремонтными предприятиями, зачастую их использование носит ограниченный характер. Например, во всех локомотивных депо фиксируются сведения о проведении ремонтов (плановых и неплановых), о межремонтных пробегах, замене узлов и агрегатов, а также результаты диагностики и технического контроля. Однако аналитика технического состояния электровозов нередко остается преимущественно качественной. Методы вероятностного и статистического анализа представляют собой мощный инструмент, который позволяет извлечь из накопленных данных более глубокую и детализированную информацию о характере и причинах отказов оборудования.

Основы статистических методов, заложенные в трудах профессора М. В. Остроградского, нашли свое дальнейшее развитие в работах выдающихся российских математиков, среди которых П. Л. Чебышев, А. М. Ляпунов и А. А. Марков. Их труды оказали значительное влияние на развитие мировой науки, а зарубежные ученые, такие как Ф. Гальтон, К. Пирсон и Р. Фишер, продолжили это направление, внося свои дополнения. Во второй половине XX века отечественные исследователи, в первую очередь А. Н. Колмогоров, А. Я. Хинчин и А. И. Берг, совместно со своими учениками, разработали научные подходы к управлению качеством и надежностью продукции. Эти идеи нашли широкое применение в промышленности и инженерных дисциплинах. Вклад зарубежных специалистов, таких как Н. Винер [218–220], Р. Шеннон [221–223] и Д. Нейман [224, 225], также оказал существенное влияние на становление современных методов анализа надежности.

Сегодня теории вероятностей, надежности, исследование операций и процессное моделирование выступают в роли ключевых математических инструментов для решения комплексных задач в области технических систем. Возрастающая потребность в их использовании стимулировала развитие новых прикладных математических направлений, таких как теория оптимального управления, информационная теория, исследование конечных автоматов, статистическое моделирование производственно-технологических процессов и математическое обоснование экспериментов. Эти разработки не только изменили подходы к решению задач в инженерной практике, но и сыграли важную роль в преобразовании математики, сделав её мощным инструментом с широчайшими прикладными возможностями и высокой практической значимостью.

Среди доступных методов диагностики можно выделить НК, которые получили широкое применение благодаря своей технологичности и высокой точности в выявлении скрытых дефектов в материалах. Это сделало их базой для обеспечения безопасности перевозок и сохранности грузов на предприятиях железнодорожного транспорта.

НК позволяет:

– выявлять дефекты в деталях на стадии производства и ремонта, что предотвращает их установку на ТПС;

– обнаруживать дефектные изделия при плановом ремонте, что предотвращает отказы в эксплуатации и снижает финансовые затраты на неплановые ремонты.

Анализ состояния узлов и деталей железнодорожной продукции является ключевой задачей для поддержания безопасности пассажирских перевозок и сохранности грузов, учитывая, что железнодорожный транспорт играет важную роль в транспортировке пассажиров и грузов, требуя высокого уровня качества ТПС. Результаты будут представлены в разделе 1.5.4 настоящего исследования. Повышение общей надежности изделий требует создания новой системы ТОиР, чтобы минимизировать количество внезапных отказов и снизить затраты на неплановые ремонты.

1.5 Алгоритм освоения ремонта подвижного состава и их элементной базы с целью установления им нового назначенного срока службы

В текущей геополитической обстановке, при санкционном давлении западных стран производителями подвижного состава принимаются значительные усилия в поиске альтернативных источников поставки ряда номенклатуры материалов, запасных частей и комплектующих покупных изделий необходимых для изготовления ТПС. Неблагоприятная обстановка обуславливает необходимость принятия новых решений в обеспечении железнодорожной отрасли тяговыми ресурсами при растущей потребности в грузоперевозках и перевозке пассажиров. Одним из таких решений может стать продление срока службы ТПС. В настоящее время нормативная база предусматривает такую возможность для ряда серий локомотивов. Для проведения соответствующих мероприятий необходимо внести в КД конкретных серий ТПС, регламентирующую установление временных периодов, соответствующую информацию, как предписывают положения пункта 11 статьи 4 [226].

Таким образом, разработчиком или владельцем КД организовываются следующие действия: а) в документацию для конкретной серии ТПС вносится процедура продления срока службы, дополненная необходимыми корректировками; б) в случае отсутствия в КД установленного срока службы корректируется ее содержание, путем включения соответствующих изменений; в) проводится техническое диагностирование, и при положительном заключении вносятся изменения о назначении нового срока службы (ННСС) подвижному составу согласно [227–229].

Тема проведения работ по ННСС неоднократно становились предметом научных исследований [230, 231], в которых не нашли решения следующие вопросы: а) уровень квалификации специалистов; б) точность результатов диагностики; в) организация технологического процесса процедуры

диагностирования. В данной работе подробно исследованы этапы подготовки производства для проведения процедуры ПСС ТПС.

В ходе проведённого исследования была разработана детализированная процессная модель, отражающая алгоритм создания сетевого плана работ, связанного с технической подготовкой производства (ТПП). Данная модель, опирающаяся на действующие нормы и требования в области обеспечения безопасности движения и надёжности, исключает возможность эксплуатации железнодорожного транспорта, не соответствующего установленным нормативным стандартам [232, 233].

Важным преимуществом внедрения процедуры оценки возможности ПСС ТПС является существенное снижение затрат для владельцев на приобретение нового транспортного средства. Такой подход оказывается оправданным в случаях, когда фактический остаточный ресурс оборудования позволяет избежать преждевременного достижения критического технического состояния. Остаточный ресурс подвижного состава часто сохраняется при эксплуатации в условиях малой загруженности, щадящих режимов работы или при низкой интенсивности использования. Однако это не исключает возможности продления срока службы даже на напряжённых маршрутах или сложных профилях пути, поскольку физическое состояние транспорта не всегда достигает предельного уровня к моменту завершения установленного нормативного срока эксплуатации.

Одним из ключевых условий ПСС ТПС является выполнение требований, установленных положением пункта 11 статьи 4 [226], в соответствии с которым любые изменения в конструкции или технологии производства железнодорожного оборудования, влияющие на безопасность, а также мероприятия, связанные с ПСС, должны сопровождаться обязательным подтверждением соответствия продукции. Это подтверждение осуществляется в рамках требований, перечисленных в статье 6 технического регламента Таможенного союза. Таким образом, указанная норма фактически стирает четкие границы между процедурами модернизации и ПСС, что существенно осложняет их точное нормативное разграничение.

Это требование делает необходимым осуществление модернизации подвижного состава с обязательным прохождением сертификационных испытаний.

Примером может служить чехословацкий электровоз серии ЧС2, который, пройдя капитальный ремонт (КР) на Ярославском электровозоремонтном заводе им. Б. П. Бещева с одновременным ПСС, получил индекс «К». По состоянию на август 2019 года парк ОАО «РЖД» насчитывал 13 локомотивов серии ЧС2, сохранявших возможность пройти ПСС без капитального ремонта с последующей сертификацией. В то же время 113 локомотивов, успешно прошедших указанную процедуру, получили новую серию ЧС2К. Аналогичная ситуация наблюдалась с локомотивами серии ВЛ10, после проведения КР и ПСС на Челябинском электровозоремонтном заводе индекс «К» был получен 801 секцией.

Вместе с тем возможность прохождения процедуры ПСС существует и для других серий ТПС без необходимости проведения масштабных модернизационных расходов. Это обусловлено тем, что данные мероприятия требуют значительных финансовых ресурсов и капитальных инвестиций, что значительно снижает их экономическую привлекательность.

В связи с этим, корректировка действующих нормативных положений позволит обеспечить унификацию и эффективное выполнение установленных требований [229, 234] в полном объёме.

В локомотивном хозяйстве процесс технического диагностирования основывается на проведении экспертной оценки специализированной организацией, которая предоставляет владельцу подвижного состава техническое заключение с рекомендациями по необходимому объему ремонтно-восстановительных мероприятий.

В пассажирском хозяйстве – технического диагностирования выполняется комиссионно с участием специалистов ремонтных предприятий, в соответствии с установленной методикой [228, 233–241].

Следует отметить, что использование технологий и средств НК показывает высокую эффективность. Так в 2021 году на предприятиях локомотиворемонтного комплекса было проверено более 5 миллионов деталей, из которых более 21 тысячи были признаны негодными для дальнейшей эксплуатации.

Объем проверок в 2021 году значительно сократился на 12 % по сравнению с предыдущим годом: продиагностировано 5 444 559 деталей, из которых забраковано 26 950. Средний уровень отбраковки в 2021 году составил 0,4 %, свидетельствуя о снижении на 0,1 % по сравнению с показателем 2020 года (0,5 %).

Анализ данных НК за последние 15 лет приведен в (таблице 1.8).

Таблица 1.8 – Данные по отбраковке деталей локомотивов за 15 лет

Узел	Деталь	Уровень отбраковки, %														
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
КРБ, КМБ	Ось	1,47	1,77	1,45	1,7	1,55	1,34	1,24	1,14	1,01	0,88	0,61	0,60	0,58	0,45	0,41
	Бандаж колеса	0,34	0,28	1,89	1,63	0,31	0,26	0,23	0,24	0,19	0,12	0,13	0,11	0,17	0,08	0,10
	Колесный центр	**2,6**	**3,36**	**2,7**	**3,29**	**3,44**	**4,24**	**3,89**	**4,04**	**4,34**	**3,62**	**2,99**	**2,78**	**5,30**	**4,08**	**4,07**
	Удлиненная ступица	1,47	1,31	1,7	1,54	1,73	1,85	1,51	1,24	1,28	1,08	1,34	1,20	1,08	1,15	1,04
	Зубчатое колесо	**3,77**	**4,24**	**3,87**	**3,86**	**3,78**	**4,05**	**3,69**	**3,36**	**2,76**	**2,66**	**2,19**	**2,03**	**3,39**	**2,84**	**2,07**
	Шестерня	4,22	3,45	3,9	4,37	3,62	3,57	2,93	2,76	2,71	2,48	2,25	1,89	2,10	1,84	1,68
	Вал малой шестерни	1,25	1,41	1,6	1,14	0,61	0,64	0,49	0,42	055	0,82	1,15	0,17	0,15	0,11	0,08
	Валы якоря	0,9	1,08	1,66	1,78	1,01	0,89	1,46	1,21	1,17	0,69	1,44	1,33	0,63	0,57	0,95
Автосцепное устройство	Корпус автосцепки	2,03	1,74	1,45	1,93	2,1	2,24	1,5	1,46	1,62	1,64	1,24	1,03	1,69	1,07	1,43
	Тяговый хомут	4,22	3,93	3,28	3,67	3,6	3,7	3,43	2,75	2,27	2,76	2,37	2,00	2,22	1,58	2,45
	Клин хомута	1,03	0,94	0,91	1,1	0,83	0,72	0,71	0,9	0,73	0,58	0,56	0,64	0,73	0,68	0,59
	Маятниковая подвеска	**3,53**	**2,93**	**3,4**	**3,99**	**3,83**	**4,49**	**3,59**	**3,74**	**3,09**	**3,88**	**3,09**	**2,98**	**3,28**	**2,95**	**3,06**
Подшипник буксовый	Внутренние и наружные кольца	0,84	0,86	0,96	1,0	0,7	1,01	1,54	0,74	0,61	0,43	0,39	0,36	0,29	0,30	0,27
	Ролики	0,74	0,51	0,52	0,55	0,52	0,5	1,27	0,25	0,29	0,33	0,29	0,46	0,91	0,31	0,13
Дизель	Детали дизеля в целом	1,23	1,26	1,28	1,35	1,33	1,38	1,22	1,51	1,92	1,85	2,00	1,23	1,08	0,98	1,10
Подвески	Детали подвесок в целом	0,81	0,8	0,82	0,7	0,94	0,7	0,51	0,45	0,56	0,49	0,12	0,26	0,78	0,35	0,10
Среднесетевой уровень отбраковки		0,98	0,92	0,95	1,02	0,87	0,92	1,07	0,79	0,72	0,69	0,60	0,50	1,4	0,46	0,42

По итогам проведённых инструментальных, визуальных исследований и НК на 112 рамах тележек локомотивов выявлены участки с наиболее интенсивным

развитием износа, а также зоны зарождения усталостных трещин в металле, сварных швах и околошовных областях. Данные участки схематично отражены на рисунке 1.25. Значимость полученных результатов служит основой для внедрения комплекса профилактических мероприятий, включая дополнительное упрочнение, обработку и регулярный мониторинг, что способствует увеличению срока службы ключевых элементов конструкции и ТПС в целом.

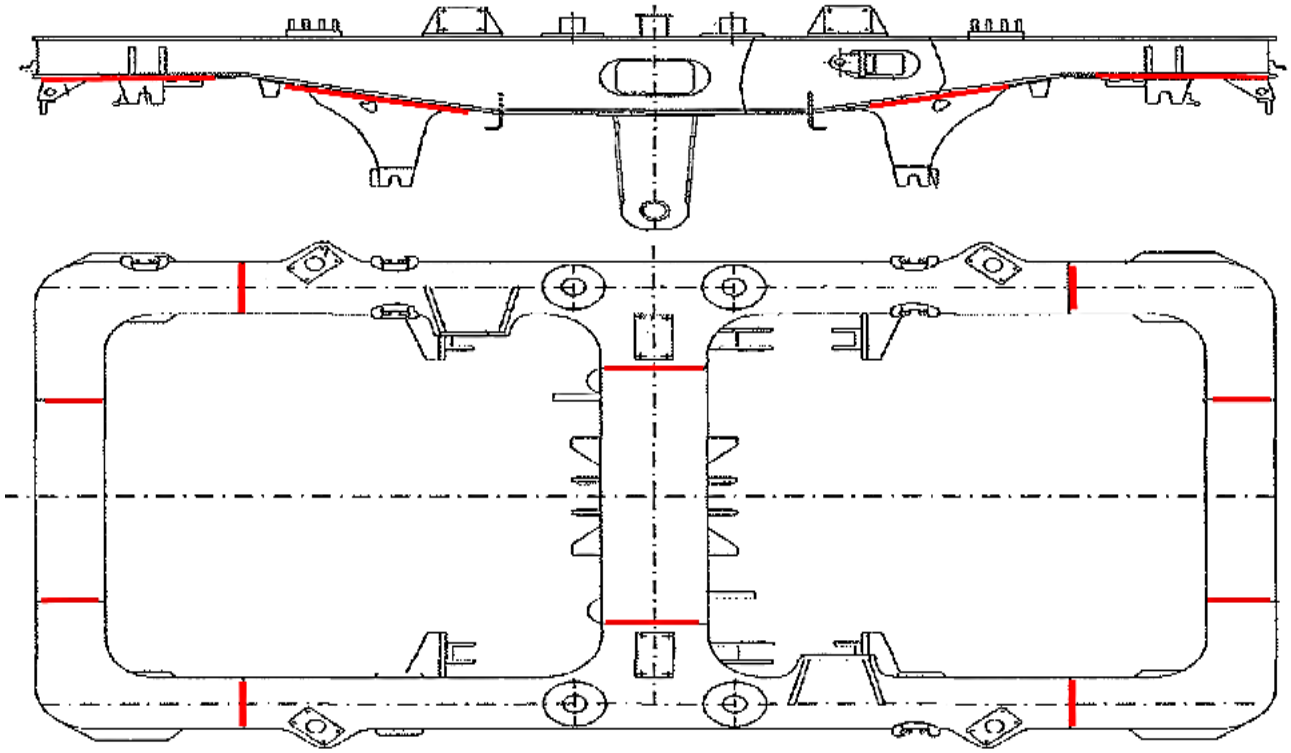


Рисунок 1.25 – Общий вид рамы тележки с выделением зон, где наиболее вероятно возникновение дефектов (обозначены красным цветом)

В соответствии с методикой [228], в результате технического диагностирования 226 пассажирских вагонов, выпущенных КВЗ в 1993–1994 годах, было выявлено 39 вагонов, подлежащих списанию (что составляет 17 % от общего числа). В конструкции силовых элементов каркаса этих вагонов обнаружены очаги воздействия, превышающие допустимые нормы, включая коррозионные процессы и другие повреждения (таблица 1.9).

Таблица 1.9 – Число обнаруженных отклонений в толщине металлических элементов при обследовании вагонов производства КВЗ

Элемент вагона	Вагон модели		Общее количество измерений
	61-850	61-836	
Хребтовая балка(котловая сторона)	3	23	234
Хребтовая балка (не котловая сторона)	9	19	234
Хребтовая балка (средняя часть)	2	1	117
Шкворневая балка (котловая сторона)	9	29	117
Шкворневая балка (не котловая сторона)	4	31	117

На рисунке 1.26 приведена характеристика обнаруженных утонений, вызванных коррозией и другими факторами, в силовом каркасе пассажирского вагона производства

КВЗ.

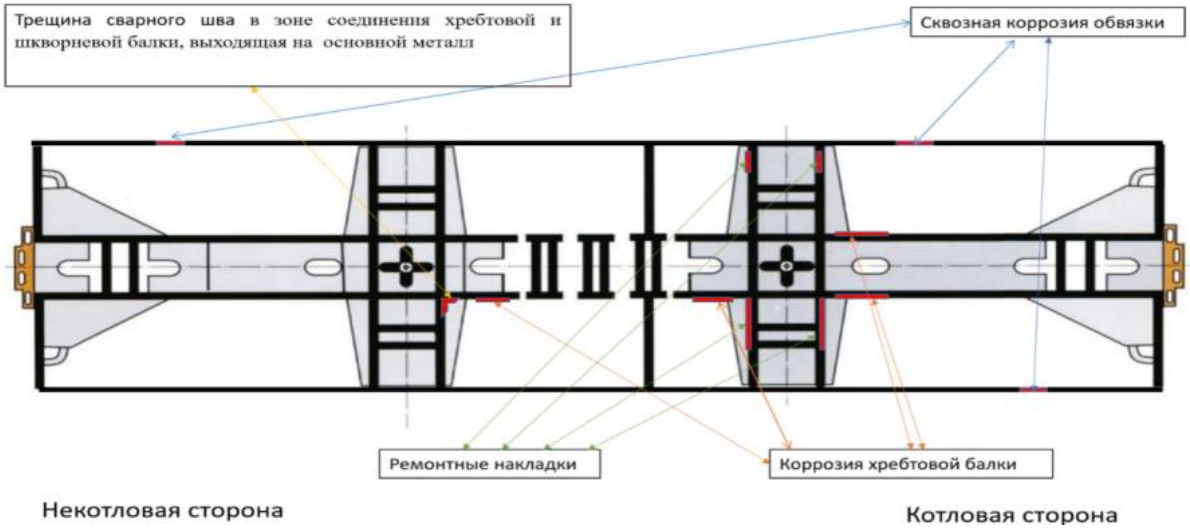


Рисунок 1.26 – Общий вид рамы тележки вагона с выделением зон, где наиболее вероятно возникновение дефектов силового каркаса пассажирского вагона, достигшие нормативного срока службы

Сравнительный анализ демонстрирует, что наиболее уязвимыми к развитию дефектов и коррозионных повреждений элементами ТПС и НПТС являются развивающиеся в деталях усталостные трещины, износы и коррозии на недостаточно защищенных участках силового каркаса от воздействия окружающей среды и внешних факторов. Вероятность выявления трещин определяется множеством факторов, которые зависят как от характеристик самих дефектов

(таких как форма, расположение, шероховатость, свойства материала и пр.), так и от параметров инспекционной системы (включая используемые процедуры, оборудование, программное обеспечение и квалификацию операторов). В контексте обеспечения целостности конструкции вероятность обнаружения в большинстве случаев оценивается на основании размеров трещин, особенно размеров стенок повреждения. Подобный подход позволяет использовать сравнительно простую статистическую модель, основанную на принципах биномиального распределения, что обеспечивает как определенные преимущества, так и ряд ограничений. В этой связи процесс определения назначенного срока службы (или ресурса) подвижного состава и его отдельных элементов базируется на анализе фактического остаточного ресурса объекта и прогнозировании времени достижения его предельного состояния. Оценка проводится на основании данных, полученных в результате измерений, визуальной проверки и видов (методов) НК, выполненных в соответствии с заранее установленными методиками обследования.

Когда анализируемый объект достигает своего предельного состояния, предусмотренного нормативной технической документацией (НТД), владелец может инициировать процесс оценки возможности его дальнейшей эксплуатации. Результаты такой оценки становятся основанием для принятия решения о восстановлении объекта или его выводе из эксплуатации с последующей утилизацией.

В рамках ННСС [227] подвижного состава и его составных частей владелец, основываясь на предложенной ранее концепции управления процессами ТПП [17], – запускает необходимые работы и процессы, направленные на ТПП для проведения ПСС. Общий процесс выполнения работ, связанных с продлением назначенного срока службы (ПСС), можно структурировать на несколько ключевых этапов:

– проведение научно-исследовательской работы (НИР);

– разработка РД;

– подготовка производства, включающая проведение опытных процедур (диагностирование, ремонт, испытания, приемка результатов разработки РД), последующую оценку качества выполненного ремонта экспериментального образца, внедрение серийного ремонта, а также подконтрольную эксплуатацию отремонтированных изделий на ПС или пробной партии ПС [233].

1. Специалисты считают, что НИР должна выполнять специализированная аккредитованная организация, которая обладает официальным правом заниматься установлением ПСС на уровне законодательства. Такая организация должна быть оснащена необходимым оборудованием для проведения технологических и диагностических исследований, включая средства измерения, тестовые образцы и другое материально-техническое обеспечение, а также иметь в своем распоряжении соответствующую производственную баз.

2. Представитель, уполномоченный собственником подвижного состава, основываясь на результатах НИР, инициирует разработку комплекта РД, необходимой для проведения ремонта в установленном объёме, например, деповской, средний или капитальный ремонт (ДР, СР, КР). Документация разрабатывается в соответствии с положениями ГОСТ 2.602–2013 [242]. Кроме того, создаются новые эксплуатационные документы, предназначенные для конкретного типа или серии подвижного состава, что осуществляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 2.601–2019 [243]. На основании этих документов формируется ТД, обеспечивающая выполнение опытного ремонта единицы подвижного состава.

3. Ремонтное подразделение предприятия осуществляет подготовку к проведению работ, включая проведение предварительных и приемочных испытаний образцов подвижного состава. На основании результатов данных испытаний утверждаются комплект КД, необходимой для выполнения деповского, среднего или капитального ремонта (ДР, СР, КР), а также формируется пакет документов, в которых фиксируются параметры надежности и ННСС, граничные значения допустимых отказов и критических состояний. Эти параметры

устанавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ 27.003–2016 и ГОСТ 27.002–89 [244, 245]. При этом общий подход не учитывает тенденцию к постоянному усложнению конструкций подвижного состава [232, 233].

В данном разделе сформулированы следующие основные положения:

1. Установлено, что устранение существующих ограничений создаст условия для реализации процедуры определения нормативных и ННСС для подвижного состава без необходимости значительных финансовых вложений и капитальных затрат. Проведённые исследования предлагают внести соответствующие изменения в нормативные документы, предусмотрев возможность повторного проведения процедуры ПСС для подвижного состава, который ранее уже проходил данную процедуру. В текущих условиях это позволит избежать принудительного вывода из эксплуатации транспортных средств, обладающих остаточным техническим ресурсом. Согласно прогнозам, к 2030 году благодаря сокращению списания парка по причине достижения предельного срока службы количество единиц подвижного состава уменьшится с 7762 до 4552, что составляет 3210 единиц.

2. Представлен общий алгоритм выполнения работ, связанных с ННСС подвижного состава. Установлено, что ключевым этапом на предприятии является ТПП.

3. Выделены пять основных подходов, направленных на обеспечение правомерной эксплуатации подвижного состава после завершения установленного срока службы. Во-первых, это внесение держателем оригинальной КД изменений, касающихся срока службы техники. Во-вторых, определение срока службы подвижного состава в случае, если такая информация отсутствует в его КД. В-третьих, проведение технической диагностики для подвижного состава с исторической ценностью. В-четвёртых, реализация процедуры установления нормативных и ННСС. И, наконец, в-пятых, выполнение процедуры ПСС. Однако на данный момент применение ПСС для подвижного состава ограничено нормативными условиями.

1.5.1 Значение технической диагностики, 3D-промышленных решений и неразрушающего контроля для оценки и прогнозирования технического состояния подвижного состава

Техническая диагностика появилась на фоне быстрого прогресса в машиностроении, особенно в сфере железнодорожного транспорта. Это развитие потребовало более детальной оценки состояния подвижного состава и его компонентов, что стало основой для внедрения современных методов технической диагностики. Слово «диагностика» имеет греческое происхождение и происходит от термина «*diagnostikos*», что переводится как распознавание или определение. Процесс диагностики предполагает установление текущего состояния системы, отдельного узла, детали или всего подвижного состава, включая их оценку [246].

Техническая диагностика – это процесс поиска и анализа состояния технических систем, который позволяет определить их работоспособность и выявить скрытые дефекты. Это обширная категория, которая включает в себя все методы и способы, используемые для оценки состояния объектов с целью обеспечения их надежной и безопасной эксплуатации. Техническая диагностика может охватывать как профилактические, так и текущие проверки, а также оценку состояния после ремонта [247].

Техническое диагностирование – это более узкий термин, который обозначает конкретные действия и процедуры, выполняемые для получения информации о состоянии объекта. По сути, это этапы и методы проверки состояния и работоспособности техники для выявления различных дефектов, неисправностей, а также отклонений от нормальных условий и режимов эксплуатации, которые используются для реализации технической диагностики. Оно является неотъемлемой частью любого производства, включая ТОиР ТПС. Его главная цель – гарантировать безопасность, надежность, долговечность и эффективность работы деталей и узлов ТПС, а также сократить затраты на их ТОиР и снизить потери в эксплуатации [246]. Таким образом, техническое

диагностирование может включать различные инструменты и техники, применяемые на практике для сбора данных о состоянии системы.

Методы технического диагностирования подразделяются на субъективные (органолептические) и объективные (приборные), как показано на рисунке 1.27.

Рисунок 1.27 – Методы технического диагностирования

1. Органолептические методы. Используют органы чувств человека (зрение, слух, обоняние, осязание) для получения информации о состоянии объекта диагностики без применения специализированных технических устройств [246]. К таким методам относят визуальный осмотр, определение температуры прикосновением, оценку звуковых характеристик и другие аналогичные подходы.

2. Объективные (приборные) методы отличаются использованием инструментов и измерительных устройств. К ним относятся:

– механический метод, позволяющий измерять геометрические параметры, зазоры в сопряжениях, давление в гидро- и пневмосистемах, силы затяжки соединений и

скорости вращения подвижных элементов. Этот подход применяется в задачах количественной оценки износа деталей, проверки состояния соединений и элементов механизмов;

– электрический метод (например, ваттметрия), основанный на измерении электрических характеристик, таких как сила тока, напряжение, мощность и сопротивление. Он используется для определения состояния механизмов на основе анализа их электрических параметров;

– тепловой метод (термометрия), при котором диагностируются температурные характеристики объекта. С его помощью можно выявить неравномерный нагрев, состояние подшипников, тормозных систем, муфт и других элементов;

– виброакустический метод (виброметрия), основанный на определении колебательных процессов в механизмах, возникающих из-за взаимодействия движущихся частей. Этот метод применим для контроля механических колебаний, диагностики дефектов и мониторинга повреждений;

– методы анализа смазочных материалов, которые заключаются в изучении наличия и состава продуктов изнашивания в масле, что позволяет оценить состояние элементов механизма;

– виды (методы) НК, включающие магнитный, вихретоковый, ультразвуковой, капиллярный и другие подходы. Они направлены на проверку целостности деталей без их разрушения. Данные виды (методы) применяется в зависимости от задач технической диагностики и характера неисправностей. Одной из основных задач технической диагностики является получение достоверной информации о состоянии изделия с необходимой оперативностью.

Виды (методы) контроля, в зависимости от характера воздействия на изделие, разделены на два класса разрушающие и неразрушающие. Разрушающий контроль используется для оценки качества материалов и компонентов, при этом проверенные объекты теряют возможность дальнейшего применения. НК не влияет на работоспособность изделия, позволяя использовать его в дальнейшем при положительном заключении [248].

На современном этапе развития ремонтного производства ТПС виды (методы) НК обрели наибольшую популярность благодаря своей высокой технологичности и точности в выявлении несплошностей в материалах, деталях и узлах. Эти виды (методы) позволяют обнаруживать как поверхностные, так и внутренние скрытые дефекты без изменения параметров и структуры детали. Они выявляют такие дефекты, которые могут вызывать отказы изделий. Виды (методы) НК применяются на всех стадиях – от разработки и производства до испытаний и эксплуатации, а также для оценки качества ТП и входного контроля материалов, поступающих на производство.

Виды (методы) НК демонстрируют высокую эффективность благодаря своим заметным преимуществам по сравнению с разрушающими испытаниями и визуальной оценкой. Подходы, основанные на наблюдении за состоянием поверхности деталей, характеризуются простотой в применении и не предполагают обязательного наличия высокой квалификации или дорогостоящего оборудования. Однако они обладают низкой производительностью, не поддаются полной автоматизации и зависят от субъективного восприятия, так как на точность результатов влияют состояние здоровья, опыт и добросовестность оператора. При этом многие дефекты могут не проявляться на поверхности детали или быть незаметными даже с использованием увеличительных приспособлений.

Преимущества разрушающих методов испытаний заключаются в возможности измерения разрушающих нагрузок и других параметров, влияющих на надежность детали. Одним из недостатков разрушающих испытаний является их ограниченность, так как проверке подвергаются только определённые партии идентичных изделий. Поскольку в процессе таких испытаний материалы и изделия повреждаются или уничтожаются, точность полученных данных напрямую зависит от степени однородности свойств материалов и условий, в которых будет использоваться деталь. В сравнении с НК, разрушающие методы характеризуются большей затратностью, меньшей производительностью и сложностью в автоматизации ТП.

В ОАО «РЖД» особую популярность приобрели виды (методы) НК. Они активно применяются в диагностических процедурах для получения необходимых данных на этапе проектирования и проведения опытно-конструкторских работ. Использование систем НК позволяет подтвердить обоснованность выбранных решений, оптимизировать сроки и объемы испытаний, а также повысить точность при выборе материалов, компонентов и оборудования, что обеспечивает требуемое качество продукции при минимально возможных затратах. На этапе внедрения подбираются наиболее подходящие методы контроля, разрабатываются технические нормативы и устанавливаются критерии приемки для деталей.

Определение конкретного вида (метода) НК фиксируется в проектной технической документации с учётом уровня ответственности конструкции и типа сварного соединения. Проведение НК сварных соединений, деталей и узлов ТПС включает такие методы, как визуальный и измерительный контроль, магнитопорошковый, капиллярный, радиографический, ультразвуковой, а также метод проверки на непроницаемость и герметичность [249–255]. Это даёт возможность выбрать наиболее подходящий способ контроля с учётом точности и надёжности полученных данных.

При проведении НК элементов конструкций учитываются различные факторы, в том числе:

– предполагаемый вид дефектов и характер их расположения;

– возможности применяемого метода контроля;

– особенности формы, размеров и материалов проверяемых конструкций;

– состояние и степень шероховатости их поверхностей. Дефекты могут быть классифицированы по их положению, размеру и форме. Например, поверхностные дефекты включают:

– подрезы, наплывы, кратеры, прожоги и свищи;

– внутренние дефекты представлены такими изъянами, как непровары, шлаковые включения и расслоения. Трещины, поры и раковины могут быть как поверхностными, так и внутренними. Среди дефектов выделяют плоскостные,

такие как трещины, непровары и подрезы, которые характеризуются протяжённой формой, варьирующимся раскрытием и глубиной, острыми окончаниями, а для трещин – также резкими границами. Объёмные дефекты, такие как поры, раковины или шлаковые включения, имеют округлую форму.

Визуальный и измерительный методы контроля преимущественно обнаруживают поверхностные дефекты (за исключением мельчайших, например, размером менее 0,08 мм) и применяются на всех стадиях производства, монтажа и эксплуатации.

Капиллярный метод контроля ориентирован на выявление мелких невидимых или слабозаметных невооружённым глазом дефектов, таких как трещины, поры, раковины, непровары, свищи или проявления межкристаллической коррозии. Этот метод помогает определить их размещение, протяжённость и ориентацию на поверхности.

Магнитопорошковый метод позволяет обнаруживать поверхностные трещины и другие дефекты, которые невозможно выявить визуально или измерительными способами [256]. Данный метод подходит для проверки как сварных соединений, так и основного металла, однако он неприменим при работе с цветными металлами.

УЗК, в соответствии с работами И. Н. Ермолова, А. Х. Вопилкина, В. Г. Бадаляна [257], а также отчётом института доктора Фёрстера [258], считается наиболее популярным и универсальным методом НК. Этот вид контроля отличается высокой чувствительностью, производительностью, возможностью исследования с одной стороны конструкции, сравнительно низкой стоимостью оборудования и безопасностью. Ультразвуковой вид (метод) используется как для проверки качества изготовления и ремонта конструкций, так и для мониторинга их состояния во время эксплуатации. Эффективность УЗК значительно превышает производительность радиографического метода (в 3–10 раз), при этом его себестоимость в 4–8 раз ниже [259]. Ультразвуковой вид (метод) позволяет обнаруживать поры и шлаковые включения с вероятностью примерно 70 %, если их размеры превышают 1,5 мм (рисунок 1.28). Кроме того, многолетняя практика

применения УЗК при проверке сварных соединений показала, что вероятность выявления плоскостных дефектов колеблется в диапазоне 95–98 % [260].

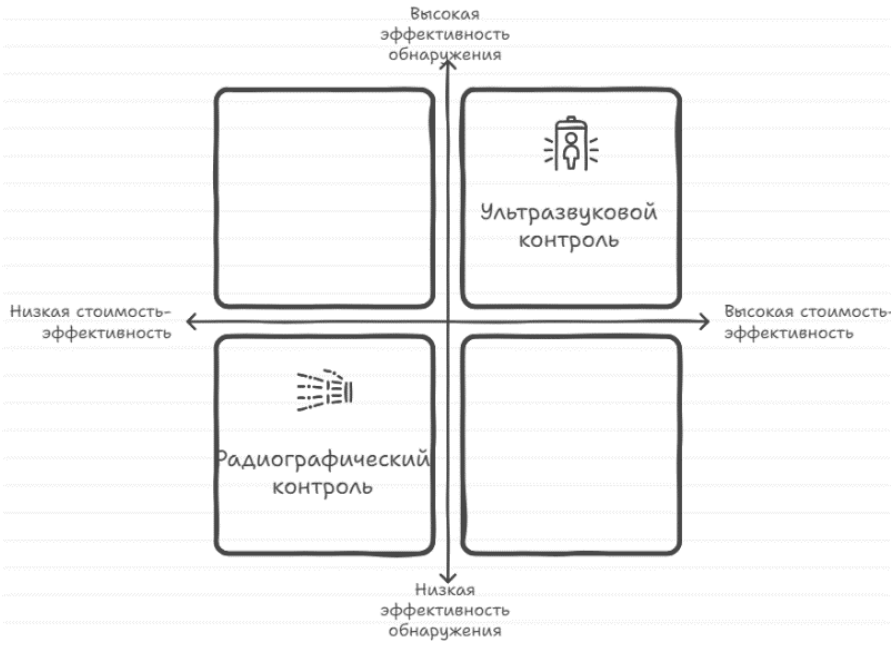


Рисунок 1.28 – Производительность УЗК в сравнении с радиографическим контролем

Использование метода 3D-сканирования, основанный на структурированном подсвете в сочетании с современными методами обработки изображений, позволяет достигать высокой точности и разрешения, а также обеспечивает возможность анализа сложных форм и текстур, что, в свою очередь, способствует улучшению качества производственно-технологических процессов и повышению их надежности (рисунок 1.29).

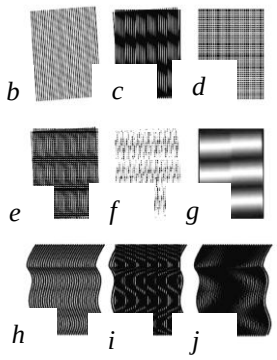


Рисунок 1.29 – Примеры структурированного подсвета в виде проецируемого шаблона

Методы определения расстояния до объектов в плоскости проекции имеют свои особенности и применения. Первый метод, о котором вы упомянули, основан на триангуляции, что подразумевает использование проективных устройств, таких как проекторы, которые создают узор на поверхности объектов. Затем камера захватывает этот узор и, анализируя его искажения, определяет расстояние до каждой точки. Этот метод требует точной синхронизации между проектором и камерой, а также предоставляет высокое качество данных и детализированное изображение поверхности, что делает его особенно полезным для задач, требующих высокой точности, например, в области 3D-моделирования и анализа форм.

С другой стороны, лазерные сканеры функционируют по принципу измерения времени, необходимого лазерному лучу для отражения от объекта и возвращения в сканер. Они могут осуществлять высокочастотное сканирование, что позволяет достаточно быстро получать данные о большом количестве точек в пространстве. Лазеры первого и второго классов имеют различия в мощности и безопасности, однако оба типа могут эффективно использоваться для картографирования и создания 3D-моделей в различных сферах – от геодезии до архитектуры.

Применение систем 3D-сканирования действительно охватывает широкий спектр областей, и вывод о том, что выбор метода и устройства зависит от конкретных требований задачи, абсолютно верно. Каждое из упомянутых устройств имеет свои уникальные характеристики, которые могут определять его удобство и эффективность в той или иной ситуации. Разрешение камер варьируется от 3,1 МП (пример системы *RangeVision Spectrum*) до 14,9 МП у самых высококлассных моделей. В большинстве случаев разрешение камер имеет обратную корреляцию с ценой, что приведено в графике. Ценовые данные представлены в виде синей линии и столбиков, показывающих стоимость систем. Максимальная цена – около 1,6 млн рублей, что соответствует камерам с высоким

разрешением. Цены на системы обратно пропорциональны разрешению: более высокое разрешение часто предполагает большую стоимость.

Точность сканирования: отображается с помощью красной линии, где указаны достижения для каждой системы в микрометрах.

Обратная связь между разрешением и ценой: более дорогие системы, как правило, имеют более высокое разрешение. Это подчеркивает, как технологии и стоимость зависят друг от друга в области 3D-сканирования.

Классификация устройств сканирования по различным признакам позволяет более точно выбрать оборудование в зависимости от потребностей проекта (рисунок 1.30).

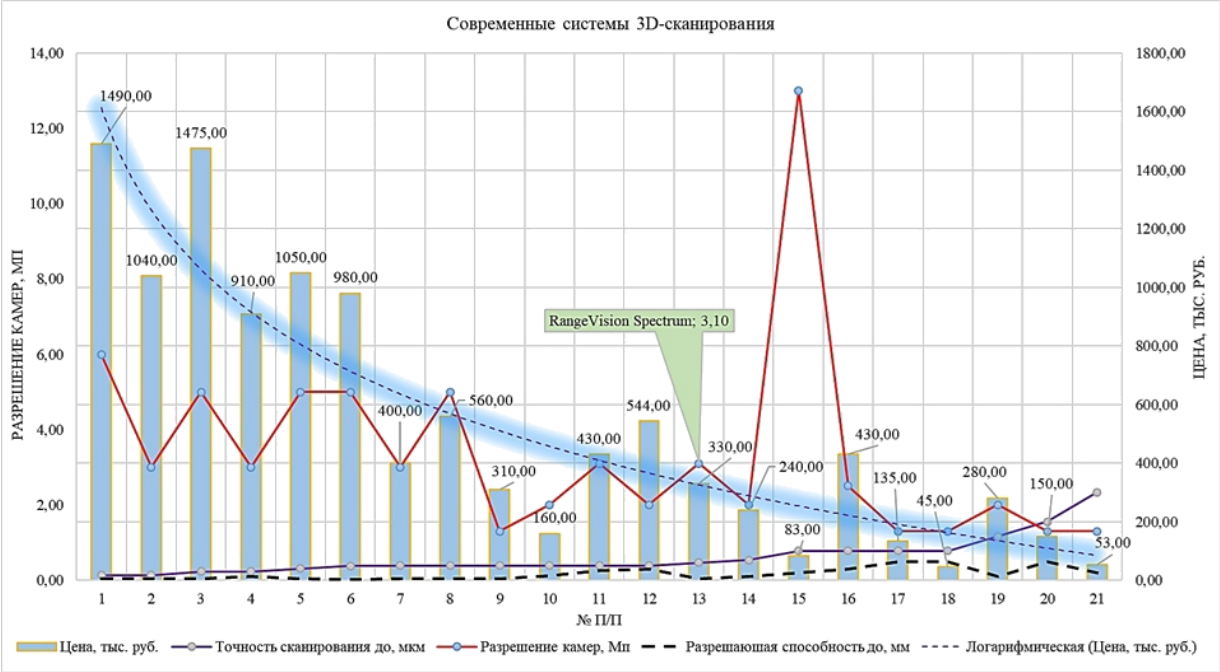


Рисунок 1.30 – Современные системы 3D-сканирования

Этот график несет важную информацию, давая наглядное представление о ключевых характеристиках, таких как разрешение, цена и точность. Пользователи могут сделать более обоснованный выбор, основываясь на своих потребностях и бюджете, обращая внимание на соотношение цены и качества оборудования.

Преимущества и недостатки каждого из этих методов можно рассматривать в контексте приложений, таких как автоматизация обработки данных, создание 3D-моделей для проектов транспортного машиностроения и робототехники. Поскольку машинное зрение активно используется в автоматизации производственно-технологических процессов, один из ключевых аспектов взаимодействия между человеком и машиной заключается в правильной интерпретации полученных данных. Это, в свою очередь, открывает двери для дальнейшего использования информации, полученной из системы сканирования, в системах искусственного интеллекта и анализа данных.

В контексте применения полученной информации важно отметить, что она может быть использована для решения различных задач, таких как проектирование, моделирование, анализ и диагностика. Таким образом, 3D-сканирование становится важным инструментом в современных технологиях, осуществляя связь между объектами контроля (ремонта) и их ЦД, и способствует развитию более интуитивных и эффективных взаимодействий между людьми и машинами.

Техническая диагностика, основанная на современном понимании состояния объектов, обеспечивает комплексный подход к оценке работоспособности различных узлов и компонентов, позволяя выявить скрытые дефекты и прогнозировать возможные отказы.

НК как важная составляющая процесса технической диагностики предоставляет эффективные решения для выявления дефектов, начиная с проектирования и заканчивая эксплуатацией.

Таким образом, сочетание прогрессивных методов технической диагностики и видов (методов) НК обеспечивает не только безопасность эксплуатации, но и долгосрочную надежность транспортных систем, что имеет ключевое значение для повышения качества ТОиР и снижения временных и финансовых затрат в сфере железнодорожного транспорта. Важность этих видов (методов) станет лишь

возрастать с учётом новых технологических вызовов и требований, предъявляемых к современному производству и ремонту ТПС.

Развитие методов диагностики и контроля отражает общий прогресс в машиностроении, позволяя не только повысить эффективность эксплуатации ТПС, но и минимизировать затраты на ТОиР.

1.5.2 Основные этапы развития технологий и средств неразрушающего контроля на транспорте

Развитие систем бортовой диагностики оставалось на низком уровне в начале 2000-х годов, что было связано с отсутствием объективных данных о рабочих параметрах основного оборудования ТПС в процессе их эксплуатации [261]. В результате этого использовались исключительно стационарные устройства для проведения параметрической тестовой диагностики.

Дефектоскопия металлургических изделий, которые находят применение в железнодорожной сфере, традиционно включала такие этапы, как выявление дефектов, оценка их критичности и последующее принятие решений по дальнейшей эксплуатации дефектных изделий [262–264]. Дефектоскопы, разработанные в первой половине XX века, имели ряд существенных недостатков. Это объяснялось как недостаточной разработанностью теоретических основ применяемых методов, так и несовершенством подходов к обнаружению дефектов и их последующей оценке. Перед научными учреждениями и лабораториями, специализировавшимися на дефектоскопии, ставились следующие задачи: достижение высокой надежности диагностики при минимальных затратах времени и ресурсов, разработка инновационных методов контроля и инструментов для их реализации, выбор оптимальной системы проверки, а также автоматизация диагностического процесса для минимизации влияния человеческого фактора при определении наличия и степени опасности выявленных дефектов. Дополнительно предусматривалась необходимость создания комплексных подходов к контролю с использованием различных методик НК.

Подобными разработками занимались ведущие исследовательские центры и учебные заведения, такие как Центральный научно-исследовательский институт путей сообщения, Научно-исследовательский институт интроскопии (НИИИН), основанный 6 мая 1964 года для решения задач в области дефектоскопии металлоконструкций и диагностирования аэрокосмической техники, Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ), ныне преобразованный в РТУ МИРЭА, а также Научно-исследовательский институт мостов, ныне известный как предприятие «Научно-исследовательский институт мостов и дефектоскопии Федерального агентства железнодорожного транспорта». Среди ключевых организаций в этой области также можно выделить Петербургский государственный университет путей сообщения (ранее ЛИИЖТ), Институт физики металлов АН СССР, Сибирский физико-технический институт, ГНЦ ЦНИИ им. А. Н. Крылова, НИЦ «Курчатовский институт», ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей» им. И. В. Горынина, а также Балтийский государственный технический университет.

В ходе разработки новых средств дефектоскопии основное внимание уделялось внедрению современных технических решений. В период второй половины XX века наиболее активное распространение и применение на железнодорожном транспорте получили дефектоскопы, функционирующие на принципах магнитных и электромагнитных видов (методов) НК.

Со второй половины XX века исследования, проводимые ключевыми научными учреждениями в области радиотехники и радиолокации, включая разработку радиолокационных станций в 1950–1960-х годах (как авиационных, так и наземных, например, типа «Дон» [265]), способствовали активной адаптации импульсной ультразвуковой аппаратуры. Это стало важной вехой в развитии импульсной ультразвуковой дефектоскопии, применяемой не только в железнодорожной отрасли, но и в судостроении. Кроме того, были разработаны многоканальные устройства для управления антенными решетками и матрицами.

Применение зеркально-теневых ультразвуковых дефектоскопов УРД-52 для

массовой проверки участков рельсов в зоне болтовых стыков началось в мировой практике в 1952 году. Уже к концу 1950-х годов появились съемные устройства УРД-56 и УРД-58, рассчитанные на проверку рельсов по всей длине и также основанные на зеркально-теневом методе работы.

Ключевым этапом в совершенствовании рельсовой дефектоскопии стало развитие скоростных систем, способных проводить сплошную проверку рельсов во время эксплуатации. В конце 1930-х годов НИИПС начал работу в этой области, а также активно вносили вклад Институт физики металлов АН СССР и Сибирский физико-технический институт, занимавшиеся разработками методов магнитной дефектоскопии на основе продольного намагничивания рельсов. В схожем направлении проводились исследования и в Центральном научно-исследовательском институте Министерства путей сообщения (ЦНИИ МПС), результатом чего стало создание первых вагонов-дефектоскопов в 1953 году. Эти устройства использовали технологию фотозаписи контрольных данных и могли проверять рельсы со скоростью до 70 км/ч. В 1960-х годах в ЦНИИ МПС начались разработки систем для ультразвукового скоростного контроля рельсов.

Рост интенсивности движения на железных дорогах потребовал внедрения высокоскоростных дефектоскопов с возможностью автоматизации процесса рельсового контроля. В 1960-х годах ЦНИИ МПС реализовал проекты, включавшие автоматизацию анализа данных, что улучшило эффективность разделения полезных сигналов и помех при магнитной дефектоскопии.

Большой вклад в развитие видов (методов) УЗК в железнодорожной отрасли был внесен ЛИИЖТом (ныне Петербургский государственный университет путей сообщения) и созданным при нем в 1946 году НИИ мостов. В 1947–1950 годах проводились исследования методов рентгено- и гаммаграфирования, а с 1953 года в НИИ мостов началась активная работа над видами (методами) УЗК сварных соединений. В результате была разработана методика послойного контроля сварных швов, впоследствии применявшаяся для анализа рельсов. Под руководством А. К. Гурвича создана теоретическая база и разработаны устройства

для автоматизированного контроля сварных соединений. С 1960-х годов ультразвуковая дефектоскопия стала использоваться для обследования мостовых конструкций, постепенно заменяя или дополняя методы гаммаграфирования.

В 1961 году, основываясь на исследованиях НИИ мостов, Министерство путей сообщения одобрило первую в мире инструкцию по применению УЗК на рельсосварочных предприятиях. А. К. Гурвич и Л. И. Кузьмина разработали основы определения ключевых параметров для контроля, а также предложили критерии для классификации дефектов рельсов с учетом их потенциальной опасности.

К 1980-м годам научные достижения советской отраслевой науки привели к созданию значительного исследовательского потенциала в области стационарных диагностических систем для ТПС. Эффективно работали научные школы под руководством таких специалистов, как В. А. Четвергов, Э. Симсон, А. З. Хомич, Ю. Е. Просвиров, Э. И. Нестеров, А. Д. Глущенко и других. Их работы способствовали совершенствованию видов (методов) НК и внедрению новых технологий в процесс диагностики ТПС и железнодорожной инфраструктуры.

Совершенствование технологий для разработки антенных решеток и матриц способствовало созданию в 1980-х годах аппаратуры для медицинской ультразвуковой диагностики [266]. К началу XXI века аналогичные разработки начали активно применяться для приборов НК в промышленности. Этому предшествовало внедрение многоканальных систем для генерации и приема ультразвуковых сигналов, что стало новым этапом в развитии УЗК оборудования.

Являясь коммерческим продуктом, дефектоскопы, использующие технологию фазированных антенных решеток (ФАР), активно рекламируются. При этом, естественно, делается акцент только на их положительных свойствах, что может создать излишне радужное впечатление.

Такую ситуацию А. К. Гурвич охарактеризовал следующим образом [267]: «Дефектоскопы с преобразователями на ФАР завораживают обывателей и даже некоторых специалистов своим непрерывно качающимся лучом в сопровождении причитаний экспонентов-«шаманов» [268].

До конца XX века ключевое значение в контроле сварных швов преимущественно оставалось за ручными ультразвуковыми устройствами. Трудоёмкость ручного контроля ниже – весь контроль связан со сканированием преобразователем с мелким шагом. Ручная обработка результатов НК отнимает значительное количество времени, что зачастую приводит к задержке в принятии решений по предотвращению опасных инцидентов. Данный контроль как бы должен «умереть» естественным образом, за исключением тех случаев, когда ничего другого, кроме его, нельзя придумать. Искусственный интеллект у нас ещё до естественного интеллекта не дорос, и ближайшие несколько лет, а может быть, даже, десятков, не дорастёт. Останутся задачи контроля с большим количеством неопределённостей. Окончательное решение при контроле должен принимать человек – специалист, но другое дело, что автоматика должна дать ему для этого максимальное количество возможностей [269].

Существенный научный и практический вклад в создание эффективных методов диагностики подвижного состава был внесён такими учёными и специалистами, как А. А. Куриц, А. А. Черняков, В. Г. Жалкин, Э. А. Улановский, Е. А. Никитин, В. А. Рыжов, А. А. Будницкий, Т. В. Ставров, В. А. Перминов, А. П. Здор, Б. С. Гольдберг, Г. А. Комаров, Л. П. Устюгов и другие. Их труды способствовали созданию в 2000-х годах технологической базы, позволившей активно внедрить средства технической диагностики [270] при ТОиР ТПС, что особенно важно при контроле их ключевых узлов. В частности, разработаны и введены в эксплуатацию стационарные системы НК деталей и узлов экипажной части ТПС, включая вибродиагностику подшипников качения (якорных и буксовых), тяговых электродвигателей, дизель-генераторных установок и других компонентов. Значимую роль в этом процессе сыграли: Д. А. Носырев, А. Ю. Коньков, В. Н. Балабин, Н. Н. Простотин, П. А. Васин, А. Н. Головаш, С. Г. Шантаренко, В. Ю. Тэттер и другие.

Высокий уровень эксплуатационной безопасности железнодорожного транспорта требует дальнейшего совершенствования технологий и расширения

применения видов (методов) НК. Данный инструмент играет ключевую роль в обеспечении качества ремонта деталей и узлов ТПС, а также оценки их технического состояния в процессе эксплуатации. Контролю подлежат различные узлы и элементы ТПС. При этом аварийные ситуации на железнодорожном транспорте сопряжены с серьёзными человеческими жертвами, значительными материальными потерями, а также экологическими и техногенными последствиями.

В период проведения исследований существовавшие виды (методы) НК объектов ремонта, как правило, характеризовались низкой производительностью, увеличенными расходами, ориентацией на профессиональные навыки операторов и влиянием субъективных человеческих факторов. Информационная ценность таких видов (методов) зачастую была ограниченной. Ручная обработка данных, полученных в ходе НК, занимала значительное время, что становилось причиной задержек в принятии решений, направленных на предотвращение возможных инцидентов. Существенной возможностью для повышения точности идентификации дефектов является использование дополнительных характеристик, таких как индикатриса рассеяния, что позволяет более эффективно анализировать повреждения.

Перечисленные проблемы демонстрируют, что традиционные виды (методы) НК, несмотря на их актуальность, в полной мере не удовлетворяют современным требованиям к эффективности, точности и оперативности контроля. Затянутость обработки данных и большая зависимость от профессионального уровня специалистов создают дополнительные риски, особенно в ситуациях, где скорость принятия решений имеет огромное значение. Использование новых подходов, в том числе анализа вторичных характеристик дефекта, открывает возможности для повышения информативности и надежности систем диагностики – индикатрисы рассеяния (ИР) – действительно открывает новые перспективы для повышения достоверности и информативности при идентификации дефектов.

В этом контексте на первый план выступает необходимость компьютеризации средств НК, что не только потенциально сократит время обработки данных, но и уменьшит влияние «человеческого фактора» за счёт автоматизации процессов. Разработка и внедрение высокотехнологичных инструментов на базе современных вычислительных технологий позволят не только улучшить качество контроля, но и естественно расширить методическое обеспечение данного направления.

Таким образом, переход к автоматизированным и интеллектуализированным системам НК не просто актуален, а жизненно необходим. В следующем подразделе мы подробно рассмотрим, как внедрение соответствующих технологий и средств НК и их методическое обеспечение могут кардинально изменить подходы идентификации дефектов, повысив информативность ТП ремонта участков НК при ТПП в СЛД и общую надежность объектов ремонта (контроля).

Как было упомянуто ранее, для повышения информативности ТП с целью оценки состояния элементной базы ТПС в процессе ремонта необходимо учитывать как данные классического технического диагностирования, так и перспективные цифровые и компьютеризированные технологии и средства НК, который представляет собой один из важнейших инструментов для извлечения объективной информации о фактическом техническом состоянии ТПС. Дополнительно использование промышленных 3D-решений позволяет создавать ЦД объектов ремонта без непосредственного участия человека. Тем не менее окончательное решение о пригодности изделия по-прежнему остается за квалифицированным специалистом.

1.5.3 Цифровизация и компьютеризация средств неразрушающего контроля и его методическое обеспечение

Цифровые и компьютеризированные технологии и средства НК при ремонте ТПС позволяют исключить чрезмерную длительность технологических операций и снизить ручной процесс диагностирования. Это достигается путем применения

автоматизированных приборов и цифровых процессов мониторинга, анализа и обработки данных на основе ЦД объектов ремонта (контроля) без непосредственного участия человека, что позволяет получить информацию о фактическом состоянии единицы подвижного состава на всех этапах жизненного цикла.

Потенциал автоматизированного контроля и цифровой адаптации вышеуказанных процессов осуществляется за счет проведения диагностического контроля и программного мониторинга результатов без непосредственного участия человека, однако за человеком остается право принятия окончательного решения. Реализация данного функционала позволяет раскрывать потенциал использования подвижного состава (ПС) исходя из его фактического состояния для коррекции сроков и объемов ремонта, который, как правило, имеет фактический остаточный ресурс выше заложенного в НТД, а основными ожидаемыми технологическими эффектами должны стать:

– автоматизация, информатизация и цифровая адаптация процессов ручного труда;

– повышение эффективности операционных процессов производства путем создания аналитических инструментов и информационно-аналитических сервисов, оптимизирующих внутренние процессы;

– повышение достоверности передаваемой информации как основы для принятия решений, за счет развития и применения математической обработки данных;

– совершенствование структуры информационных потоков (включая систему документооборота);

– получение более рациональных вариантов решения задач управления за счет внедрения эффективных и сложных математических алгоритмов обработки данных;

– автоматизация планирования работ на основе комплексного диагностирования и мониторинга, предиктивного (прогнозного) анализа состояния ПС на среднесрочный и долгосрочный периоды за счет проведения оценки стоимости их жизненного цикла;

– повышение эффективности взаимодействия со смежными подразделениями транспортной отрасли и синхронизация единого информационного пространства;

– снижение затрат на обслуживание и ремонт ПС в целом.

Важно помнить, что экономические условия в некоторых случаях могут требовать использования недорогих и информативных видов (методов) НК, которые, хотя и обладают ограниченными сервисными возможностями, отличаются простотой и надежностью в интерпретации результатов. Также следует учитывать, что традиционные виды (методы) НК, для которых разработаны устойчивые теоретические основы и эффективные технологические подходы, останутся наиболее востребованными и будут применяться в значительных объемах.

Рассмотрим организацию ремонтной системы на морском транспорте. В судостроении процессы ремонта и технического обслуживания регламентируются стандартом ГОСТ 24166–80 [271], который определяет совокупность взаимосвязанных элементов, включая технические средства, материалы, документацию, исполнителей и другие ресурсы, обеспечивающих необходимые условия для поддержания и восстановления заданных параметров технико-эксплуатационных характеристик судов, входящих в эту систему. Классификация стратегий ремонта, применяемых в практике эксплуатации транспорта, представлена на рисунке 1.31.

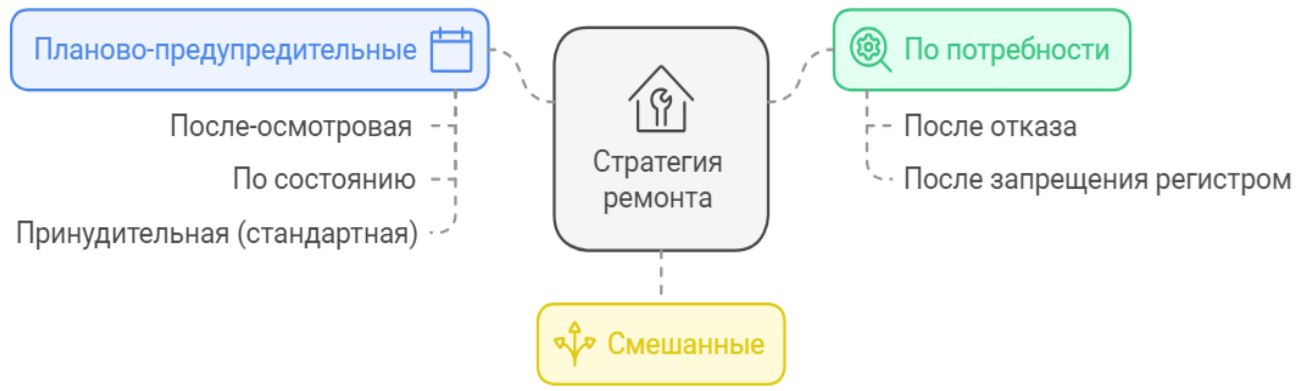


Рисунок 1.31 – Основные показатели надежности машиностроительного изделия

Согласно данным аналитического отчета [272], в котором был проведен анализ состояния флота и аварийности судов, находящихся под классификацией Морского Регистра на протяжении 25 лет, наиболее уязвимой частью судов всегда являлся их корпус. Срок службы судна в целом определяется износом корпуса. Различные виды оборудования, за исключением систем забортной воды, в процессе эксплуатации, как правило, не исчерпывают свой ресурс. После проведения реновации корпуса Морской Регистр не ограничивает дальнейший срок эксплуатации отдельных видов механического оборудования при отсутствии дефектов [47].

Стратегия «ремонта по состоянию» представляет собой дальнейшее усовершенствование базовой системы ремонта и основана на определении текущего состояния элементов, узлов и деталей судна с использованием методов диагностики, что исключает необходимость их разборки.

В железнодорожном и транспортном машиностроении проблематика мониторинга технического состояния объектов подробно исследовалась в трудах таких ученых, как А. А. Воробьев, А. В. Горский, А. М. Замышляев, А. Н. Головаш, А. П. Семенов, А. С. Космодамианский, А. Т. Бурков, А. Т. Осяев, В. А. Смирнов, В. А. Четвергов, В. М. Бочаров, В. Н. Игин, В. П. Феоктистов, В. Т. Стрельников, И. П. Исаев, С. М. Овчаренко и других.

В настоящее время приоритетным является контроль работы оборудования по передаваемым показателям работы их узлов и агрегатов ТПС [273–277] путём установки в них соответствующих датчиков и подключения в общую диагностическую систему через микропроцессорную систему, показывающую состояния работы элементов электрооборудования, дизель-генераторных установок, тяговых электродвигателей и систем комфортного проезда. Для комплексного решения диагностирования рельсового железнодорожного транспорта необходимо также мониторить состояние элементов экипажной части (тележки, кузов, силовой каркас и т. д.) с применением технологий и средств видов (методов) НК (рисунок 1.32).

Рисунок 1.32 – Система диагностики для оперативного контроля технического состояния тягового подвижного состава

В настоящее время остается преждевременным внедрение предиктивного ремонта и учет фактического технического состояния ТПС при планировании объемов ТОиР. Основной причиной этого является ограниченная диагностическая пригодность данных, получаемых с электронных топливомеров. Данные приборы не позволяют решить задачи контроля расхода топлива и мониторинга технического состояния тепловозов, что особенно актуально для ТПП при ремонте ТПС.

В 2008 году производство новой техники, способной решать подобные задачи, стало развиваться: ОАО «Коломенский завод» выпустил тепловозы ТЭП70У, а Луганский тепловозостроительный завод начал серийное производство тепловозов нового поколения ТЭП70А (позднее переименованных в ТЭП70БС) и грузовых тепловозов 2ТЭ116У. Это стало началом масштабной программы модернизации тепловозного парка ОАО РЖД. Основной особенностью новой техники стало внедрение бортовых микропроцессорных систем управления [278].

Эти нововведения создали возможность круглосуточного контроля и накопления измерительной информации, благодаря чему специалисты получили инструмент анализа состояния основных узлов тепловозов. Это поспособствовало оптимистичным ожиданиям внедрения интеллектуальных технологий в процессы

ТОиР. Однако большинство усилий было сосредоточено на использовании уже полученных данных, что воспринималось скорее, как техническая задача, тогда как разработка новых методов их обработки оставалась на периферии внимания [279–282].

В 2012 году, под руководством профессора И. К. Лакина была разработана «Концепция АСУНТ» [21]. Данная система включала три основные контура: управление инцидентами, управление проблемами и повышение уровня сервиса. Основой АСУНТ стал мониторинг состояния оборудования и режимов эксплуатации локомотивов. Любые отклонения текущего состояния локомотива от НТД признавались «инцидентами» и требовали выполнения корректирующих мероприятий. На втором уровне системы – контуре управления проблемами – накопленные данные анализировались, чтобы выявить причины частых инцидентов, что позволяло вырабатывать стратегические решения для устранения повторяющихся проблем и улучшения взаимодействия с владельцами локомотивного парка.

В 2013 году в сервисных депо ООО «ЛокоТех» была создана расширенная структура диагностических групп, задачами которых стали контроль аппаратных средств системы мониторинга, ресурсосберегающих технических средств, учет и анализ режимов эксплуатации локомотивов, а также оценка качества проведенных ремонтных работ. Эти направления позволяли выявлять предотказные состояния ключевого оборудования локомотивов, что стало перспективным шагом к учету их фактического состояния при планировании ТОиР. Внедрение концепции «предиктивного ремонта» рассматривалось как способ снизить затраты на обслуживание. Однако, как показал опыт работы, накопленные данные часто оказывались избыточными для решения задач управления силовыми установками и диагностики оперативного состояния локомотивов, но в то же время недостаточными для окончательного перехода к моделям предиктивного ремонта.

Основное препятствие на пути к внедрению предиктивных технологий, как полагают специалисты компаний ООО «ЛокоТех», ООО СТМ-Сервис,

ОАО «РЖД» и других, заключалось в низком уровне квалификации персонала, выполняющего анализ данных. В частности, генеральный директор АО «Трансмашхолдинг» К. В. Липа отметил, что, несмотря на наличие прогрессивных микропроцессорных систем, места для хранения данных и теоретической возможности их обработки, отрасль сталкивается с нехваткой математических моделей, инструментов работы с большими объемами данных и эффективных систем передачи информации в аналитические центры в режиме реального времени [283].

Для решения подобных задач с 2016 года реализуется проект «Умный локомотив» [284, 285]. Следует отметить, что по состоянию на 2021 год, первые этапы проекта не привели к прорыву в предиктивном управлении ТОиР. По данным из отчетов, наиболее эффективной из диагностируемых систем остается дизельная установка, на которую приходится порядка 34,2 % всех выявляемых неисправностей. Однако даже эти данные, в большинстве случаев, выявляются штатными средствами контроля локомотивных бригад, без использования дополнительной диагностики [286].

Таким образом, текущий уровень развития инструментов бортовой диагностики и аналитики позволяет решать отдельные задачи оперативного контроля, но не обеспечивает полноценного перехода к практике предиктивного ремонта из-за ограничений в обработке данных, квалификации персонала и нехватки методологических решений для анализа большого объема информации. Это объясняется тем, что алгоритмы обнаружения указанных признаков являются достаточно простыми и не основаны на технологиях *Big Data*.

Большая часть повреждений [286], возникает в результате нарушений технологии ремонта деталей, узлов и систем дизель-генераторной установки в процессе их ТОиР, а также вследствие их внезапных отказов. Часть отказов может быть предотвращена благодаря анализу существующих данных об объекте ремонта. При этом данная информация не позволяет получить полное представление о техническом состоянии деталей и узлов, систем дизель-

генераторной установки, которые действительно ограничивают её надежность, межремонтные пробеги, объемы ремонта и влияют на затраты ТОиР. К их числу относят:

– подшипники коленвала;

– состояние распределительного редуктора (69-ая группа);

– газораспределительный механизм;

– газовоздушный тракт;

– подшипники ротора турбокомпрессора;

– центробежный фильтр и другие агрегаты [270].

Обозначенная проблема показывает важность системного подхода к повышению эффективности ТПП при освоении ремонта ТПС и выбору контролируемых параметров для эффективного осуществления предиктивной диагностики. Ограниченность контролируемых параметров.

1. Исторически сложившаяся структура данных: существующие системы управления локомотивами были разработаны с акцентом на решения, направленные на контроль состояния силового оборудования. Это привело к тому, что многие ключевые параметры, оказывающие влияние на общую работоспособность и надежность локомотивов, не входят в перечень контролируемых величин. Обычно в данный включаются такие параметры, как температура, напряжение, ток и другие технологические характеристики, что, в свою очередь, ограничивает целостное восприятие технического состояния ПС в целом.

2. Недостаточная оценка эксплуатационных характеристик: ограниченный набор для мониторинга препятствует выявлению потенциальных отказов на ранних стадиях. Например, изменения условий эксплуатации, нагрузок или внешней среды могут оказывать значительное влияние на производительность, однако отсутствие соответствующих систем мониторинга может привести к серьезным техногенным авариям. Предиктивная диагностика требует проведения анализа дополнительных параметров, таких как вибрация, шум, а также объективные данные о техническом

состоянии деталей и узлов (элементы экипажной части (тележки, кузов, силовой каркас и т. д.)) ТПС. Таким образом, необходимость расширения перечня контролируемых параметров представляется очевидной для разработки методологии повышения эффективности ТПП при ремонте ТПС в СЛД путем повышения информативности ТП ремонта участков НК [27, 287–289].

Ситуация может измениться с ростом количества локомотивов, обслуживаемых в рамках КЖЦ [290, 291]. Следует отметить, что в отличие от опыта зарубежных производителей (*Siemens*, *General Electric*, *General Motors* и другие), которые берут на себя обслуживание локомотивов на протяжении всего их ЖЦ, в рамках отечественной модели обслуживания локомотивов, приобретенных по КЖЦ, предполагается использование ресурсов сервисных компаний, которые не имеют финансовой зависимости от производителей локомотивов [292].

В данной работе акцентируется внимание на неизбежной необходимости углубленной автоматизации процессов, связанных с НК, путем активного внедрения и использования автоматизированных приборов и цифровых методов мониторинга, анализа и обработки данных. Это должно осуществляться на основании создания ЦД объектов ремонта и контроля, что позволит исключить непосредственное участие человека в процессе получения сведений о фактическом состоянии единицы ПС на всех стадиях его ЖЦ. Такой подход может значительно повысить эффективность процессов, обеспечивая более точное и оперативное отслеживание состояния оборудования и оптимизацию его эксплуатации.

Разработка полностью автоматизированных систем, обеспечивающих минимизацию участия человека, представляет собой важный шаг в повышении безопасности и эффективности процедур обслуживания при ТПП в СЛД. Историческая эволюция технологий и средств видов (методов) НК проявляется в переходе от простых визуальных осмотров к сложным системам, использующим ультразвуковые волны, радиацию и компьютерные технологии.

1.5.4 Промышленные 3D-технологии для визуально-оптического контроля и разработки цифровых аналогов

Разделение устройств на контактные и бесконтактные подчёркивает их специфические применения и преимущества в зависимости от типа материала и условий использования (рисунок 1.33).

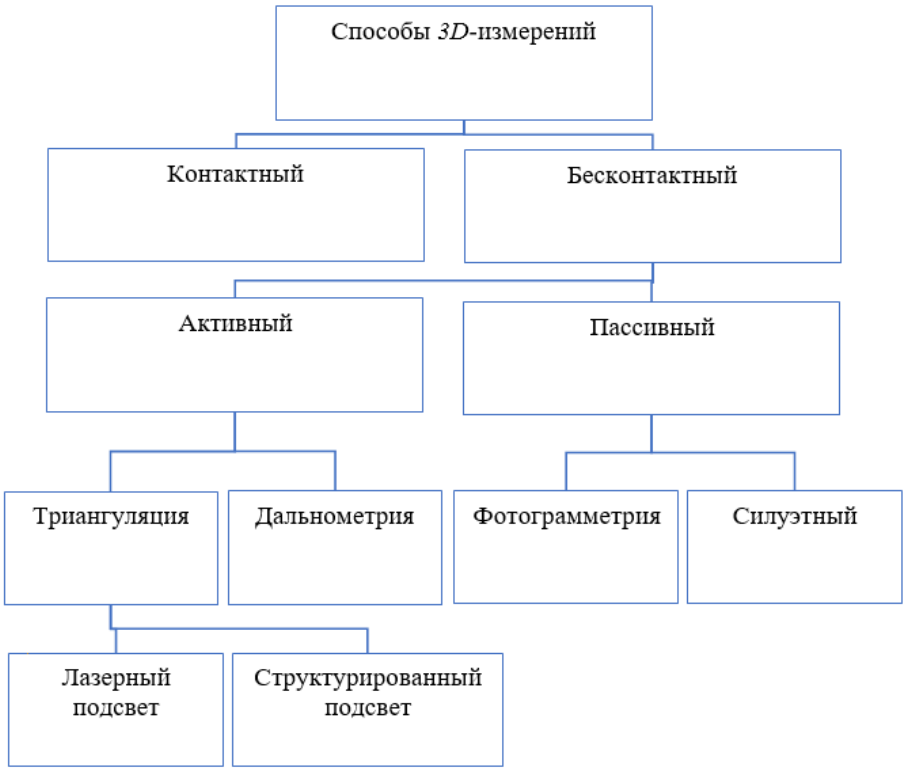


Рисунок 1.33 – Способы 3D-измерений

Современные координатно-измерительные машины (КИМ) действительно обладают высокой точностью, что делает их идеальными для детального и точного сканирования объектов, однако их использование может быть ограничено временем, необходимым для получения облака точек. Это их основное отличие от более мобильных и быстрых бесконтактных 3D-сканеров, которые, несмотря на меньшую точность, обеспечивают более гибкий и быстрый процесс сканирования. Бесконтактные сканеры удобны тем, что могут работать с различными типами материалов, тогда как контактные сканеры предпочтительнее для твердых объектов, что связано с их принуждением к физическому взаимодействию с

поверхностью.

Ручной 3D-сканер *ZScanner* 700 демонстрирует как технологию лазерного сканирования, так и простоту в использовании, позволяя оператору обойти объект на 360 градусов. Это выражается в довольно высокой скорости получения информации: 15 трехмерных поверхностей в секунду, что подходит для динамичных процессов, где время имеет значение. После выполнения сканирования данные обрабатываются с использованием специализированного программного обеспечения для создания полигональной 3D-модели, которая играет ключевую роль в процессе разработки цифровых моделей.

В то же время оптическая система *GOM ATOS* II, основанная на методе структурированного света, обеспечивает более надежную и качественную съемку. Установка на штативе в сочетании с использованием поворотного столика позволяет получать изображения высокой четкости с минимальными искажениями, что делает эту систему особенно подходящей для работы со статичными объектами, где требуется высокая точность.

Координатно-измерительная машина *FARO EDGE* представляет собой универсальное устройство, которое объединяет лучшие качества как контактных, так и бесконтактных сканеров (рисунок 1.34).

Рисунок 1.34 – Координатно-измерительная машина FARO EDGE

Мобильность позволяет использовать ее в различных условиях, а улучшенная конструкция обеспечивает точность, что делает ее отличным выбором

для широкого спектра применений в промышленности и научных исследованиях. Таким образом, выбор между различными системами сканирования зависит от специфики задачи, требуемой точности и типа обрабатываемого материала.

Интеграция температурных датчиков, а также датчиков сдвига не только обеспечивают корректировку данных, но и значительно улучшают точность установки КИМ. Это позволяет существенно увеличивать надежность измерений, особенно в условиях, когда важно учитывать влияние внешних факторов, таких как температура и механические колебания.

Наличие сенсорного компьютера с интуитивно понятным интерфейсом позволяет операторам проводить измерения быстро и эффективно, без необходимости обращения к стационарным устройствам.

Координатно-измерительная машина *TESA MICROHITE* является интересным примером сочетания портативности и точности. Она может функционировать в роли как контактного сканера, так и универсального измерительного инструмента, который подходит для разнообразных применений.

Конструкция модели КИМ-750 от компании ООО «Лапик» демонстрирует инновационный подход с упором на прочность и стабильность. Шесть степеней свободы рабочего органа позволяют обеспечивать более сложные и точные измерения, что делает данную технологию особенно привлекательной для высокоточных задач. Изоляция измерительного механизма от силовой системы минимизирует возможные погрешности, что, в свою очередь, повышает надежность и долговечность устройства.

Методы сканирования, такие как безмаркерный и маркерный, действительно играют важную роль в определении условий и качества получаемых данных. Использование фотограмметрии и алгоритмов распознавания текстуры открывает широкие возможности, но требует определенных условий для успешной реализации. Что касается классификации сканеров по размерам объектов, то это разделение крайне полезно, так как оно учитывает специфику процессов и

понимание масштабов работы с различными объектами.

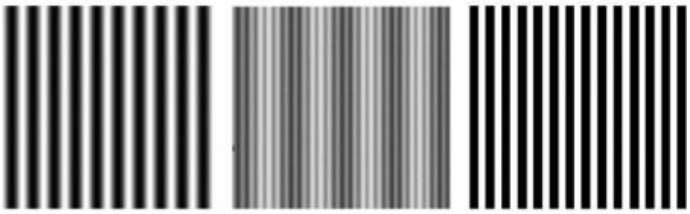
Проблема с отражающей способностью поверхностей, как вы отметили, также является важным аспектом при сканировании. Применение матирующих спреев может значительно повысить качество сканируемых данных, однако в промышленных условиях, где требуется высокая скорость обработки и постоянство производственно-технологических процессов, эта опция часто оказывается невозможной. В таких ситуациях важна разработка альтернативных методов, которые обеспечат качество без изменения свойств обрабатываемого материала.

Когда речь идет о производстве локомотивов, высокие такты обработки и сборки делают невозможным использование временных изменений на поверхности. Это требует от системы сканирования высокой скорости и точности, что снова подчеркивает важность применения специализированного оборудования, такого как лазерные трекеры, для отслеживания перемещения устройства.

Таким образом, все вышеописанные характеристики и технологии подчеркивают многообразие подходов, используемых в современном измерительном оборудовании, и их важность для достижения высокой точности и эффективности в процессе сканирования.

Технологии трехмерного сканирования опираются на различные физические принципы, включая явления геометрической оптики, такие как отражение, дифракция, интерференция и дисперсия света.

Метод сканирования, основанный на структурированном подсвете (ССП), значительно отличается от лазерного метода сканирования (ЛС) и является усовершенствованной версией фотограмметрии. В этом случае вместо фактического 3D-сканирования поверхности объекта ремонта, производят проецирование двумерной модели, которая создана некогерентным источником света. Это приводит к приводит к специфическим узорам. Когда узор подается на криволинейную поверхность, он искажается (рисунок 1.35).



а) б) в)

а) синусоидальные полосы; *б*) совпадение 2-х синусоидальных полос (с разными частотами); *в*) проекция полос (прямоугольный профиль)

Рисунок 1.35 – Стандартные проецируемые узоры (линии разной толщины)

Отраженный свет затем фиксируется одной (при использовании монокамеры) или двумя (при применении стереокамер) камерами, после чего, используя метод триангуляции, рассчитывается расстояние до объекта (рисунок 1.36).

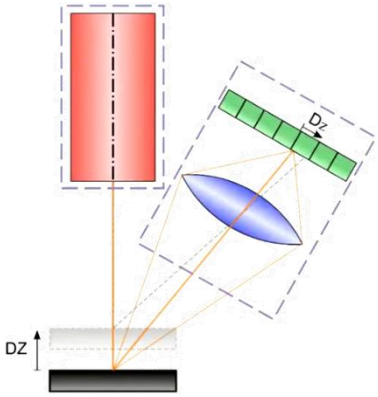


Рисунок 1.36 – Схема триангуляции

Технология 3D-сканирования представляет собой процесс сбора данных о форме и внешнем виде реального объекта с целью создания его цифровой трехмерной модели. В этом процессе ключевую роль играет метод триангуляции, который позволяет точно определять пространственные координаты поверхности объекта.

Основная идея метода заключается в использовании света (обычно лазерного), который проецируется на сканируемую поверхность. 3D-сканер фиксирует отражённый свет и определяет расстояния до различных точек поверхности на основе угла, под которым свет попадает на приёмные сенсоры. Эти

измерения формируют облако точек, которое служит основой для дальнейшей обработки.

3D-сканер как инструмент для выполнения этой задачи может использовать различные технологии, включая лазерное сканирование и фотограмметрию. Полученные данные затем обрабатываются с помощью специализированного программного обеспечения, что позволяет создавать точные полигональные модели, которые могут быть использованы в различных областях, таких как архитектура, производство, медицина и искусство.

Таким образом, 3D-сканирование открывает новые возможности для визуализации, анализа и воспроизведения реальных объектов в цифровом формате.

В отличие от лазерного сканирования, метод ССП обеспечивает захват прямоугольной области, содержащей большее количество точек, чем может быть зафиксировано линейным лазером. Однако следует отметить, что частота когерентного источника излучения (лазера) превышает таковую у ламповых проекторов или проекторов, работающих на основе светодиодной техники (*DLP*), что приводит к схожему времени сканирования для обоих методов (рисунок 1.37).

Рисунок 1.37 – Лазерный подсвет

Современные 3D-сканеры, такие как лазерные, используют проекцию лазерных линий на объект с последующей регистрацией отраженного света. Этот метод позволяет захватывать не только форму, но и детали, которые трудно визуализировать другими способами, например, рельеф поверхности или мелкие

элементы. Кроме того, результатом работы лазерного сканера является плотное облако точек, что значительно повышает степень детализации.

Наивысшая точность сканирования достигается в монохромном режиме, по сравнению с цветным. Это объясняется передачей информации о цвете между различными длинами волн и возникновением муара, что в дальнейшем устраняется системой. Следовательно, предпочтение отдается монохромному режиму или сканированию в градациях серого, когда требуется работа с объектами, обладающими высокой детализацией.

Калибровку 3D-сканера выполняют перед началом сканирования, настраивая аппаратуру на соответствующую зону контроля. При этом разрешение 3D-сканера выражается через выражение (1.1):

$$\Delta\varphi(\Delta\theta) = \frac{180d}{1,41\pi S} \quad , \tag{1.1}$$

где S – расстояние от лазера до объекта ремонта; d – min размер объекта ремонта для выбранной зоны сканирования; φ и θ – угловые разрешения 3D-сканирования относительно плоскости X и Y (рисунок 1.38).

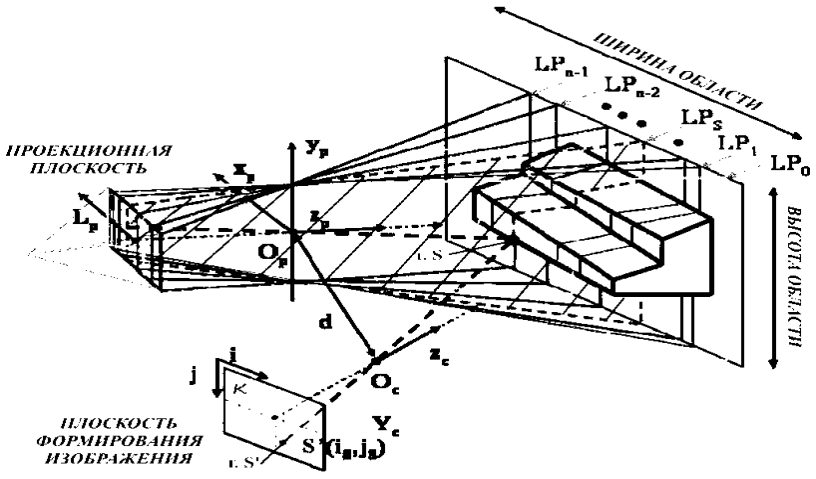


Рисунок 1.38 – Схема 3D-сканирования

Результатом при любом 3D-сканировании будет являться информация, которая описывает набор параметров по 3-м координатам (X, Y, Z) в сферической системе координат, выражающимся через углы наклона по вертикали и

горизонтали [293].

Данные величины преобразованы в декартовые координаты по формуле 1.2.

$$\begin{cases} X = R\cos\varphi\sin\theta \\ Y = R\cos\varphi\sin\theta \\ Z = R\cos\varphi\sin\theta \end{cases}, \quad (1.2)$$

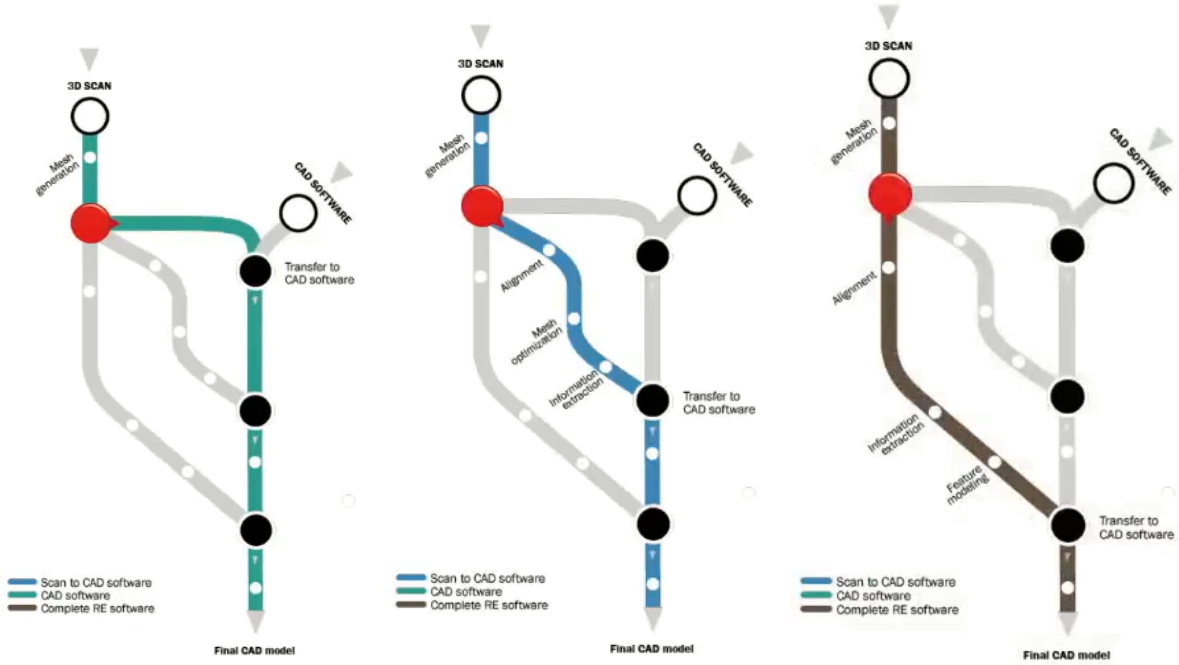
где x, y и z – координаты точек (конечные) вектора расстояния r до объекта ремонта; φ – горизонтальный угол наклона; θ – вертикальный угол наклона [293].

Таким образом, в то время как традиционные методы предоставляют лишь ограниченные данные о физических объектах, современные 3D-сканеры предлагают широкий диапазон возможностей для захвата сложных геометрий с высокой точностью, что делает их более эффективными для множества приложений в сравнении с устаревшими методами.

1.5.4 Этапы реверс-инжиниринга и создания 3D-модели при ремонте тягового подвижного состава

Технология реверс-инжиниринга и создания 3D-модели можно условно разделить на три ключевых направления (рисунок 1.39): а) реверс-инжиниринг в одной системе *CAD* представляет собой процесс моделирования, который осуществляется в рамках одного программного обеспечения. Это означает, что пользователям не требуется изучать дополнительные программы для выполнения задач, связанных с реверс-инжинирингом. Все изменения, которые вносятся в проект, эффективно сохраняются в дереве построений, что упрощает управление моделями и их редактирование. Однако стоит отметить, что функционал работы с результатами сканирования может быть ограничен. Это включает в себя такие задачи, как анализ поверхностей, размещение 3D-скана в определённой системе координат, извлечение сечений и доработка 3D-сканированных моделей, включая заделку отверстий, очистку и оптимизацию; б) использование вспомогательного программного обеспечения для перехода от 3D-скана к *CAD* представляет собой

более экономически эффективный подход по сравнению с применением специализированного программного обеспечения для реверс-инжиниринга. Вспомогательные программы часто уже включают в себя некоторые функции, необходимые для работы с данными 3D-сканеров, что делает процесс более доступным. Кроме того, специалисты могут быстрее и проще адаптироваться к этому ПО, чем к специализированному, что значительно ускоряет обучение и уменьшает время на освоение. Однако данный подход также имеет свои недостатки. Например, может возникнуть необходимость «прыгать» между вспомогательным программным обеспечением и CAD-системой, если в процессе моделирования потребуется дополнительная информация, которая не была извлечена из 3D-скана. Это может привести к дополнительным временным затратам и усложнению рабочего процесса; в) реверс-инжиниринг с использованием специализированного программного обеспечения предлагает мощные инструменты для работы с полигональными сетками, что позволяет эффективно редактировать, оптимизировать и анализировать эти сетки. Эти инструменты также дают возможность выставления в системе координат, получения сечений и извлечения необходимой информации, что делает процесс более детализированным. Важно отметить, что на протяжении всего процесса реверс-инжиниринга осуществляется анализ точности CAD-модели, что помогает гарантировать высокое качество конечного продукта. На завершающем этапе разработанная модель с сохранением дерева построений может быть экспортирована в классическую CAD-систему для подготовки конструкторской документации, что упрощает переход на следующий уровень проектирования. Однако использование специализированного ПО может требовать от специалистов изучения новых программ, что иногда является препятствием. Кроме того, такой софт может иметь ограниченный или усложненный функционал, особенно в области моделирования литьевых и тонколистовых деталей, а также построения сложных поверхностей А-класса, что может создавать дополнительные трудности в процессе работы.



а) Реверс-инжиниринг в CAD:
- ✓ Весь процесс моделирования
- ✓ осуществляется в одном ПО;
- ✓ Нет необходимости в изучении дополнительного ПО для реверс-инжиниринга;
- ✓ Все внесенные изменения сохраняются в дереве построений
- ✓ Часто ограниченный функционал по работе с результатом сканирования:
  - анализ поверхностей;
  - выставление 3D-скана в системе координат;
  - извлечение сечений;
  - доработка 3D-скана: зашивка дыр, очистка, оптимизация

б) Использование вспомогательного ПО для перехода от 3D-скана к CAD:
- ✓ Менее дорогостоящий в сравнении со специальным ПО для реверс-инжиниринга;
- ✓ Часть необходимых функций могут быть доступны уже в ПО для работы с 3D-сканером;
- ✓ Более простой и быстрый процесс адаптации специалиста в сравнении с использованием специального ПО для реверс-инжиниринга
- ✓ Необходимость «прыгать» между вспомогательным ПО и ПО для CAD-моделирования, если в процессе моделирования возникла необходимость в дополнительной информации, которая не была извлечена из 3D-скана во вспомогательном ПО

в) Реверс-инжиниринг в специальном ПО:
- ✓ Наличие мощных инструментов для редактирования и оптимизации полигональной сетки, ее анализа, выставления в системе координат, получении сечений и извлечении прочей необходимой и достаточной информации;
- ✓ Анализ точности CAD-модели на протяжении всего процесса реверс-инжиниринга;
- ✓ На финальном этапе модель с деревом построений может быть экспортирована в классическую CAD-систему для подготовки КД
- ✓ Необходимость в изучении нового ПО для специалиста;
- ✓ Часто ограниченный/ усложненный функционал по моделированию литьевых, тонколистовых деталей, построении сложных поверхностей **А-класса**

Рисунок 1.39 – Процесс реверс-инжиниринга в задачах технологической подготовки производства при техническом обслуживании и ремонте тягового подвижного состава

В случае цветного сканирования есть возможность наложения текстуры (рисунок 1.40).

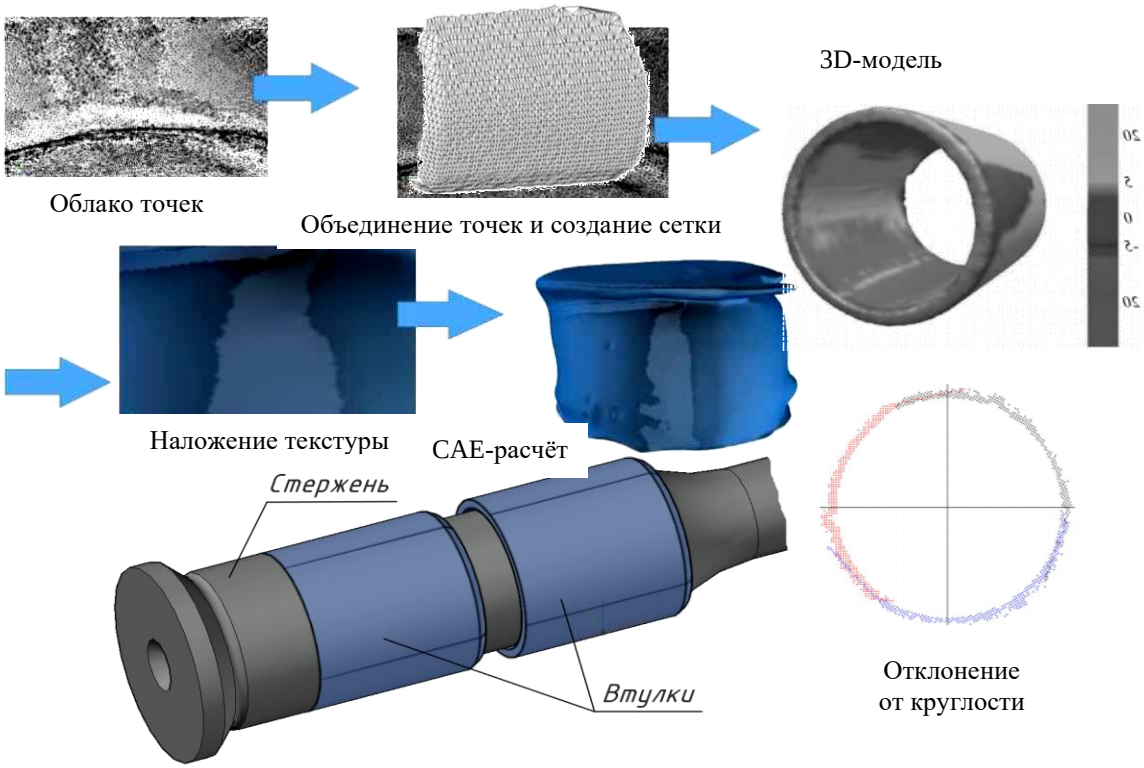


Рисунок 1.40 – Этапы последовательного получения 3D-модели полиамидной втулки после длительной эксплуатации и значительной выработке внешней поверхности

Поверхности А-класса играют ключевую роль в процессе реверс-инжиниринга, особенно в областях, связанных с созданием высококачественных 3D-моделей, таких как автомобилестроение, аэрокосмическая промышленность и промышленный дизайн. Эти поверхности обеспечивают гладкость и высокую степень детализации, которые необходимы для создания эстетически привлекательных и функциональных объектов.

В контексте реверс-инжиниринга, где цель заключается в воссоздании физического объекта в цифровом формате, работа с поверхностями А-класса имеет несколько важных аспектов. Прежде всего, поверхности должны обладать определенными геометрическими свойствами, такими как непрерывность и однородность, что важно для использования в CAD-системах. Это позволяет избежать проблем, связанных со стыковкой и интеграцией различных компонентов в процессе проектирования.

В реверс-инжиниринге применяются гибридные подходы для получения поверхностей класса А. Это достигается объединением в одном процессе 3D-сканирования высокоточных сканеров для создания исходного облака точек и специализированного ПО для обработки полученных данных. В качестве примера можно привести следующие программы: *Rhinoceros, Z-Brush, Blender, Mudbox* от *Autodesk, Maya* или *3ds Max, Geomagic X, PolyWorks, MeshLab*, среди других интересных приложений можно отметить *3D-Coat*), могут включать в себя инструменты для ретопологии и генерации NURBS-поверхностей, что позволяет создавать гладкие и непрерывные поверхности. Каждое из этих приложений имеет свои уникальные особенности и возможности, позволяя художникам и дизайнерам выбирать те инструменты, которые лучше всего соответствуют их требованиям и предпочтениям в работе. Использование этих программ в комбинации с другими инструментами для 3D-моделирования позволяет создавать впечатляющие и качественные визуальные работы.

Также работа с поверхностями А-класса требует тщательного контроля за качеством каждой стадии проекта. Необходимо проводить анализ и верификацию, чтобы убедиться, что полученные поверхности соответствуют оригинальным образцам по всем критериям, будь то эстетические или функциональные характеристики.

Наконец, важно отметить, что технологии машинного обучения и искусственного интеллекта также начинают оказывать влияние на процессы, связанные с реверс-инжинирингом и созданием поверхностей А-класса. Эти технологии могут помочь в автоматизации некоторых этапов обработки данных, повышая эффективность и точность результатов.

Таким образом, работа с поверхностями А-класса в реверс-инжиниринге не только улучшает визуальные и функциональные качества конечного продукта, но и позволяет интегрировать современные технологии для достижения наилучших результатов.

1.6 Выводы по разделу 1

В первой части работы проанализированы теоретические исследования, описывающие существующие подходы к освоению производства, определенные национальными и отраслевыми стандартами, этапность и происходящие в рамках данной деятельности внутренние процессы.

В первом разделе диссертационного исследования выполнен анализ текущего состояния проблем железнодорожного транспорта Российской Федерации, отмечены достоинства и недостатки технического и технологического отставания России по уровню железнодорожной техники.

Показаны существующие современные технологии, которые позволяют их улучшить и добиться повышения информативности и эффективности ремонта. Отдельно показана возможность повышения информативности процессов ремонта за счёт применением современных технологий и средств комплексного НК и 3D-промышленных решений. Отмечено, что техническая подготовка производства при освоении ремонта ТПС идет по пути цифровизации с использованием ЦД и повышения ее эффективности путем применения передовых технологий ремонта и объективного контроля, обеспечивающих верификацию всех контролируемых параметров объектов ремонта и производственно-технологических процессов, исключая человеческий фактор при принятии окончательного решения по отбраковке продукции.

В данном разделе проведён анализ факторов, оказывающих существенное влияние на эксплуатационную надежность ТПС, а также причины повреждений и износа элементов экипажной части локомотива. Произведена оценка влияния конструктивно-технологических факторов качества на дефектность деталей и узлов ТПС. Показано, что важно учитывать как внутренние факторы (например, соблюдение технологии ремонта и квалификацию персонала), так и внешние (качество используемых материалов и условия эксплуатации).

Отмечено, что по истечению времени ТПС теряет свою работоспособность,

что как следствие влияет на надежность работы всего парка локомотивов. Для сохранения устойчивой работы – парка требуется ТПП при освоении ремонта различных серий ТПС в СЛД.

Показано, что системы подвешивания являются ключевыми элементами экипажной части электровозов, обеспечивая безопасность, комфорт и эффективность работы в эксплуатации. Также обеспечивают улучшенное управление, комфорт и долговечность экипажной части, что делает их незаменимыми в современных условиях эксплуатации.

Отмечено, что для повышения эксплуатационной надежности и технического состояния ТПС требуется совершенствование технической готовности производства. Это может быть достигнуто путём разработки и внедрения современных ТП и специализированного ремонтного и диагностического оборудования в локомотивных депо.

Кроме того, исследования таких авторов, как В. Д. Авилов, В. И. Киселев, А. К. Гурвич и других, посвящены разработке и совершенствованию систем НК и технической диагностики локомотивов, что имеет важное значение для повышения эффективности ТПП.

Таким образом, на основе комплексного анализа современного состояния вопросов технической готовности производства при освоении ремонта ТПС в настоящем исследовании были сформулированы цели и задачи, направленные на системное повышение ТПП при воздействии различных факторов ремонта. Эти цели включают в себя не только повышение уровня надежности и качества ТОиР, но и оптимизацию всех связанных с этим производственно-технологических процессов.

2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ УЛУЧШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Проектирование, функционирование и улучшение сложных производственно-технологических систем представляет собой многогранные задачи, поскольку затрагивает множество аспектов. К числу таких задач относится создание общей структуры системы, обеспечение эффективного взаимодействия между её подсистемами и компонентами, учет воздействия внешних факторов, а также определение наиболее эффективных режимов её работы.

Системный подход, лежащий в основе направлений, как теория организации и системная инженерия, является решением данной задачи [294]. Системная инженерия является многогранным подходом, который фокусируется на разработке инструментов и методов для создания эффективных производственно-технологических систем, соответствующих высоким стандартам эффективности. Она охватывает полный спектр технических процессов, включая разработку, верификацию и интеграцию сбалансированных решений на протяжении всего ЖЦ систем. Этот подход учитывает все аспекты проектирования и интеграции, позволяя комплексно решать задачи, связанные с функционированием и оптимизацией таких систем.

Эффективное управление производственными процессами в современных условиях невозможно без тщательного анализа большого массива данных. Особое значение приобретает использование достоверной, актуальной и полной информации, которая доступна благодаря применению современных технологий, а также научно обоснованных методов для её сбора, обработки и распространения.

Технологии работы с данными, включая их сбор и последующую аналитическую обработку, становятся важнейшим инструментом решения задач, связанных с оценкой надежности и технического состояния ТПС. Особое внимание уделяется систематизации данных о надежности изделий, а также учёту времени наработки до их отказа, что имеет принципиальное значение [295].

Организация процесса сбора информации требует обеспечения непрерывного, периодического или разового наблюдения за объектами. Этот процесс должен базироваться на следующих источниках:

– статистических данных, собираемых предприятиями, выполняющими эксплуатацию и ремонт;

– результатах наблюдений за работой оборудования в реальных условиях эксплуатации;

– а также на информации, полученной посредством чек-листов и методов экспертной оценки.

2.1 Оптимизация производственно-технологических процессов

Вопросы надежности ТПС, технологии ремонта и организации производственного процесса, связанного с их ремонтом, образуют единое и взаимосвязанное поле научных исследований. Эти направления требуют комплексного подхода и глубокой аналитики, и их развитие стало возможным благодаря усилиям множества отечественных ученых, внесших значительный вклад в данную область. Особое внимание стоит уделить таким выдающимся именам, как А. А. Александров, А. А. Воробьев, А. В. Горский, А. В. Кирилюк, А. В. Смольянинов, А. А. Хохлов, Д. Г. Евсеев, Д. И. Хаба, Г. И. Петров, Г. В. Райков, В. А. Ежиков, В. А. Ильин, В. А. Четвергов, В. Б. Шляпин, В. Г. Чурсин, В. И. Киселев, В. И. Сенько, В. Н. Котуранов, В. Н. Цюренко, В.П. Бугаев, В.Ф. Лапшин, В.Ф. Разон, И.В. Лакин, И.Д. Козубенко, И.Ф. Скиба, К. В. Мотовилов, М. И. Харитонов, М. М. Болотин, В. В. Лукин, В.В. Мямлин, В. В. Нигунов, В. В. Коломийченко, Н. З. Криворучко, Н.В. Ответчиков, Н. Г. Мартынюк, П. А. Устич, П. С. Анисимов, С. А. Алехин, С. Г. Шантаренко, С. М. Овчаренко, Ю. А. Лебедев, Ю. С. Бараш, Ю.С. Нодшивалов, А. М. Ножевников, В. С. Наговицын, А. Д. Шишков [296–351] и другие.

Эти выдающиеся исследователи внесли значительный вклад в становление и

развитие крупных научных школ, занимающихся изучением надежности ПС, его ремонта и организации производственного процесса в ряде российских городов, таких как Москва (РУТ (МИИТ), ВНИИЖТ), Санкт-Петербург (ПГУПС), Екатеринбург (УрГУПС), Омск (ОмГУПС), Ростов (РГУПС), Хабаровск (ДВГУПС).

Следует выделить труды, выполненные под руководством профессора, доктора технических наук Д. Г. Евсеева [310], а также А. В. Горского и А. А. Воробьева [202], которые внесли свой вклад в совершенствование методов организации ремонтных процессов. В ПГУПС были созданы научно-технические школы тепловозной и электрической тяги, разработки и надежности ТПС. Данными направлениями руководили такие специалисты, как В. С. Герасимов и А. В. Плакса [322].

В ОмГУПС была создана научно-техническая школа под руководством И. И. Галиева, изучающая безопасность движения, надежность и ТОиР ТПС. Современными представителями данной школы являются И. И. Галлиева, С. М. Овчаренко, В. А. Нехаева, В. А. Николаева, А. А. Раубу, В. А. Четвергов, С. Г. Шантаренко [352–354] и других. Работы исследователей позволили решить важные задачи обеспечения безопасности движения и повышения надежности эксплуатации ТПС.

Исследования, проводимые такими авторами, как А. В. Горский, А. А. Воробьев и В. А. Четвергов [191], представляют собой всесторонний анализ разработки эффективных систем ремонта, делая акцент на методах и стратегиях, способных повысить производительность процессов. Важный вклад в обогащение теоретической и практической базы организации, управления и планирования ремонтных процессов внесли многие знаменитые ученые, включая И. Ф. Скибу [336–338], М. М. Болтина [299, 300], В. П. Бугаева [197–199], К. В. Мотовилова [355], А. М. Ножевникова [356], Н. В. Ответчикова [257], В. А. Ежикова [337] и А.В. Кирилюка [358], В.Г. Воротников [359], В.В. Мямлин [314–316], В. В. Пигунов [360], Ю. С. Подшивалов [361], Н. Е. Разинкин, Г. В. Райков [362],

В. И. Сенько [323–325], О. Т. Осяев [318, 319] и многие другие.

Особый интерес представляют исследования, связанные с размещением оборудования локомотивного хозяйства на железнодорожных станциях и анализом взаимодействия эксплуатационных и ремонтных предприятий со станционной инфраструктурой. Эти проблемы освещены в трудах таких ученых, как В. Н. Образцов, С. П. Бузанов, С. В. Земблинов, В. Д. Никитин, Н. В. Правдин, Е. И. Сычев [363] и другие.

Эффективная ТПП является важнейшим фактором успешной деятельности ремонтных предприятий. Современные технические требования к ТПС характеризуются высокой сложностью, что приводит к увеличению затрат труда на планирование и подготовку ремонтных операций [364, 365]. Проблемам механизации и автоматизации процессов ремонта, а также разработке ТД уделено внимание в работах К.А. Сергеева (РГОТУПС) и С.Г. Шантаренко (ОмГУПС) [326–328, 352–354].

Методы диагностики и НК состояния ПС прошли значительное развитие благодаря исследованиям ученых, представляющих РУТ МИИТ, ВНИИЖТ, ОмГУПС, ПГУПС и другие организации. Среди авторов можно отметить А.К. Гурвича, Г.Я. Дымкина, В.Н. Костюкова, С. М. Овчаренко, О. Т. Осяева, В.А. Четвергова [318, 319].

Исследования в области энергосбережения при организации ремонтных процессов получили развитие благодаря трудам ОмГУПС под руководством профессора В. Т. Черемисина. Его научная школа предоставила решения, направленные на экономию топливно-энергетических ресурсов и повышение общей эффективности железнодорожного транспорта [366].

Одним из важнейших, но недостаточно изученных направлений является развитие и оптимизация технологических систем, связанных с организацией ремонта и обслуживания ПС. Модернизация этих систем на всех стадиях — от проектирования до эксплуатации — остается актуальной задачей, к решению которой автор данной диссертации приложил определенные усилия.

2.2 Основные принципы внедрения системного подхода в целях оптимизации эффективности технологических систем на предприятиях

Важным элементом в теории эффективности является термин «показатель эффективности». Ключевым процессом оптимизации деятельности производственного предприятия является концепция эффективности. Эффективность (с англ. «*effectiveness*» и «*efficiency*») – «определяющее свойство целенаправленной деятельности, которое с познавательной (гносеологической) точки зрения раскрывается через категорию цели и объективно выражается степенью её достижения с учётом затрат ресурсов и времени». В производственно-технологической практике эффективность взаимосвязана с концепцией технологических операции, которая интерпретируется как организованная совокупность взаимозависимых действий, направленных на реализацию определённой задачи [1].

Полное раскрытие качественных характеристик сложной системы возможно исключительно в ходе её непосредственной работы по заданным функциям. Это обстоятельство подчеркивает, что наиболее объективная оценка качества системы достигается через глубокий анализ условий и результатов её целевой деятельности. Полное восприятие эффективности системы не может быть достигнуто лишь на основе анализа её внутренних характеристик, важно также принимать во внимание параметры надсистемы, в которую она встроена. Как подчеркивается в исследовании [367], эффективность системы не может быть измерена напрямую. Вместо этого её оценка осуществляется косвенно через специально разработанные показатели, что позволяет получить более полное и обоснованное представление о её функционировании.

Каждый из показателей эффективности отражает степень выраженности определённых свойств системы. Эта мера интенсивности, позволяющая оценить, насколько активно проявляется то или иное качество, и именуется показателем эффективности [364,365]. В более глубоком и детальном анализе, представленном

в исследовании [367], раскрываются нюансы и особенности каждого из таких показателей, что позволяет лучше понять их роль и значение в общей оценке системы: «показатель эффективности сложной системы представляет собой количественную характеристику конечного результата её функционирования и развития в течение установленного периода времени, учитывающую соответствие достижений целевому нормативу, затраты ресурсов, состояние системы, воздействие внешней среды и параметры заданного управления».

Когда речь идет об анализе эффективности сложных систем, этот процесс неизменно основывается на четко определённой концепции цели. В данном контексте эффективность можно интерпретировать как характеристику объекта, которая обеспечивает ему наилучшие условия для достижения поставленной задачи.

Существует множество систем, которые оказывают значительное влияние на эффективность операций, однако не находятся под непосредственным контролем технологической системы. К числу таких систем можно отнести, к примеру, ремонтные объекты, а также системы ТОиР транспортных систем, которые принадлежат эксплуатирующим организациям. Данные элементы играют важную роль в общем процессе управления, так как их состояние и функционирование прямо влияют на производительность и надежность ТП, даже если они не находятся в непосредственном управлении самой технологической системы. Эффективность операций зависит не только от управления основным производственным процессом, но и от оптимизации взаимодействия с этими поддерживающими системами, что в итоге способствует достижению более высоких результатов. Исследование эффективности технологических систем в прикладном аспекте направлено на создание решений, способствующих рациональному использованию технических ресурсов для достижения задач в различных условиях. Кроме того, необходимо определить оптимальные варианты проектирования систем, что критически влияет на их адаптивность к изменяющимся условиям и производительность.

На практике анализ эффективности работы различных производственно-технологических объектов включает в себя решение ряда ключевых задач, таких как **оценка производительности** (поиск резерва увеличения эффективности), **выявление узких мест** (оценка вклада разных факторов в общую эффективность технологических и производственных операций), **оптимизация процессов** (оценка производственных мощностей, оценка загрузки производства) и **разработка стратегий** (сравнения различных сценариев повышения эффективности с последующим их ранжированием по уровням эффективности) для повышения общей результативности (рисунок 2.1).

Рисунок 2.1 – Оптимизация и совершенствование операционной эффективности

Эти задачи требуют комплексного подхода и детального изучения различных факторов, влияющих на функционирование объектов, чтобы обеспечить максимальную эффективность и устойчивость в меняющихся условиях. Каждое из этих направлений играет важную роль в достижении целей и повышении конкурентоспособности исследуемых систем.

Результативность организации обусловлена множеством факторов, как непосредственных, так и опосредованных. К ним относятся производственные, экономические, конкурентные, социальные, политические, международные и технологические элементы. В целом, эти факторы можно классифицировать на две категории: внутренние, которые зависят от самой организации и находятся под её

управлением, и внешние, которые организация изменить не в состоянии (рисунок 2.2).

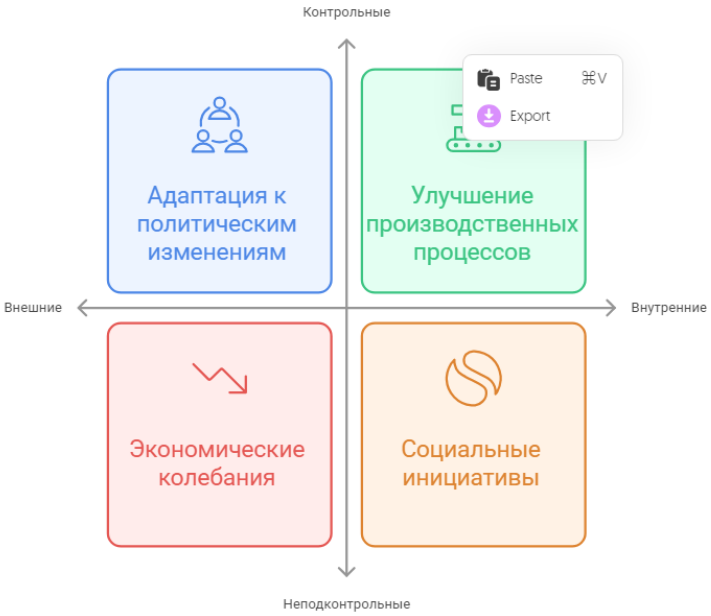


Рисунок 2.2 – Выделение факторов, влияющих на Эффективность

Система классификации факторов помогает выделить основные показатели, отделяя их от воздействия внешних и менее значительных влияний. Это создает условия для определения ключевых направлений, способствующих увеличению результативности технологических систем и выявлению резервов при использовании многогранного подхода. Внутренние факторы охватывают те, которые существенно определяют эффективность работы компании. В то же время, второстепенные внутренние факторы, хотя и оказывают влияние на общие показатели, не связаны непосредственно с основной сутью рассматриваемого критерия; примеры таких факторов включают нарушения технологической дисциплины. В отличие от них, внешние факторы находятся за пределами контроля предприятия, однако они имеют непосредственное воздействие на уровень использования его технологических, производственных и финансовых ресурсов (рисунок 2.3).

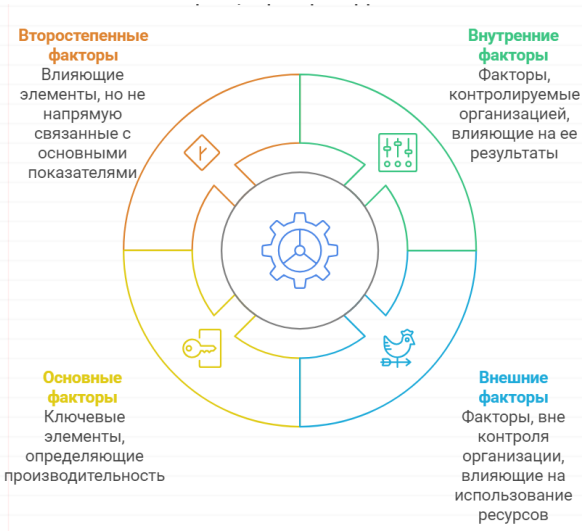


Рисунок 2.3 – Ключевые факторы, формирующие эффективность производственного предприятия

Анализ эффективности можно условно разбить на два типа: обобщённые и детализированные, основываясь на уровне обобщения исследуемых факторов. В контексте обобщённых исследований, в зависимости от целей, преследуемых при оценке эффективности, можно выделить два уровня — концептуальный и операционный, как это показано на рисунке 2.4.

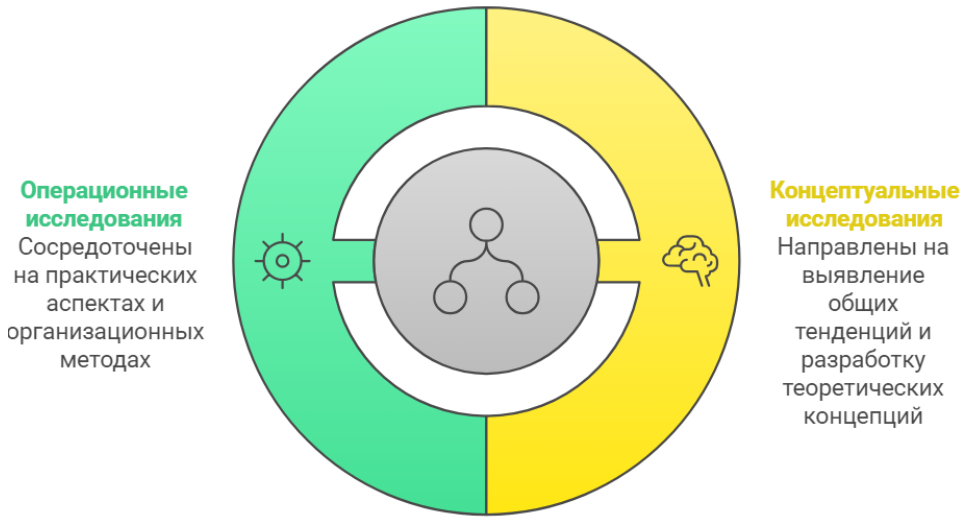


Рисунок 2.4 – Факторы, определяющие эффективность деятельности предприятия

Концептуальное исследование нацелено на выявление ключевых тенденций в развитии анализируемого процесса и на разработку методов и форм его организации. В ходе такого исследования создаются концепции, касающиеся

самых важных аспектов планирования и выполнения крупных операций, определяются системы целей и задач, а также обосновываются принципы функционирования значительных технических систем (рисунок 2.5).

Рисунок 2.5 – Этапы проведения концептуального анализа

Данное исследование осуществляется с использованием метасистемного подхода, который предполагает максимально глубокое обобщение рассматриваемых факторов (рисунок 2.6).

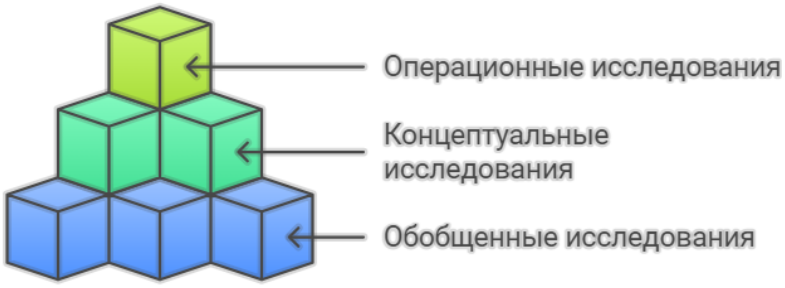


Рисунок 2.6 – Структурная организация системных исследований

В рамках теоретических исследований технологических систем [368–370] выделяют потенциальную и практическую эффективность (рисунок 2.7). Потенциальная эффективность операции определяется как её результативность в случае наилучшего использования ресурсов и выбора оптимальной стратегии, что позволяет достичь наиболее выгодного истечения. Следовательно, предельная (потенциальная) эффективность напрямую связана с характеристиками и структурой технологической системы. Чтобы достичь высокой практической

эффективности, необходимо адаптивно настраивать структуру и параметры активных производственных средств с учётом реальных условий окружающей среды [1, 130].

Рисунок 2.7 – Результативность технологических систем

Оценка качества функционирования сложной системы наилучшим образом осуществляется через её эффективность, что требует комплексного анализа не только собственных процессов, но и внешних влияний. Показатель эффективности выступает как количественная мера достигнутых результатов, что напрямую зависит от временных и ресурсных затрат. Информативность позволяет лучше оценивать целевые установки, что, в свою очередь, способствует более эффективному распределению ресурсов и времени на достижение этих целей. Информативность производственных и ТП играет значительную роль в повышении общей эффективности организаций. Благодаря корректной и полной информации о текущих процессах предприятия могут более эффективно анализировать свои действия, выявлять узкие места и принимать обоснованные решения. Одним из центральных аспектов информативности является наличие актуальных данных по всем этапам производственной деятельности, что позволяет наладить более чёткое взаимодействие между внутренними характеристиками системы и внешними факторами.

Таким образом, для рационального анализа сложных систем необходимо учитывать как конечные цели, так и влияние внешних систем на внутренние процессы организации. Высокий уровень информативности обеспечивает своевременное выявление слабых мест и возможностей для оптимизации, что является залогом успешного функционирования производственно-технологической системы и её способности адаптироваться к изменяющимся условиям.

2.3 Понятие об информативности производственно-технологических процессов

Чтобы понять, как связана эффективность работы производственных систем с полезностью ТП, которые используют данные о состоянии ремонтируемого оборудования, получаемые с помощью технологий и средств видов (методов) НК, можно использовать следующие формульные зависимости:

– эффективность E – это отношение достигнутых результатов к затратам;

– информативность I – это мера полноты и точности информации, получаемой от систем НК;

– ресурсы R – затраты на выполнение операций, включая время, материалы, трудозатраты и п.р.;

– результат Rs – достижения в рамках производственного процесса (например, количество успешно завершенных ремонтов, сниженное время простоя оборудования).

Формула 2.1 эффективности производственных систем может быть представлена следующим образом:

$$E = \frac{R_S}{R}, \tag{2.1}$$

где R_s – результат, достигнутый в процессе производства (например, снижение числа аварий, увеличение времени безотказной работы); R – затраты, понесённые на получение этого результата.

Для более точной зависимости можно ввести следующие показатели: I – уровень информативности ТП, который можно оценить через показатели:

– полнота информации (доля данных, которые были получены от НК, от всех возможных данных);

– точность (доля верных данных от общего числа полученных);

– быстрота (время, необходимое для получения информации).

Допустим, что уровень информативности I выражается через (см формула 2.2):

$$I = w_1 \cdot l_p + w_2 \cdot l_t + w_3 \cdot l_b \quad (2.2)$$

где I_p – полнота информации; I_t – точность информации; I_b – быстрота предоставления информации; w_1, w_2, w_3 – весовые коэффициенты, отражающие важность каждого из параметров.

Теперь связь эффективности от информативности может быть записана в более сложной форме (2.3):

$$I = \frac{f(I = w_1 \cdot l_p + w_2 \cdot l_t + w_3 \cdot l_b) \cdot R_s}{R} \quad (2.3)$$

Таким образом, повышая информативность (I) за счёт улучшения полноты, точности, достоверности и быстроты получения информации от технологий НК, мы можем значительно повысить эффективность (E) производственно-технологической системы, уменьшая затраты на ремонты, минимизируя простои ТПС и улучшая их общее состояние (рисунок 2.8). Это демонстрирует важность интеграции современных видов (методов) контроля в производственно-технологические процессы для достижения высоких результатов и повышения конкурентоспособности.

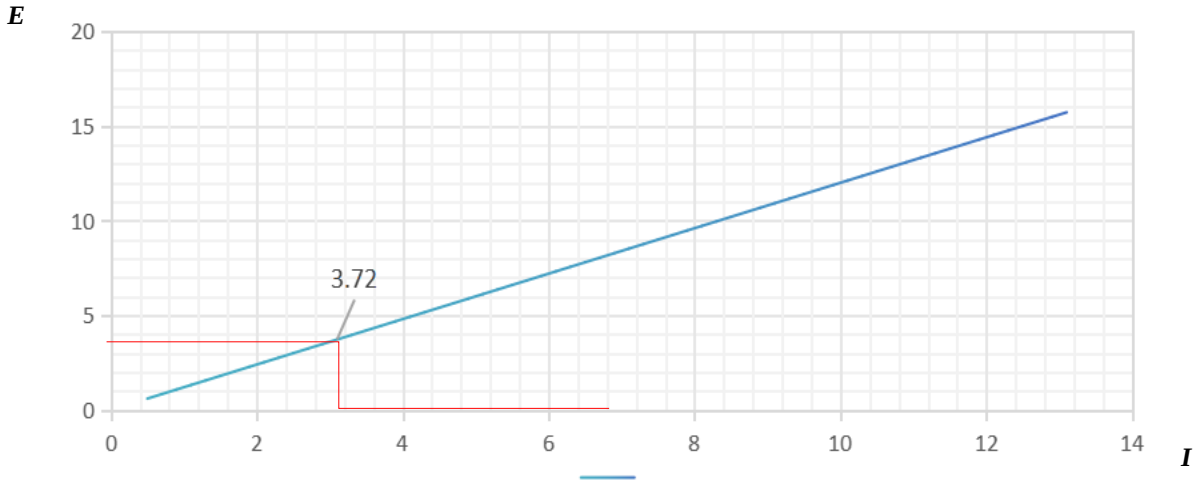


Рисунок 2.8 – График зависимости эффективности производственно-технологической системы от информативности ТП

Можно заметить, что с увеличением информативности ТП эффективность производственно-технологической системы также увеличивается. Данное представление позволяет увидеть общую зависимость между параметрами, и его можно использовать для дальнейшего анализа данных систем.

Следует также отметить, что реализация постоянно действующих процессов мониторинга и анализа технического состояния с применением НК создаёт устойчивую основу для принятия обоснованных решений, что в свою очередь ведёт к оптимизации ресурсных затрат и повышению общей эффективности ТПП.

Любая производственная или технологическая система может эффективно функционировать, если она интегрирована в соответствующую информационную среду (ИС). ИС представляет собой составную часть информационного пространства (ИП) и информационного поля, рассматриваясь как их подмножество (рисунок 2.9). Одной из характерных особенностей ИС является наличие объектов окружающей среды, с которыми осуществляется информационное взаимодействие. Это взаимодействие, в свою очередь, определяет границы самой информационной среды [371].

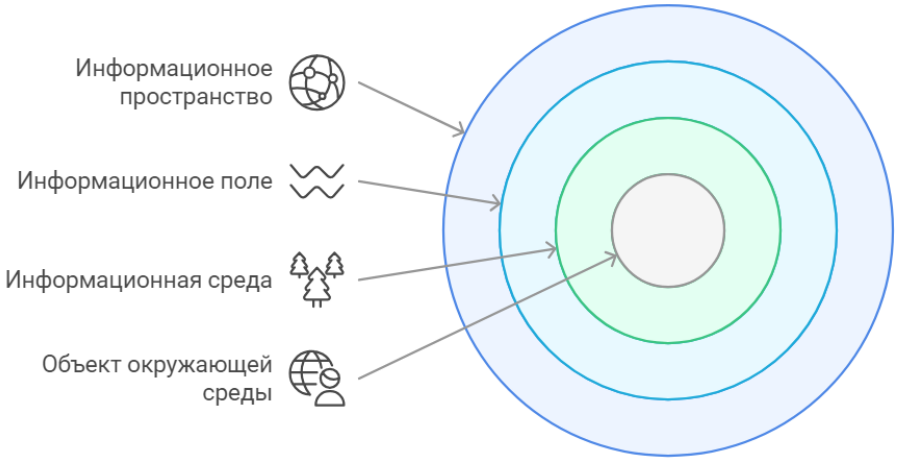


Рисунок 2.9 – Иерархия информационных понятий

Информационное пространство представляет собой фундаментальный контекст для получения знаний и информации, включающий разнообразные объекты и их взаимосвязи. Одним из ключевых направлений данного исследования является разработка ЕИП АСУ на основе аналитической цифровой платформы с автоматизированной системой управления. Данная платформа предназначена для формирования знаний и получения информации с помощью комплексного мониторинга и диагностики состояния ТПС, состоящая из различных объектов и взаимосвязей между ними, с использованием ЦД. Ее внедрение позволит осуществлять предиктивный анализ состояния ТПС в среднесрочной и долгосрочной перспективе, включая оценку стоимости ЖЦ.

Качественное и количественное описание характеристик этого пространства способствует формированию так называемого информационного поля, которое, в свою очередь, служит инструментом для уточнения и детализации параметров, присущих первому понятию. Информационное поле позволяет проанализировать и описать характеристики, а также взаимосвязи, существующие внутри информационного пространства.

Оба указанных концепта – информационное пространство и информационное поле – применимы ко всем объектам, однако ИС тесно связывается с конкретным объектом или его группой, формируя их окружение. В

этом контексте ИС может быть охарактеризована как подмножество информационного пространства, которое предоставляет описание окружения объекта. Более того, информационная среда может рассматриваться как подмножество информационного поля, которое демонстрирует динамику информационного взаимодействия с данным объектом.

Следует подчеркнуть, что вышеуказанные понятия не являются синонимами, а представляют собой взаимосвязанные и содержательно отличные категории, связывающиеся общей основой – информационными отношениями. ИС демонстрирует встроенность в рамки как информационного пространства, так и информационного поля, выступая как их подмножество. В этой иерархии понятий ИС имеет наименьший масштаб, в то время как наименьшей по масштабу является семантическая среда, окружающая объект исследования. Таким образом, можно констатировать, что информационное пространство, информационное поле и ИС, наряду с семантическим окружением, формируют комплексную структуру, необходимую для понимания и анализа информационных взаимодействий.

Создание ЕИП АСУ предоставляет следующие возможности:

– обмен опытом и учет изменений в КД и ТД с применением электронного документооборота;

– моделирование процесса УЗК для изделий различной формы с возможностью импорта 3D-CAD моделей из САПР. Это также позволит визуализировать результаты и совместно разрабатывать нормативную и техническую документацию в рамках ТПП.

При разработке ТП важно учитывать следующие факторы:

– какие станки и оборудование есть на предприятии и их характеристики;

– какие инструменты и оснащение доступны, их типы и количество;

– количество и квалификацию работников (как основного, так и вспомогательного персонала);

– организацию производственных цехов и участков;

– свойства материалов (физико-химические и механические);

– размеры и форму заготовок;

– припуски на обработку;

– параметры резания для каждого типа операций;

– условия выполнения других процессов, таких как термообработка или нанесение покрытий;

– требования к контролю качества и испытаниям продукции;

– процедуры по приёмке, консервации, упаковке, хранению и транспортировке материалов и изделий.

Также необходимо учитывать информацию, касающуюся документирования:

– формы и правила оформления техдокументации;

– процессы согласования, утверждения, хранения и внесения изменений в документы;

– нормативы по экологичности и безопасности работы;

– подходы к контролю и улучшению качества продукции;

– данные о надёжности и качестве оборудования;

– справочные материалы по нормированию и тарифным требованиям;

– а также экономическую информацию и многое другое.

Подготовка специалистов-технологов высокого уровня требует большого количества времени, которое может достигать 10–15 лет. Это связано с огромным объёмом знаний, охватывающих производственные, технологические, организационные и экономические аспекты. В современных условиях производство нуждается в постоянной актуальной информационной поддержке. Такая информация должна охватывать состояние производственных и технологических систем, наличие рабочей силы, контроль качества продукции, а также выполнение запланированных объёмов работы и производственных программ.

Производственные и технологические системы, как и любые технические объекты, обладают ограниченным уровнем надёжности, и их функционирование сопровождается неизбежными сбоями. Эти сбои могут происходить как

постепенно, так и внезапно, при этом разграничение между ними достаточно условно. В большинстве случаев внезапные поломки происходят вследствие накопления мелких повреждений с течением времени. Например, поломка деталей станка может быть вызвана развитием микродефектов, таких как трещины или деформации, которые накапливаются до того момента, пока не произойдет разрушение. Таким образом, мониторинг состояния технических систем позволяет выявить начало негативных процессов и своевременно предпринять меры, чтобы предотвратить крупные поломки или уменьшить их последствия.

Состояние оборудования и других объектов определяется с помощью данных, полученных различными методами. Эти данные описывают характеристики объекта, а также содержат цифровые значения измеряемых параметров. Вся информация, описывающая систему или процесс, создаёт информационное пространство, где каждый параметр имеет определённое информационное значение. Такие данные можно фиксировать с помощью измерительных приборов, аналитических систем или человеческого восприятия.

Для оценки состояния технического устройства необходимо выполнять сбор, передачу, обработку, хранение и анализ информации. На основе анализа создаётся управление объектом, выраженное в виде управляющих сигналов, которые направляются обратно в систему. Однако на каждом этапе работы с информацией могут возникать ошибки, что снижает достоверность данных, описывающих объект. Достоверность $D(x_i)$ информации обозначается вероятностью правильного отражения состояния объекта и измеряется в диапазоне значений от 0 до 1. При этом каждый параметр объекта должен быть закодирован – в виде числового, аналогового, символьного или другого формата. В условиях развития компьютерных технологий информация о большинстве процессов представляется именно в числовом виде, что упрощает её обработку и хранение.

Большие объёмы данных требуют грамотной организации и их обработки в компьютерных системах в соответствии с установленными правилами. Высокая конкуренция на рынке и широкое использование сетевых технологий делают

информационную безопасность крайне важной задачей. Рационально организованная структура информации помогает сократить объём данных, минимизировать ошибки и повысить надёжность и защищённость производственных данных.

Организация данных зачастую предполагает их упрощение за счёт объединения в модули, где хранятся все ключевые сведения об объекте. Ключевые параметры представляют основную ценность, так как описывают важнейшие характеристики устройства.

При передаче и обработке производственной и технологической информации возникают различные помехи, задержки и искажения, поэтому необходимо тщательно структурировать данные, применяя строгие математические подходы, в частности методы теории вероятностей. Если состояние объекта заранее известно, то новая информация о нём будет иметь нулевую ценность. Таким образом, информация становится значимой только тогда, когда она позволяет устранить неопределённость в понимании текущего состояния объекта X или системы.

Если рассматривать объект X, который может находиться в одном из n состояний, то его поведение можно описать с помощью вероятностной модели. Это включает вероятности пребывания в каждом из возможных состояний: $p_1, p_2, \ldots, p_n$, где p_i – это вероятность того, что объект находится в состоянии i.

Матрицу вероятностей можно записать как вектор вероятностей (2.4):

$$P = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \ldots \\ p_n \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

Понятно, что если сложить вероятности всех возможных состояний объекта, то в итоге получится один.

$$\sum_{i=1}^{n} p_i = 1 . \tag{2.5}$$

Это условие означает, что объект обязательно находится в одном из возможных состояний. Данная информация помогает уменьшить

неопределенность, связанную с состоянием объекта. Информационное содержание такой системы можно оценить с помощью энтропии Шеннона (2.6):

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i , \tag{2.6}$$

где $H(X)$ — это мера неопределенности или среднее количество информации, содержащаяся в случайной величине X (чем выше энтропия, тем выше неопределенность); n — число возможных состояний объекта; p_i – вероятность нахождения объекта в состоянии i; $log2p_i$ – логарифм вероятности, взятый по основанию 2, который измеряет индивидуальное информационное содержание состояния i.

При выборе логарифма по основанию 2, если система имеет два равновероятных состояния, то энтропия будет максимальной. Для такого случая вероятности каждого состояния равны $p_1 = p_2 = 0{,}5$. В этом случае энтропия рассчитывается следующим образом (формула 2.7):

$$H(X) = -(0.5 \log_2 0.5 + 0.5 \log_2 0.5) \tag{2.7}$$

Так как $log20{,}5=-1$, то (формула 2.8):

$$H(X) = -\big(0.5 \cdot (-1) + 0.5 \cdot (-1)\big) = 1 \tag{2.8}$$

Таким образом, энтропия системы с двумя равновероятными состояниями равна 1 бит, что означает максимальную неопределённость. Если система имеет n равновероятных состояний, то вероятность каждого состояния равна $1/n$. Энтропия в этом случае определяется как (2.9):

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{1}{n}\right) log_2 \left(\frac{1}{n}\right). \tag{2.9}$$

Поскольку все вероятности одинаковы, это можно упростить до (2.10):

$$H(X) = -n \times \frac{1}{n} \log_2 \left(\frac{1}{n}\right) = \log_2 n. \tag{2.10}$$

Таким образом, энтропия системы, имеющей n равновероятных состояний,

равна $log2n$ бит – логарифму числа состояний. Это означает, что энтропия увеличивается по мере увеличения числа возможных состояний.

Если представить другую запись формулу для энтропии системы с n равновероятными состояниями можно записать по-другому, используя свойства логарифмов. Давайте рассмотрим это более подробно. Используя свойство логарифмов: $-log2(1/n) = log2n$.

Таким образом, окончательная запись остается: $H(X) = log2n$. Эта формула показывает, что энтропия системы с n равновероятными состояниями измеряется в битах и равна логарифму по основанию 2 от количества этих состояний.

Энтропия случайной величины X с распределением вероятностей $p(X)$ действительно может быть представлена как математическое ожидание логарифма вероятностей состояний, взятое с обратным знаком. Обозначим возможные значения случайной величины как $x_1, x_2,\ldots, x_n$ и соответствующие вероятности как $p_1, p_2,\ldots, p_n$. Тогда энтропия $H(X)$ выражается как (формула 2.11):

$$H(X) = -E[\log_2 p(X)] = \sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i \quad (2.11)$$

Энтропия выражена как математическое ожидание $p(x)$ от логарифмов вероятностей состояний, взятых с отрицательным знаком. Здесь математическое ожидание определяется суммой произведений вероятностей на логарифмы этих вероятностей, что и формирует меру неопределенности, или энтропию, данной системы.

При объединении двух независимых систем X и Y в одну общую систему образуется более сложная система, в которой количество состояний определяется числом всех возможных комбинаций состояний систем X и Y. Энтропия объединённой системы рассчитывается с учётом того, что каждая система имеет свою собственную энтропию, и они независимы. В этом случае полная энтропия объединённой системы $H(X, Y)$ складывается из энтропий каждой из систем. Формально это можно выразить следующим образом (2.12):

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y) \quad (2.12)$$

Поскольку системы X и Y независимы, совместное распределение вероятностей для X и Y является произведением их индивидуальных распределений, то есть (2.13):

$$p(x, y) = p(x)\, p(y). \tag{2.13}$$

Подставляя это в формулу для энтропии совместной системы, получим (2.14):

$$H(X,Y) = -\sum_{x\in X}\sum_{v\in Y} p(x,y)\log_2 p(x,y) = -\sum_{x\in X}\sum_{v\in Y} p(x)p(y)\log_2\left(p(x)p(y)\right) \tag{2.14}$$

Это выражение можно разложить как (2.15):

$$H(X,Y) = -\sum_{x\in X}\sum_{v\in Y} p(x)p(y)(\log_2 p(x) + \log_2 p(y))\,. \tag{2.15}$$

Распределяя сумму, получим (2.16):

$$H(X,Y) = -\sum_{x\in X} p(x)\, log_2\, p(x) \sum_{y\in Y} p(y) - \sum_{y\in Y} p(y)\, log_2\, p(y) \sum_{x\in X} p(x) \tag{2.16}$$

Поскольку $\sum_{y\in Y} p(y) = 1$ и $\sum_{x\in X} p(x) = 1$, то (2.17):

$$H(X,Y) = \left(-\sum_{x\in X} p(x)\log_2 p(x)\right) + \left(-\sum_{y\in Y} p(y)\log_2 p(y)\right) = H(X) + H(Y) \tag{2.17}$$

Таким образом, энтропия объединённой системы равна сумме энтропий составляющих её независимых систем. Энтропию можно выразить через математическое ожидание, что позволяет оценивать её как среднюю неопределённость. Энтропия системы X определяется как математическое ожидание от минус логарифма вероятности каждого состояния (формула 2.18):

$$H(Y) = E\left[-\log_2 p(x) = -\sum_{x\epsilon X} p(x)\log_2 p(x)\right] \tag{2.18}$$

Тогда для двух независимых систем X и Y, их совместная энтропия через математическое ожидание будет записана как (формула 2.19):

$$H(X,Y) = E_{X,Y}[-\log_2 (x,y)] \tag{2.19}$$

Поскольку X и Y независимы, мы имеем $p(x, y) = p(x)\, p(y)$. Подставляя и упрощая, получаем (формула 2.20):

$$H(X,Y) = E_{X,Y}\left[-\log_2\left(p(x)p(y)\right)\right] \tag{2.20}$$

Это можно разложить на (формула 2.21):

$$H(X,Y) = E_{X,Y}[-\log_2 p(x) - \log_2 p(y)] \tag{2.21}$$

Поскольку математическое ожидание суммы равно сумме математических ожиданий, имеем (формула 2.22):

$$H(X,Y) = E_X[-\log_2 p(x)] + E_Y[-\log_2 p(y)] \tag{2.22}$$

Таким образом, это эквивалентно формуле 2.12. При условии, что системы X и Y независимы, согласно теореме об умножении вероятностей независимых событий, вероятности совместного появления X и Y равны произведению их индивидуальных вероятностей (формула 2.13). Используя это, совместная энтропия $H(X, Y)$ может быть выражена как (формула 2.23):

$$H(X,Y) = -\sum_{x\in X}\sum_{y\in Y} p(x,y)\log_2 p(x,y) \tag{2.23}$$

Подставляем $p(x, y) = p(x)\, p(y)$ (формула 2.24):

$$H(X,Y) = -\sum_{x\in X}\sum_{y\in Y} p(x)p(y)\log_2\left(p(x)p(y)\right) \tag{2.24}$$

Применяя свойства логарифмов, получаем (формула 2.25):

$$H(X,Y) = -\sum_{x\in X}\sum_{y\in Y} p(x)p(y)[\log_2 p(x) + \log_2 p(y)] \tag{2.25}$$

Это выражение можно разложить на две суммы (2.26):

$$H(X,Y) = -\sum_{x\in X}\sum_{y\in Y} p(x)p(y)\log_2 p(x) - \sum_{x\in X}\sum_{y\in Y} p(x)p(y)\log_2 p(y) \tag{2.26}$$

Так как $\sum_{y\in Y} p(y) = 1$ и $\sum_{x\in X} p(x) = 1$, имеем (2.16). Это упрощается до (2.27):

$$H(X,Y) = -\sum_{x\in X} p(x)\log_2 p(x) - \sum_{y\in Y} p(y)\log_2 p(y) \quad (2.27)$$

Таким образом (формула 2.12) подтверждает, что для независимых систем общая энтропия равна сумме энтропий каждой системы. Распространяя это на *n* слагаемых, можно утверждать, что энтропия сложной системы, состоящей из *n* независимых подсистем, равна сумме энтропий этих подсистем.

Если у нас есть *n* независимых систем, обозначенных как X_1, X_2,…, X_n, то совместная энтропия этих систем равна сумме их индивидуальных энтропий.

Давайте рассмотрим каждую систему X_i с энтропией $H(X_i)$. Поскольку системы независимы, совместная вероятность может быть записана как произведение их отдельных вероятностей (формула 2.28):

$$p(x_1x_2,\ldots,x_n) = p(x_1)p(x_2)\cdot\ldots\cdot p(x_n) \quad 2.28$$

Общая совместная энтропия будет (формула 2.29):

$$H(X_1X_2,\ldots,X_n) = -\sum_{x_1}\sum_{x_2}\ldots\sum_{x_n} p(x_1x_2,\ldots,x_n)\log_2 p(x_1x_2,\ldots,x_n) \quad 2.29$$

Подставляем вероятность (формула 2.30):

$$H(X_1X_2,\ldots,X_n) = -\sum_{x_1}\sum_{x_2}\ldots\sum_{x_n} p(x_1)p(x_2)\ldots p(x_n)\log_2\left(p(x_1)p(x_2)\ldots p(x_n)\right) \quad 2.30$$

По свойству логарифмов (2.31):

$$H(X_1X_2,\ldots,X_n) = -\sum\sum\ldots\sum p(x_1)p(x_2)\ldots p(x_n)(\log_2 p(x_1) + \log_2 p(x_2) + \ldots + \log_2 p(x_n)) \quad (2.31)$$

Делим сумму (формула 2.32):

$$H(X_1X_2,\ldots,X_n) = -\sum_{i=1}^{n}\sum_{x_i} p(x_i)\log_2 p(x_i) \quad (2.32)$$

Таким образом, получаем формулу 2.33:

$$H(X_1X_2,\ldots,X_n) = H(X_1) + H(X_2) + \ldots + H(X_n) \quad (2.33)$$

Энтропия, как мера неопределенности состояния системы, указывает на уровень неопределенности. Чем больше информации мы получаем о системе, тем меньше становится неопределенность. Поэтому, если объем знаний о состоянии системы увеличивается, энтропия уменьшается. Наоборот, снижение количества информации приводит к росту энтропии. Если рассмотреть параметр информации $I(X)$, отражающий меру определенности состояния системы, то объем информации, необходимый для приведения системы к полностью определенному состоянию (где энтропия равна нулю), совпадает с первоначальной энтропией системы $H(X)$. Таким образом, $I(X) = H(X)$ – это количество информации, необходимое для устранения всей неопределенности.

Количество информации равно её энтропии. Это означает, что для устранения всей неопределённости требуется объём информации, соответствующий изначальной энтропии системы $H(X)$. Из последней формулы следует, что чем ниже вероятность события, о котором получена информация, тем больший объем информации оно содержит. Рассчитаем количество информации для каждой системы:

1. для первой системы: $L_1 = -0.1ln(0.1) = -0.1(-2.3) = 0.23$;

2. для второй системы: $L_2 = -0.9ln(0.9) = -0.9(-0.105) = 0.095$.

Отсюда следует, что для нестабильной технологической системы требуется получение информации в $N = L_1/L_2 = 0.23/0.095 \approx 2.42$ раза больше, т. е. ее состояние нужно проверять в 2.42 раза чаще, чем состояние более стабильной системы. Таким образом, необходимо усилить меры контроля.

Если техническая система характеризуется p параметрами и имеет m контролируемых показателей, то изменение состояния системы будет по-разному оцениваться в зависимости от каждого показателя. Поэтому для улучшения эффективности системы необходимо сосредоточиться на тех параметрах, которые наиболее сильно влияют на её работоспособность и надежность.

С другой стороны, при мониторинге или диагностике следует отдавать предпочтение только тем измеряемым параметрам, которые предоставляют максимальную информативность о состоянии системы. Это означает, что показатели должны содержать максимальную информацию о значимых параметрах (таблица 1.8).

Технологические операции НК осуществляются на специализированных участках, которые, при необходимости, также выполняют функцию хранилищ для объектов ремонта, как уже прошедших контроль, так и тех, которые ожидают его. Взаимосвязи между указанными операциями полностью определяются структурой ТП производства.

Повышение информативности ТП на предприятиях представляет собой важнейший элемент, способствующий росту производительности и повышению качества производимой продукции. Ключевым аспектом данной информативности является эффективность передачи и обработки информации о текущем состоянии процессов, уровнях качества и различных операциях, что в свою очередь формирует основу для принятия обоснованных управленческих решений.

Для достижения высокой информативности необходимо сосредоточиться на нескольких значимых направлениях, таких как стандартизация производственно-ТП, автоматизация, внедрение передовых технологий и постоянное обучение кадров. Эффективная система информирования должна характеризоваться точностью и своевременностью, основанной на надежных данных, получаемых на всех этапах производства.

Современные технологические решения, такие как промышленные 3D-решения и комплексные виды (методы) НК, а также применение искусственного интеллекта, резко увеличивают возможности по сбору и анализу информации, что позволяет осуществлять мониторинг характеристик работы оборудования и производственно-технологических процессов в реальном времени. Эти подходы способствуют не только улучшению управления производственно-технологическими процессами, но и повышению их адаптивности к изменяющимся

условиям внешней среды.

2.4 Повышение информативности технологического процесса по ремонту узла люлечного подвешивания локомотивов серии ВЛ80

Применение промышленных 3D-технологий вместе с современными методами контроля заметно улучшает качество и надежность производственно-технологических процессов, способствуя выявлению дефектов, которые могут остаться незамеченными при использовании традиционных методов контроля. Данное сочетание технологий особенно актуально в таких критически важных отраслях, как авиационная, судостроительная и железнодорожная, где требования к безопасности имеют первостепенное значение. Комплексное использование промышленных 3D-решений и НК повышает информативность ТП, что в итоге увеличивает общую эффективность производственно-технологических процессов.

2.4.1 Технология ремонта деталей и узлов электровозов с использованием 3D-решений

Технология ремонта электровозов с использованием 3D-решений, требует высокой степени точности, которая зависит не только от применяемого оборудования и программного обеспечения, но и от производственного опыта персонала.

На первом производится поставка на ремонтную позицию объекта ремонта, подготовка к сканированию (очистка, мойка, разборка и дефектировка) с последующей передачей деталей и узлов на соответствующие ремонтные участки. На участке НК производят визуально-оптический контроль:

– установка на кантователь с вращающим механизмом;

– нанесение матирующего спрея на отражающие поверхности объекта ремонта, проворачивая его вокруг своей оси для равномерного нанесения;

– сканирование объекта (с использованием поворотного механизма, с маркерами);

– объединение отдельных сканов в *mush* модель (объединенный скан).

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 [372] и [86] проведена оценка точности 3D-сканеров *RangeVision PRO/ PRO2M/ Spectrum*. Основной показатель для сканеров является «объемная точность», которая предполагает наличие в пространстве базовой точки (рисунок 2.10). Отклонение от которой не должно превышать значения в паспорте на оборудование (для 3D-сканеров *RangeVision PRO/ PRO2M/ Spectrum* – 0.04 мм (40 мкм), что ограничивает размер сферы, описанной вокруг базовой точки, а отклонение точек в пространстве относительно базовой точки не превышает радиус R = 0.02 мм (20 мкм).

Для апробации значения объемной точности произведено измерение эталонированного образца, представляющий – две сферы с диаметрами – D_1 и D_2, на расстоянии – l = 300, 173 и 116 мм, в зависимости от зоны сканирования L, M и S соответственно.

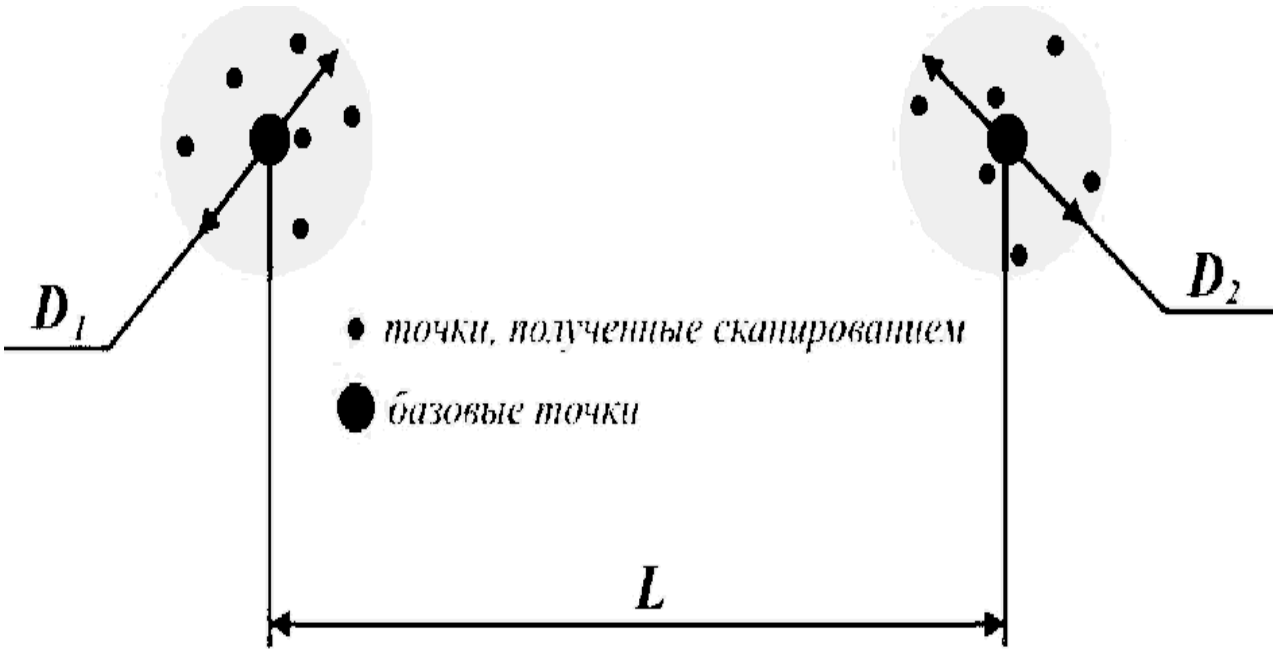


Рисунок 2.10 – Схема измерения эталонированного образца для апробации значения объемной точности сканеров

Полученные результаты визуально-оптических измерений приведены в таблице 2.1, для трех зон сканирования.

Таблице 2.1 – Данные по измерению расстояния «*l*»

Зона сканирования	Данные измерения *l* для трех зон сканирования	D_1, мм	D_2, мм
L	300	900,112	900,110
M	173	520,119	520,121
S	116	116,007	116,011

На рисунке 2.10 проиллюстрирован принцип триангуляции, используемый в оптических системах для получения точных координат объектов в пространстве.

На рисунке 2.11 видно, что 3D-сканер располагает двумя основными камерами: левой и правой, которые фокусируются на объекте сканирования (таблицы 2.2, 2.3).

Таблица 2.2 – Параметры рабочих зон сканирования

Зона сканирования	*L*	*M*	*S*
в, мм	550	320	140
с, мм	340	210	90
d, мм	360	200	80

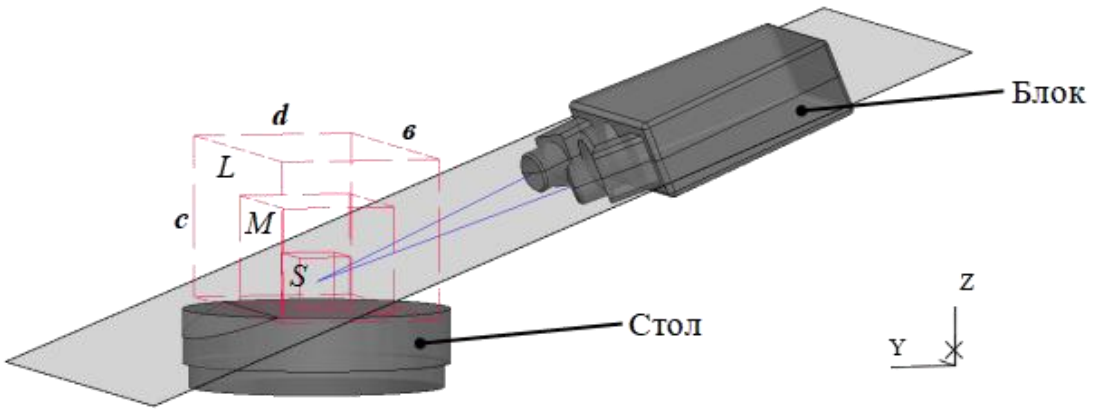


Рисунок 2.11 – Параметры рабочих зон сканирования

Таблица 2.3 – Параметры положения камер 3D-сканера

Зона сканирования	*L*	*M*	*S*
β, град	108,4		
α, град	36,8		
α_1, град	22		
D, мм	900	520	350
l, мм	300	173	116

Каждая камера размещается под определённым углом относительно объекта, что позволяет формировать два отдельных световых конуса, которые пересекаются в проекции на целевой объект. Обозначенные габариты L_{left} и L_{right} показывают расстояние от датчиков до объекта, а угол между датчиками составляет α, что критически важно для вычисления координат (рисунок 2.12).

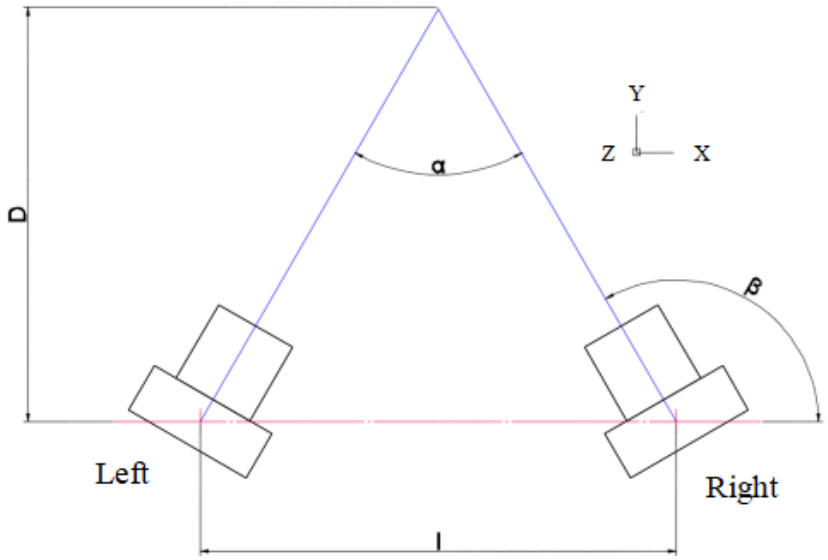


Рисунок 2.12 – Настройка положения камер в плоскости *XY*

Процесс сканирования начинается с излучения световых импульсов (например, лазера) на объект. Анализ отраженного сигнала позволяет определить время его прохождения, а также угол отражения. Эти данные затем обрабатываются алгоритмами вычислений, которые применяют триангуляцию для получения точных координат точек на поверхности объекта.

Системы координат, представленные на правой стороне схемы, показывают ориентацию осей, что также критично для построения трехмерной модели. Каждая полученная точка имеет свои координаты (*X*, *Y*, *Z*), которые определяются относительно заданной системы отсчета.

Использование таких систем позволяет достигать высокой точности измерений, а также эффективно обрабатывать данные для создания детализированных 3D-моделей объектов. ТП включает в себя несколько итераций измерения и компоновки, что обеспечивает качественное сканирование сложных геометрий.

Схема 3D-сканирования представляет собой систему, использующую оптическую триангуляцию для получения трехмерной модели объекта. В данной схеме выделяются несколько ключевых компонентов и параметров.

Блок сканера, установленный на штативе, служит основой для расположения источника света и сенсоров. Он может иметь возможность вращения вдоль горизонтальной и вертикальной осей, что позволяет изменять угол α (рисунок 2.13).

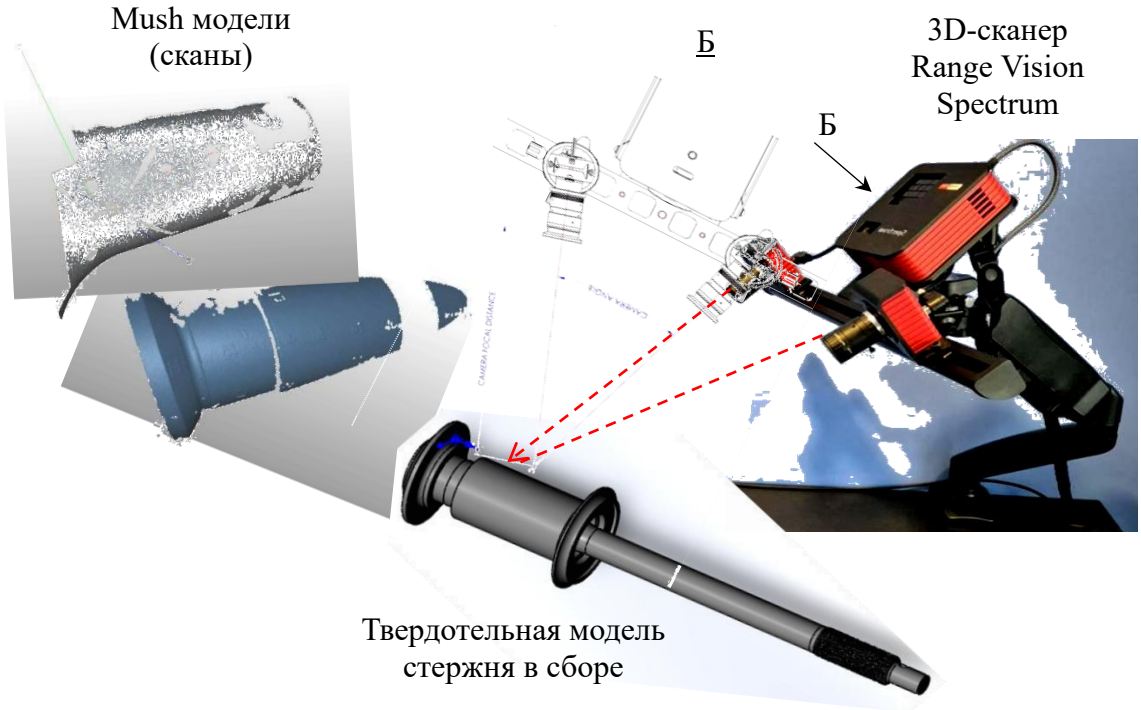


Рисунок 2.13 – 3D-сканирование стержня узла люлечного подвешивания электровоза

Поле на подставке обозначает поверхность, на которую проецируется лазерный луч или световой импульс. Это изменение угла критически важно для дальнейшей обработки получаемых данных и формирования трехмерной модели объекта (рисунок 2.14).

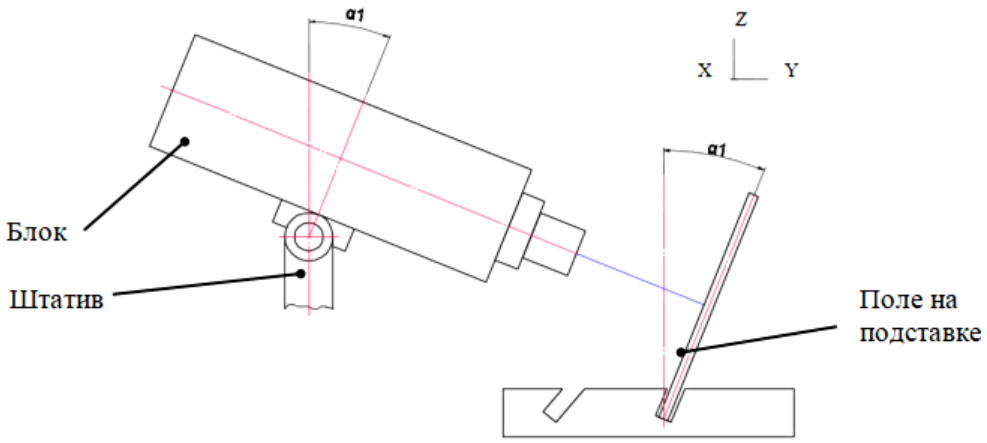


Рисунок 2.14 – Настройка положения камер в плоскости ZY

Отраженные от объекта лучи фиксируются сенсорами, встроенными в блок сканера. Измерения осуществляются в трехмерной пространственной системе координат, где оси X, Y и Z определяют положение объектов. Угол α между осью сканера и вертикальной плоскостью объекта влияет на точность измерений и их интерпретацию.

Процесс сканирования включает следующие этапы: 1. Излучение светового импульса на поверхность объекта. 2. Фиксация времени, необходимого для возвращения отраженного сигнала к сенсорам. 3. Вычисление координат точек на основе данных о времени и угле отражения, используя триангуляцию.

На основании проведённых измерений можно заключить, что заявленная объемная точность достигнута.

2.4.2 Расчёт эффективной зоны сканирования. Разработка комбинированной технологии контроля стержня узла люлечного подвешивания локомотивов

Описание задачи очень объемное и многоуровневое, и для качественного решения потребуется комплексный подход. Фотограмметрия позволяет

захватывать 3D-изображения объектов путем анализа множества сканов (фотографий). Для получения 3D-модели необходима формула, которая свяжет координаты точек в пространстве на основе их проекций на двумерные изображения.

1. Построение 3D-модели объекта (2.34):

$$X_i = K_i(R_i X + t_i), \tag{2.34}$$

где X_i — координаты точки в изображении; K_i — матрица внутренней калибровки камеры; R_i и t_i — матрица вращения и вектор трансляции соответственно.

2. Матрица параметров визуально-оптического и УЗК (2.35):

$$C_0 = \begin{cases} f_x\ атр; 0\ атр; c_x \\ 0\ атр; f_y\ атр; c_y \\ 0\ атр; 0\ атр; 1 \end{cases} \tag{2.35}$$

где f_x и f_y — фокусные расстояния; c_x и c_y — координаты главной точки.

При выполнении реверсивного инжиниринга не всегда стандартные зоны сканирования (таблица 2.3) могут быть применимы для конкретного объекта сканирования. Для этого требуется расчет «эффективных зон» сканирования и выбор «оптимальных параметров» 3D-сканера, основываясь на технических характеристиках оборудования, которые можно использовать для расчета (диапазон сканирования: от _____ до _____; разрешение: _____ мм; габариты объектов: до _____ мм).

Для эффективного сканирования необходимо проводить практическое тестирование и моделирование результатов контроля: 1. Создание таблицы эффективных зон (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Специальные (экспериментальные) параметры сканирования для визуально-оптического контроля с использованием 3D-сканера *RangeVision Spectrum*

Параметр	Значение	Описание
Разрешение сканера	До 5 мкм	Максимальная точность измерений
Диапазон зоны сканирования	200 мм x 150 мм x 150 мм	Минимальный
	600 мм x 400 мм x 400 мм	Средний
	1200 мм x 800 мм x 800 мм	Максимальный
Формат данных	STL, OBJ, PLY, ASC	Поддерживаемые форматы экспорта
Разрешение камер (мегапиксели)	3–6	Высокое разрешение для точности сканирования
Угол захвата	80–120 градусов	Поле зрения камер
Время обработки	2–15 минут	В зависимости от сложности объекта
Программное обеспечение	*RangeVision ScanCenter*	Программное обеспечение для управления сканером и обработки данных

Для расчета составим матрицу $Z(eff)$, состоящую из двух столбцов: первого, содержащего информацию о «габаритах», и второго, охватывающего соответствующие «зоны». Для каждого элемента в этой матрице имеется своя специфическая смысловая нагрузка, которая может варьироваться в зависимости от контекста её применения.

$$
\begin{bmatrix}
Габарит_1 & Зона_1 \\
Габарит_2 & Зона_2 \\
\vdots & \vdots \\
Габарит_n & Зона_n
\end{bmatrix}
$$

Первый столбец, содержащий «Габариты», может относиться к различным измерениям, характеристикам или критериям, которые являются основополагающими для рассматриваемых объектов ремонта (контроля) или систем. Например, в контексте НК это может означать размеры образцов, такие как диаметр, длина, высота или иные физические параметры, которые определяют геометрическую конфигурацию объекта. В технологической практике этот столбец

может быть связан с конструкционными размерами, такими как ширина, высота, глубина или какой-либо подобный параметр, необходимый для дальнейших расчетов и анализа.

Второй столбец, обозначенный как «Зона», может давать информацию о характеристиках среды, в которой находятся эти габариты, или же о их классификации. Это может включать в себя данные о типах материалов, их состояниях или характеристиках окружающей среды. Например, в области экологических исследований «Зона» может представлять собой совместимость различных элементов с факторами окружающей среды, такими как температура, влажность, уровень радиации и т. д. В других случаях это может быть связано с различными уровнями или категориями риска для объектов.

Таким образом, матрица $Z(eff)$ служит мощным инструментом, позволяющим систематизировать данные о двух важных параметрах объектов или явлений, которые могут быть важны для анализа и принятия решений в разных областях, от инженерии (таблица 2.5). Каждая строка матрицы указывает на конкретный элемент или объект, для которого известны как его геометрические характеристики, так и условия, либо классификации, в которых он функционирует или исследуется.

Этот подход позволяет упростить и структурировать данные, предоставляя чёткое представление о взаимосвязи между габаритами объектов и соответствующими им зонами, что способствует более глубокому анализу влияния этих параметров на свойства системы в целом.

Таблица 2.5 – Диапазоны эффективных зон сканирования для 3D-сканера *RangeVision Spectrum*

Размер объекта	Минимальная зона сканирования	Средняя зона сканирования	Максимальная зона сканирования
Малые объекты	0–200 мм	200 мм x 150 мм x 150 мм	до 600 мм x 400 мм x 400 мм
Средние объекты	200–600 мм	200 мм x 150 мм x 150 мм	до 1200 мм x 800 мм x 800 мм
Большие объекты	> 600 мм	600 мм x 400 мм x 400 мм	до 1200 мм x 800 мм x 800 мм

Для различных габаритов объектов расчет эффективной зоны сканирования зависит от размера данной зоны и разрешения.

1. В контексте 3D-захвата объекта основная формула включает процесс триангуляции, где используются координаты точек из двух (или более) изображений для вычисления их пространственного положения. Формула триангуляции для определения координат точки в 3D-пространстве (2.36): пусть (u_1, v_1) и (u_2, v_2) — координаты точки на изображениях первых и вторых камер соответственно, а (X, Y, Z) — координаты точки в реальном пространстве.

$$X = \frac{b\,(x_1 - x_2)}{d_x},$$
$$Y = \frac{b\,(y_1 - y_2)}{d_y}, \quad (2.36)$$
$$Z = \frac{f\,b}{(x_1 - x_2)}.$$

где b – базисное расстояние между камерами (расстояние между входными зрачками объективов); f – фокусное расстояние камер; x_1 и x_2 – координаты точки на изображениях с учетом калибровки.

Для расчета горизонтального (W) и вертикального (H) размеров зоны сканирования на определенном рабочем расстоянии (D), при заданных исходных параметрах – фокусное расстояние f = 12 мм, – ширина сенсора $sensor_width$ = 6,4 мм, – высота сенсора $sensor_height$ = 4,8 мм, - рабочее расстояние D = 500 мм, можно использовать следующие формулы (2.37), (2.38), (2.39).

а) Горизонтальный размер (W):

$$W = 2 \cdot D \cdot \tan\left(\frac{\theta_h}{2}\right), \quad (2.37)$$

где D – рабочее расстояние до объекта; h – поле зрения по горизонтали.

б) Вертикальный размер (H):

$$H = 2 \cdot D \cdot \tan\left(\frac{\theta_v}{2}\right), \quad (2.38)$$

где D – рабочее расстояние до объекта; v – поле зрения по вертикали.

Результат расчета:

$$W = 2 \cdot 500 \cdot \tan\left(\frac{30.06}{2}\right) \approx 2 \cdot 500 \cdot \tan(15.03^\circ) \approx 2 \cdot 500 \cdot 0.2679 = 267.9 \text{ мм}$$
$$H = 2 \cdot 500 \cdot \tan\left(\frac{22.62}{2}\right) \approx 2 \cdot 500 \cdot \tan(11.31^\circ) \approx 2 \cdot 500 \cdot 0.2 = 200 \text{ мм}$$

в) Углы поля зрения (θ_h, θ_v):

$$\theta_h = 2 \cdot \arctan\left(\frac{6.4}{2 \cdot 12}\right) \approx 2 \cdot \arctan(0.2667) \approx 2 \cdot 15.03^\circ = 30.06^\circ$$
$$\theta_v = 2 \cdot \arctan\left(\frac{4.8}{2 \cdot 12}\right) \approx 2 \cdot \arctan(0.2) \approx 2 \cdot 11.31^\circ = 22.62^\circ \quad . \qquad (2.39)$$

где $sensor_width$ – физическая ширина сенсора камеры; $sensor_height$ – физическая высота сенсора камеры; f – фокусное расстояние.

Таким образом, эффективная зона сканирования на расстоянии 500 мм составляет примерно 268 мм по горизонтали и 200 мм по вертикали.

3. Расчет матрицы фокусных расстояний для 3D-сканирования объектов различных габаритов. Для того чтобы создать матрицу фокусных расстояний для 3D-сканирования объектов различных габаритов, необходимо учитывать несколько факторов (формула 2.40), включая размеры объектов, расстояние до объектов и требуемое разрешение. Такая матрица поможет выбрать оптимальные параметры для достижения наилучших результатов сканирования.

$$F = \frac{h \cdot d}{D} =. \qquad (2.40)$$

где h – высота объекта; d – расстояние до объекта; D – разрешение, требуемое для поставленной задачи.

Результаты расчета матрицы фокусных расстояний для объектов различных размеров и расстояний представлены в таблице 2.6. Шаги для создания матрицы:

определить размеры объектов для сканирования, зафиксировать расстояния, на которых будут располагаться объекты, выбрать требуемое разрешение сканирования, использовать формулу для расчета фокусного расстояния для каждой комбинации размеров, расстояний и разрешений, использование в реальных проектах.

Таблица 2.6 – Матрица фокусных расстояний

Высота объекта, мм	Расстояние до объекта, мм	Фокусное расстояние, мм (разрешение 1 мм)	Фокусное расстояние, мм (разрешение 2 мм)	Фокусное расстояние, мм (разрешение 5 мм)
100	500	50	25	10
100	1000	100	50	20
100	1500	150	75	30
100	2000	200	100	40
200	500	100	50	20
200	1000	200	100	40
200	1500	300	150	60
200	2000	400	200	80
500	500	250	125	50
500	1000	500	250	100
500	1500	750	375	150
500	2000	1000	500	200
1000	500	500	250	100
1000	1000	1000	500	200

Фокусное расстояние (F): это ключевой параметр объектива, определяющий масштаб изображения и имеет прямое влияние на качество сканирования. Для объекта высотой 100 мм, расположенного на расстоянии 500 мм с требуемым разрешением 1 мм фокусное расстояние рассчитывается так:

$$F = \frac{h \cdot d}{D} = \frac{100 \cdot 500}{100} = 50 \text{ мм}$$

Эта матрица должна помочь в предварительном выборе параметров для оптимизации процесса 3D-сканирования в соответствии с различными физическими размерами и требованиями разрешения.

Матрица фокусных расстояний позволит оптимально подобрать параметры сканирования в зависимости от размеров объекта, расстояния до него и требуемого разрешения. Подобная матрица полезна для планирования процесса 3D-

сканирования, особенно в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокую точность и качество получаемых данных. А наличие дополнительных эффективных зон сканирования, позволяет исключить риски при ТПП ремонта ПС. В зависимости от того, интересуетесь ли вы сканированием мелких объектов или крупных структур, важно учитывать указанные параметры для эффективного получения 3D-моделей. Рекомендуется также проводить тестовые сканирования для определения оптимальных настроек вашего оборудования.

2.4.3 Применение неразрушающего контроля при ремонте узла люлечного подвешивания локомотивов серии ВЛ80

В описанном ТП используется вид (метод) УЗК для определения характеристик дефекта, что является важной операцией в НК деталей и узлов локомотивов. Последовательность измерений (рисунок 2.15): в произвольном положении преобразователя 1 на контролируемом изделии 2 в пределах регистрации эхо-сигнала от дефекта при помощи устройства, производят измерение амплитуды эхо-сигнала $U(x_i)$, и времени его прихода t_i, от дефекта 3. По времени t_0 прихода эхо-сигнала в точке его максимального значения $U(\alpha_0)$, при известной скорости распространения ультразвука в материале изделия и номинальному значению угла ввода α_0, рассчитывают глубину залегания дефекта. По времени прихода эхо-сигнала в произвольных точках вычисляют значение r_i от точки выхода луча преобразователя до дефекта, зная вычисленную глубину отражателя H, рассчитывают угол ввода ультразвука в данной точке и координату точки выхода луча преобразователя. Далее строят нормированную функцию огибающей $\Phi(x_i)$, характеризующую форму ИР дефекта [47].

Рекомендации по идентификации дефектов по их индикатрисам рассеяния предусматривают:

– проведение первичного этапа контроля ПЭП с углом ввода 34° (близким к критическим) с измерением ИР выявленного дефекта;

– анализ изменения амплитуды эхо-сигнала от выявленного дефекта; предварительную идентификацию дефекта по типу на основании уровня (от амплитуды эхо-сигнала) их фиксации;

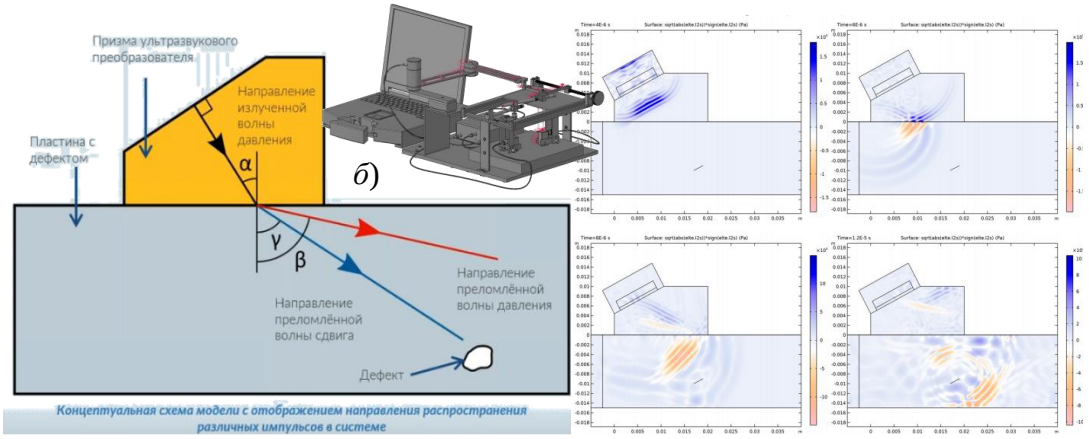
– проведение уточняющего этапа контроля тем же преобразователем с углом ввода 34° с измерением ИР выявленного дефекта;

– принятие или отклонение гипотезы H_0 (дефект плоскостной или объёмный); корреляционный анализ путём составления корреляционной матрицы и вычисления множественной корреляции (конкордации) между парами кривых, а также оценки достоверности и статистической значимости результатов вычисления коэффициентов корреляции и конкордации на заданных уровнях значимости;

– подтверждение гипотезы H_0;

– оценку качества детали;

– занесение результатов контроля в базу данных [47].



а) схема ультразвукового контроля; *б*) оборудование для измерения индикатрис рассеяния дефектов; *в*) результат моделирования (ввод ультразвуковой волны под углом близким к первому критическому углу 34°)

Рисунок 2.15 – Схема ультразвукового контроля

Последовательность операций по идентификации дефектов при УЗК приведена на рисунке 2.16. В соответствии с методикой УЗК производят выбор схемы прозвучивания с разных сторон сварного соединения прямыми или отражёнными лучами в зависимости от их типа, толщины, конфигурации

поверхностей контроля и противоположных поверхностей, наличия конструктивных элементов, ограничивающих перемещение наклонных ПЭП с углами ввода 34º и 58º.

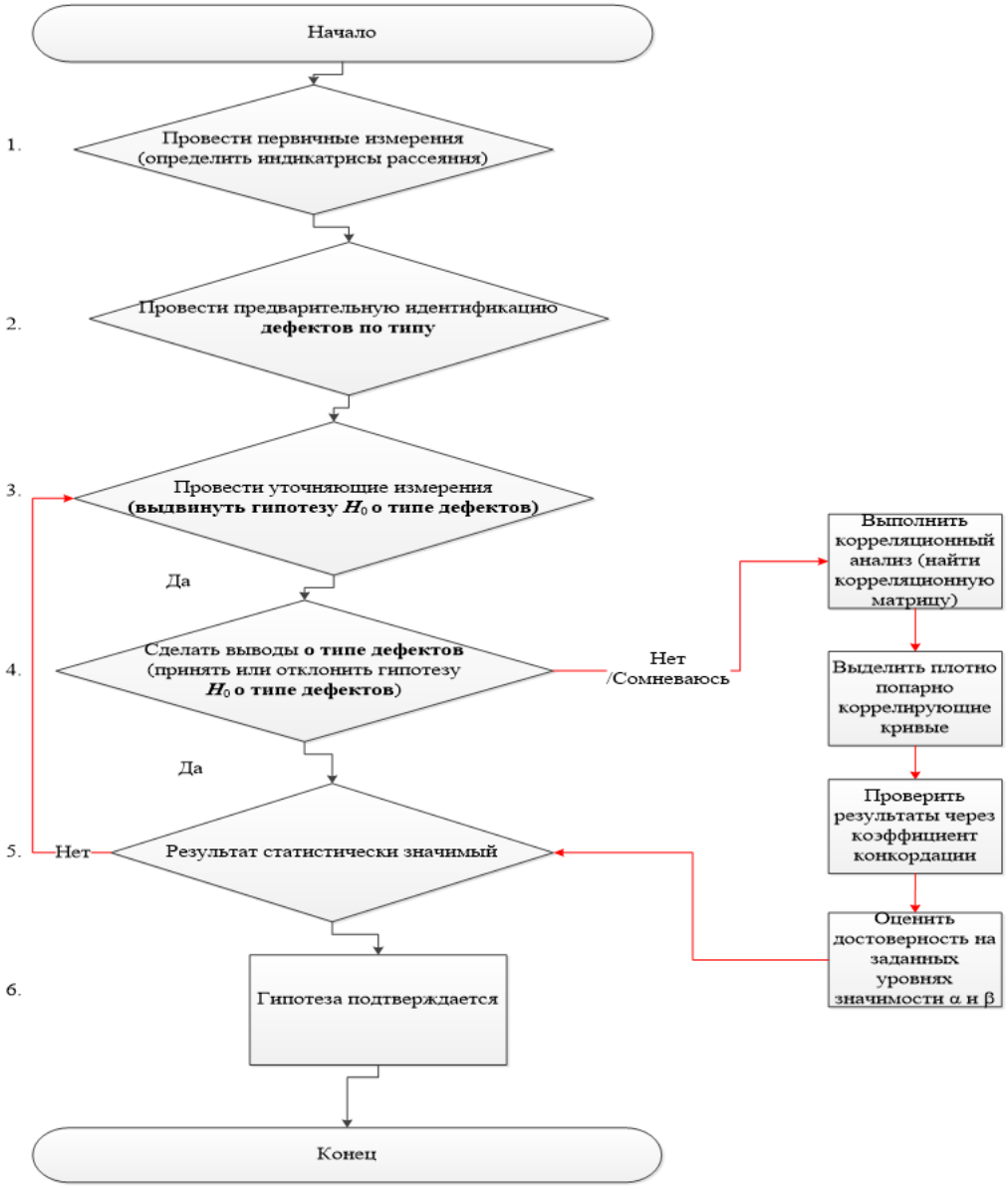
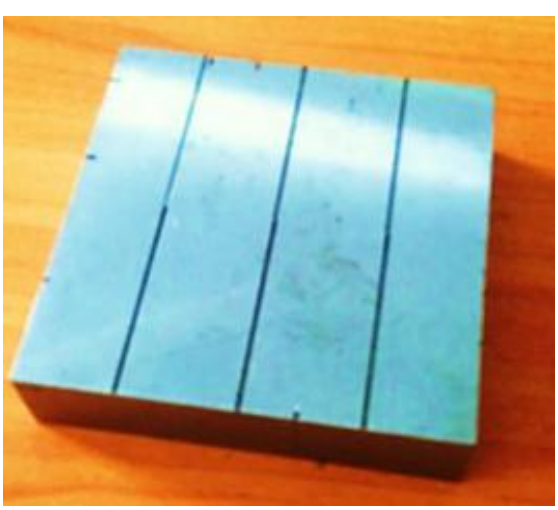


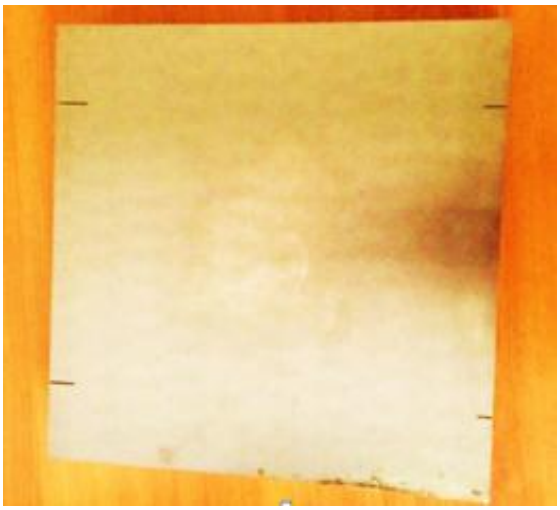
Рисунок 2.16 – Блок-схема последовательности операций по идентификации дефектов

ИР плоскостных и объемных дефектов, получены путём регистрации временных огибающих, с последующим пересчётом времени прихода эхо-сигнала в угол ввода в соответствующей точке. На рисунке 2.17 представлены схемы прозвучивания, которые были использованы при измерениях индикатрис рассеяния плоскостных и объемных дефектов, представленных в данной работе.

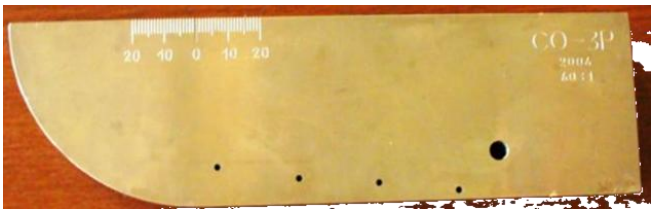
Для того чтобы избежать воздушной прослойки между поверхностью преобразователя и образца использовалось масло индустриальное.



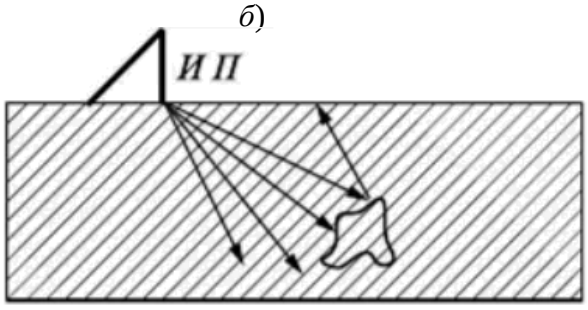
а)



б)



в)



г)

Настроечные образцы с вертикальными (*а*), горизонтальными (*б*) рисками (пропилами), с боковыми цилиндрическими отверстиями диаметром: 6 мм (на глубине 44 мм) и диаметром 2 мм (на глубине 47 мм) (*в*), схема контроля эхо-методом (*г*) локомотивов серии ВЛ80в/и с дефектами, полученными с нарушением штатной технологии

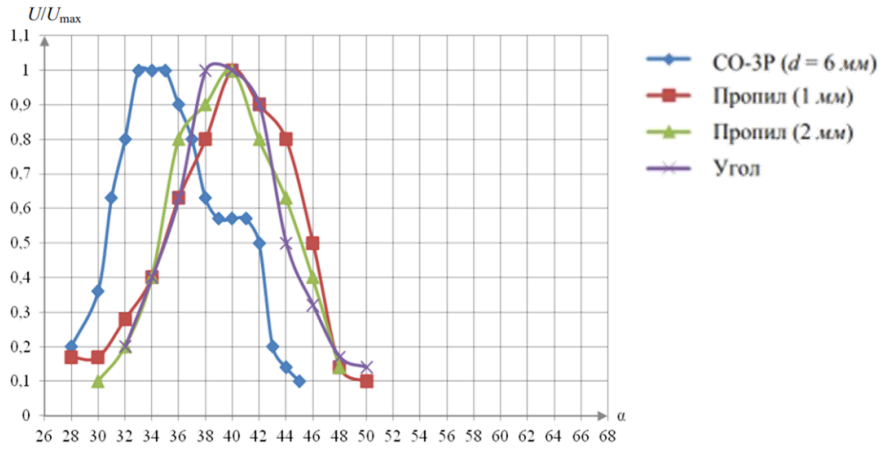
Рисунок 2.17 – Схема ультразвукового контроля настроечных образцов

ИР плоскостных дефектов, сведения по измерениям которых приведены в таблице 2.7, (при применении ПЭП с углом ввода 34º) представлены на рисунке 2.18, дающих наибольшую информацию о характере дефекта, где каждая кривая представляет собой график, соответствующий N измерений каждого образца (в данной работе $N \geq 25$).

Таблица 2.7 – Данные измерения индикатрис рассеяния плоскостных и объёмных дефектов

№ ИР	Тип дефекта	Параметры дефектов (Ø, мм; ширина – *в*, мм х длина – *l*, мм х высота – *h*, мм)	Глубина залегания дефектов – Δ, мм	Контроль (прямым лучом)
1	Боковое цилиндрическое отверстие	Ø 6	44	прямым
2	Пропил	0,1 х 10 х 1	1	прямым
3	Пропил	0,1 х 10 х 2	2	прямым
4	Угол	1 х 300 х 4	59	прямым

Результаты измерений показали, что наиболее информативными оказались ИР преобразователей с углом ввода 34° (угол призмы, близкий к первому критическому углу для пары материалов оргстекло-сталь) и углом 58° (близкому к дополняющему указанный угол до 90°).



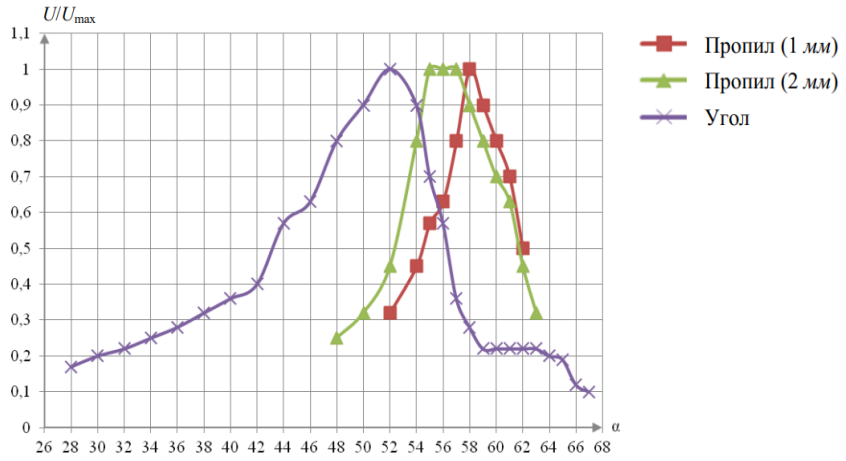
U – амплитуда эхо-сигнала, α_0 – угол ввода ультразвуковой волны, град.

Рисунок 2.18 – Индикатрисы рассеяния моделей дефектов для преобразователя с углом ввода 34° (близким к первому критическому)

По индикатрисам, полученным при использовании преобразователя с углом ввода 34°, вполне, возможно отличить направленный дефект от ненаправленного. В данном случае видно расхождение пиков индикатрис от дефектов в виде: отверстия, рисок (пропилов) и угла, а именно максимум индикатрис рассеяния моделей (непроваров, трещин) смещён к углам в области 39–40°.

Во втором случае по индикатрисам, полученным при использовании преобразователя с углом ввода 58°, наблюдается расхождение пиков индикатрис от дефектов в виде рисок (пропилов) и угла. Максимум индикатрис рассеяния от

уголкового отражателя смещён в область углов 52–56° и чем больше величина вертикальной стенки модели дефекта на рисунке 2.19, тем больше смещение влево.



U – амплитуда эхо-сигнала, α_0 – угол ввода ультразвуковой волны, град.

Рисунок 2.19 – Индикатрисы рассеяния моделей дефектов для преобразователя с углом ввода 58° (близким к углу, дополняющему первый критический до 90°)

ИР плоскостных дефектов, сведения по измерениям которых приведены в таблице 2.8, (при применении ПЭП с углом ввода 58º).

Таблица 2.8 – Сведения по измерениям индикатрис рассеяния плоскостных дефектов при применении ПЭП с углом ввода 58º

№ ИР	Дефект	Размеры дефектов: (Ø, (мм) //ширина – *в*, (мм) х длина – *l*, (мм) х высота – *h*, (мм)	Глубина залегания дефектов – Δ, (мм)	Контроль (прямым лучом)
1	Пропил	0,1 х 10 х 1	1	прямой
2	Пропил	0,1 х 10 х 2	2	прямой
3	Угол	1 х 300 х 4	59	прямой

Появление «плеча» на индикатрисе рассеяния объясняется образованием, при падении продольной волны на границу раздела двух (оргстекло-сталь) под углом близким к первому критическому продольно-поверхностной головной волны, которая порождает боковую поперечную волну [47, 252].

При использовании преобразователя с углом ввода 42° ИР от различных дефектов становятся не отличимыми (т. к. все пики различных индикатрис сливаются вместе) и не информативными, таким образом, при использовании преобразователя с углом ввода 42° мы не можем определить характер дефекта [47]. Аналогичная ситуация складывается при применении оставшихся ПЭП (36°, 38°, 40°, 45° и 50°). Данные, полученные при их применении так же не дали информации о дефектах (тип и характер).

Таким образом, в работе было показано, что ИР дефектов наиболее информативны при углах падения ультразвука на дефект близких к критическим. Как было отмечено в первом разделе разделение (идентификация) дефектов только на два класса, объёмные и плоскостные, позволяет значительно сократить объем неоправданных затрат на ремонт изделий по устранению малозначительных дефектов.

Однако данные измерения оказываются различимыми друг от друга в рамках приборной погрешности. В итоге каждая кривая – усреднённый результат не менее 25 измерений. Аналогично, отклонение среднего значения («усреднённой» кривой) от имеющихся кривых находится в рамках приборной погрешности», т. е. отклонение от других кривых в этих рамках. В рамках этой погрешности мы можем брать любую интерполяционную кривую, которая будет отличаться от каждой из 25 полученных кривых не более чем на приборную погрешность. Построен ряд интерполяционных кривых в виде полиномов n-ой степени, где n – количество измерений для каждой из 25 кривых. В итоге получаем 25 интерполяционных кривых. И для каждой группы считаем «среднюю» кривую. Методика расчёта заключается в следующем: берутся точки на оси абсцисс x_1, x_2, ... и в каждой этой точке считаем значения $y=y_1(x_1)$, $y_2(x_2)$, … $y_n(x_n)$ для каждой интерполяционной кривой. Затем считаем среднее арифметическое значение $y(x)$ в каждой точке x_n. Если использовать такой метод, то получится, что мы провели не 7 измерений, а 175. С точки зрения теории вероятностей и математической статистики такого количества измерений достаточно, чтобы говорить о достоверности проделанной

работы. По факту мы заменяем 25 однотипных образцов на 25 однотипных измерений.

Одним из признаков признаком, который зависит от соотношения между параметрами акустического тракта (длиной волны, длительностью импульса, шириной пучка, ракурсом озвучивания), с одной стороны, и размерами, конфигурацией, степенью шероховатости поверхности дефекта – с другой, является форма ИР. ИР объёмных и плоскостных дефектов отличаются друг от друга формой. При озвучивании плоскостного дефекта с разных сторон ИР отличаются друг от друга, а при озвучивании объёмного дефекта – ИР могут практически совпадать [47].

В соответствии с предложенной методикой УЗ контроля корреляционный анализ индикатрис рассеяния производится путём составления корреляционной матрицы. Вычисляем коэффициенты попарной корреляции между кривыми i и j через построение интерполяционных кривых для выборок N_i (количество измерения при построении кривой i) и N_j (количество измерения при построении кривой j) в измерениях. Далее производится дискретизация кривых i и j путём разбиения отрезка $[\alpha_1, \alpha_n]$: $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \ldots < \alpha_n$ и построения сводной таблицы 2.9 расчётных данных, где $A_i(\alpha)$ и $A_j(\alpha)$ – значения интерполирующей функции в соответствующей точке α при значительном количестве измерений (в качестве интерполирующей функции используем полином соответствующей степени) [47].

Таблица 2.9 – Значения интерполирующей функции

α	α_1	α_2	α_3	α_n
$A_i(\alpha)$	$A_i(\alpha_1)$	$A_i(\alpha_2)$	$A_i(\alpha_3)$	$A_i(\alpha_n)$
$A_j(\alpha)$	$A_j(\alpha_1)$	$A_j(\alpha_2)$	$A_j(\alpha_3)$	$A_j(\alpha_n)$

В таблице 2.10 представлена корреляционная матрица индикатрис рассеяния дефектов, которая получена из коэффициентов попарной корреляции Пирсона, где каждый коэффициент отражает силу и характер взаимосвязи между двумя

массивами измерений (между кривыми). Коэффициент корреляции $k_{i,\ j}$ между выборками $A_i(\alpha)$: $\{A_i(\alpha_1), A_i(\alpha_2) \dots A_i(\alpha_n)\}$, и $A_j(\alpha)$: $\{A_j(\alpha_1), A_j(\alpha_2) \dots A_j(\alpha_n)\}$, считается по формуле 2.41:

, (2.41)

где $cov(A_i(\alpha), A_j(\alpha))$ – ковариация; $D(A_i(\alpha), A_j(\alpha))$ – дисперсия.

Таблица 2.10 – Матрица (корреляционная) индикатрис рассеяния дефектов

Номера кривых (индикатрис рассеяния дефектов)		Номера кривых (индикатрис рассеяния дефектов)						
		1	2	3	4	5	6	7
	1	**1**	0,35	0,38	0,36	031	0,34	0,36
	2		**1**	0,33	0,35	0,36	0,37	0,35
	3			**1**	0,26	0,34	0,33	0,35
	4				**1**	0,35	0,26	0,36
	5					**1**	0,33	0,38
	6						**1**	0,27
	7							**1**

ИР, относящиеся к объёмному типу дефекта, более плотно коррелируют друг с другом, чем – относящиеся к плоскостному. Из таблицы видно, что отрицательно коррелируют с наименьшей степенью попарной связи кривые от пропилов и углов (рисунки 2.18, 2.19), соответствующие плоскостному типу дефекта, что подтверждает предложенную методику УЗК на основе дополнительной информации об их индикатрисах рассеяния. Для уточнения полученного результата следует вычислять множественную корреляцию (конкордацию) для группы попарно коррелирующих кривых, а также для группы кривых, показывающих слабый или средней уровень силы попарной корреляции.

Множественная корреляция (коэффициент конкордации) вычисляется на основе проведенной ранее дискретизации интерполяционных кривых *i* и *j* с получением соответствующих выборок данных. В приведенном примере расчётный коэффициент конкордации для группы отрицательно коррелирующих кривых (кривые 2, 3, 4, 5, 6 и 7) равен 0,41, что подтверждает наличие наименьшей степени попарной связи между указанными индикатрисами рассеяния. В работе расчётный коэффициент конкордации для группы наиболее плотно попарно

коррелирующих кривых (кривые 1, 6 и 7) объёмных дефектов равен 0,83, что подтверждает наличие плотной связи между ними [47].

В частных случаях, когда коэффициент конкордации находится в пределах $0,83 < K < 1$, $0 < K < 0,41$ или $0,41 < K < 0,83$, требуется провести уточняющие измерения в соответствии с п.3 последовательности выполнения технологических операций. Расчёт коэффициента конкордации уточняет результаты первичного корреляционного анализа. Оценка статистической значимости результатов вычисления коэффициентов корреляции и конкордации производится на заданных уровнях значимости $\alpha = 0,05$ и $\beta = 0,05$, где α и β вероятности ошибок первого и второго рода соответственно. Дополнительно достоверность результатов может быть проверена с помощью сопоставления полученных результатов с базой данных ранее выполненных измерений и их результатов. Такая проверка приобретает практическую актуальность при использовании автоматизированных компьютерных программ, выполняющих измерения и оценку типа дефекта на основе дополнительной информации об их индикатрисах рассеяния. Значительные отличия индикатрис рассеяния объёмных и плоскостных дефектов позволяют практически свести на нет случайные отклонения в их построении, что гарантирует достоверность оценки. Результаты, полученные в данной работе с помощью устройства [373], хорошо согласуются с ранее полученными экспериментальными данными [374].

Совокупное применение 3D-промышленных решений при одновременном применении комплексного НК, сопровождаемое интеграцией нейросетевых моделей и ЦД в процесс ремонта (контроля), представляет собой высокоэффективный способ, который существенно увеличивает надёжность и безопасность эксплуатации узла люлечного подвешивания. В условиях современной ТПП важнейшим параметром повышения информативности ТП НК является глубокое понимание факторов, влияющих на точность, достоверность и идентификации дефектов. Следует отметить, что повторные измерения одного и того же дефекта могут демонстрировать различные результаты в связи с

возможными изменениями в настройках оборудования, условиях проведения контроля и процессе калибровки, не исключая человеческий фактор. Данная динамика взаимодействия базируется на внутренне присущих параметрах диагностического метода и требует чётких методологических процедур для минимизации потенциальных рисков.

Многообразие типов дефектов, даже одинакового размера, может приводить к различным оценкам, обусловленным изменениями физических свойств материалов, их геометрической конфигурацией и ориентацией. Каждый из этих факторов требует внимательного учёта и детального анализа с целью достижения высокой надежности и точности результатов ремонта (контроля). Это подчёркивает необходимость в разработке и внедрении высокоадаптивных методов, способствующих улучшению качества диагностики и оценке состояния деталей и узлов локомотивов на основе предложенных способов контроля.

2.4.3 Определение угла ввода пьезоэлектрического датчика в сталь через полиамидную накладку с учётом критического угла для обеспечения эффективного ультразвукового контроля

Чтобы выполнить расчёт угла ввода пьезоэлектрического датчика в сталь через полиамидную втулку с учетом требований к критическому углу, начнём с определения критического угла для перехода из одного материала (полиамид) в другой (сталь). Критический угол – это угол, при котором происходит полное внутреннее отражение. Когда звуковая волна идёт из менее плотного материала в более плотный, критический угол можно найти по (2.42):

$$\theta_{\text{крит}} = \arcsin\left(\frac{v_1}{v_2}\right), \tag{2.42}$$

где v_1 – скорость звука в первом материале (полиамид) ≈ 2400 м/с, а v_2 – скорость звука во втором материале (сталь) ≈ 5900 м/с.

Теперь можем подставить значения и рассчитать критический угол:

$$\theta_{\text{крит}} = \arcsin(\frac{2400}{5900})$$

Вычисляем:

$$\theta_{\text{крит}} \approx \arcsin(0.4068) \approx 24.0^{\circ}$$

Теперь, чтобы получить угол ввода в сталь, давайте рассмотрим, что угол ввода в полиамид должен быть больше критического угла, чтобы предотвратить отражение. Предположим, что мы хотим установить угол в сталь близким к этому критическому углу, то нам нужно будет рассчитать угол ввода в полиамид.

Используя закон Снеллиуса, зададим (формула 2.43):

$$\frac{\sin\left(\theta_{ввод}, ПА\right)}{v_1} = \frac{\sin\left(\theta_{крит}\right)}{v_2}, \quad (2.43)$$

Переходим к расчёту угла ввода в полиамид (2.44).

Для этого вначале нам необходимо вернуться к критическому углу, который мы только что нашли, и выразить угол ввода в полиамид:

$$\sin\left(\theta_{ввод}, ПА\right) = \sin\left(\theta_{крит}\right)\frac{v_1}{v_2}, \quad (2.44)$$

Подставим числовые значения:

$$\sin\left(\theta_{ввод}, ПА\right) = \sin(24^{\circ})\frac{2400}{5900}$$

Вычислим *sin*(24°):

$$\sin(24^{\circ}) \approx 0{,}4067$$

Теперь подставим:

$$\sin\left(\theta_{ввод}, ПА\right) \approx\approx 0{,}4067 \cdot \frac{2400}{5900} \approx 0{,}4067 \cdot 0{,}4068 \approx 0{,}1654$$

Следовательно, вычислим угол ввода в полиамид:

$$\theta_{ввод}, ПА = \arcsin(0{,}1654) \approx 9.5°.$$

Это значение указывает на угол, при котором происходит максимально эффективный переход звуковых волн из полиамидной накладки в сталь, оставаясь в пределах критического угла.

Таким образом, чтобы получить угол ввода в сталь, близкий к первому критическому углу, необходим угол ввода в полиамид около 9.5°, чтобы избежать полного внутреннего отражения, но и достаточно мал, чтобы обеспечить адекватное проникновение звука в сталь.

2.5 Выводы по разделу 2

Результаты, полученные во втором разделе работы, посвящены выбору методов повышения эффективности ТПП при ТОиР ТПС, можно изложить следующим образом.

Во-первых, системный подход к модернизации производственно-технологических процессов на предприятиях, осуществляющих ремонт ТПС, следует признать ключевым элементом для достижения намеченных целей. Это подразумевает необходимость учёта как внутренних ресурсов организации, так и внешних факторов, влияющих на её функционирование. При этом методология системной инженерии предоставляет возможность интеграции различных компонентов и подсистем, что способствует более глубокому пониманию и оптимизации рабочих процессов.

Во-вторых, качественная ТПП представляет собой основное условие для успешной деятельности сервисных предприятий, поскольку современные требования к локомотивам предъявляют строгие критерии в отношении надёжности и долговечности. Высокая степень сложности конструктивных элементов ТПС обуславливает необходимость использования эффективных методов планирования и организации ремонтов, а также внедрения новейших информационных технологий и автоматизации производственно-технологических

процессов, что позволяет существенно ускорить выполнение работ и повысить их качество.

В-третьих, применение современных технологий сбора и анализа данных, включая НК и промышленные 3D-решения, способствует повышению уровня информативности производственно-технологических процессов. Это, в свою очередь, позволяет значительно улучшить процессы диагностирования и устранения неисправностей, что является важным фактором в поддержании надёжности и долговечности ТПС.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ УЗЛА ЛЮЛЕЧНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ЛОКОМОТИВОВ СЕРИИ ВЛ80 С УЧЁТОМ ПРИМЕНЕНИЯ 3D-ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ И КОМПЛЕКСНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

В разделе представлен системный подход к исследованию и совершенствованию конструкции узла люлечного подвешивания локомотивов серии ВЛ80 с акцентом на применение 3D-промышленных решений и комплексного НК.

Проведён анализ существующих патентных разработок в области технологий и конструкций подвешивания, что позволяет выявить эффективные решения и обозначить перспективные направления для внедрения инновационных подходов. Рассматриваются этапы проектирования новых технологий и конструктивных улучшений, а также идентифицируются слабые места текущих конструкций. Анализ включает исследование новых материалов, что способствует повышению эксплуатационных характеристик.

Представлена оценка предложенных решений для модернизации узла, которая подчёркивает их важность в контексте оптимизации надежности и безопасности эксплуатации ПС.

3.1 Анализ элементов патентных исследований в области технологий и конструкций узлов подвешивания локомотивов

Патентное исследование имеет важное значение для определения патентной чистоты предлагаемого технического решения, а также для оценки его новизны и логической обоснованности. В данном контексте узел люлечного подвешивания является критически важным элементом, который должен соответствовать существующим патентным правам, чтобы избежать потенциальных нарушений.

Рассмотрим патенты и авторские свидетельства (рисунок 3.1), связанные с конструкциями узлов подвешивания локомотивов, чтобы понять существующий уровень техники.

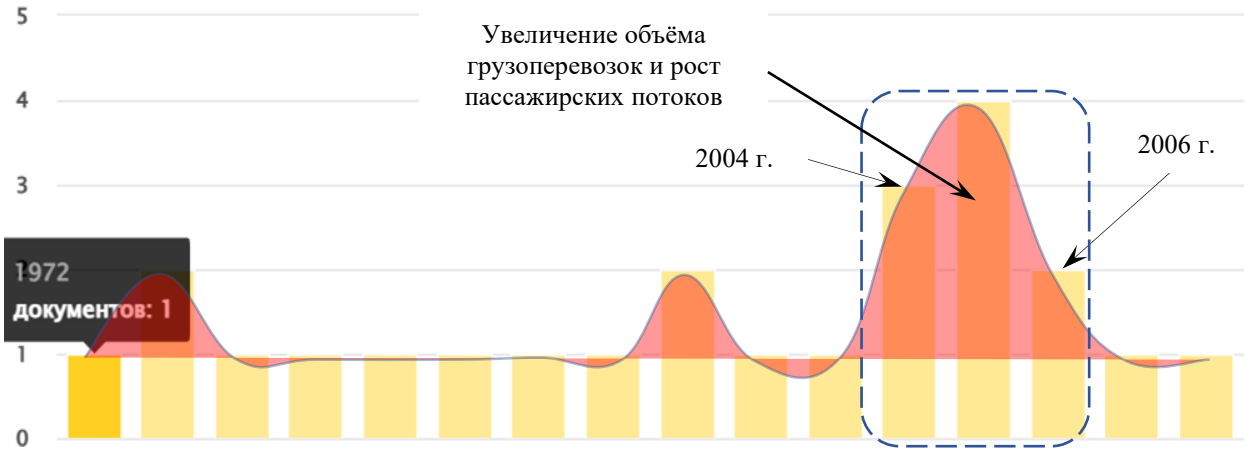


Рисунок 3.1 – Количество патентов по запросу «узел люлечного подвешивания» с 1972 по 2009 гг.

Рост патентных исследований в период с 2004 по 2006 годы в области совершенствования конструкции узлов люлечного подвешивания локомотивов можно объяснить несколькими ключевыми причинами. Во-первых, в этот период наблюдался активный спрос на улучшение характеристик ПС, что было связано с общей тенденцией повышения эффективности и безопасности железнодорожного транспорта. Увеличение объёма грузоперевозок и рост пассажирских потоков требовали новых решений, направленных на улучшение надежности и эксплуатационных качеств локомотивов. Во-вторых, растущая конкуренция на рынке железнодорожного транспорта стимулировала компании к созданию инновационных и эффективных решений, нацеленных на повышение конкурентоспособности их продукции. Это создало условия для научных и практических исследований, направленных на оптимизацию существующих технологий, что, в свою очередь, привело к значительному увеличению патентных заявок. В-третьих, в этот период на рынке железнодорожного транспорта отмечался рост конкуренции, который побуждал компании разрабатывать инновационные и эффективные решения, направленные на усиление конкурентных

преимуществ их продукции. Это активировало деятельность исследовательских и проектов, сосредоточенных на создании патентов.

Наконец, государственная поддержка и инвестиции в инфраструктуру железнодорожного транспорта также играли важную роль. Программы модернизации и развития транспортной системы создавали благоприятные условия для проведения научных исследований и коммерциализации новых технологий, что в свою очередь способствовало увеличению патентной активности в данной сфере. Все эти факторы в совокупности послужили движущей силой для роста патентных исследований в области усовершенствования конструкции узлов люлечного подвешивания локомотивов в указанный период.

Рассмотрим три основных патента: RU55713 U1, RU2097234 C1 и RU1348130 A1, все относящиеся к узлам люлечного подвешивания кузова железнодорожного транспорта: 1. RU55713 U1 представляет узел люлечного подвешивания с тягой в виде цилиндрического стержня. Основное отличие — это удлинение тяги (соотношение длины к диаметру L/D = 24÷32), что позволяет уменьшить возвращающую силу самоустановки тележки и, как следствие, снижает износ колес. Это решение направлено на оптимизацию работы конструкции на криволинейных участках. 2. RU2097234 C1 использует схему подвешивания, где контакты осуществляются через сферические шарниры. Здесь выделяется конструктивная простота и повышение надежности за счёт замены плоских шарниров на сферические. Однако, несмотря на повышенные эксплуатационные свойства, конструкция всё ещё подвержена износу в условиях высоких динамических нагрузок. 3. RU1 26311 C2 фокусируется на увеличении демпфирования колебаний кузова за счёт выполнения шарнирных соединений как нижних, так и верхних сферических. Это решение значительно улучшает динамику, однако усложняет конструкцию и может увеличивать материалоемкость.

Обобщив информацию, можно выделить следующие достоинства и недостатки: а) Достоинства:

– RU55713 U1: оптимизация возвращающей силы, снижение горизонтальных сил и износа колес;

– RU2097234 C1: простота конструкции, повышение надежности за счёт применения сферических шарниров, что позволяет снизить нагрузку на детали;

– RU1 26311 C2: существенное улучшение динамических характеристик за счёт сферических соединений, что увеличивает срок службы конструкции.

б) Недостатки:

– RU55713 U1: потенциально сложные параметры настройки длины стержня и его оптимизации для различных условий эксплуатации;

– RU2097234 C1: возможные ограничения по угловым перемещениям из-за особенностей применения шарниров, что может значительно увеличивать износ;

– RU1 26311 C2: более сложная компоновка и потенциальное увеличение материалоемкости, что может негативно повлиять на производственные затраты.

Анализ патентов RU2192978 C2, RU44970 U1 и RU2106270 C1 показывает, что они стремятся к улучшению динамических характеристик и снижению износа, но сталкиваются с проблемами сложности конструкции и возможного увеличения производственных затрат. Патенты акцентируют внимание на различных типах подвесок, как на основе демпферов, так и на упрощении структуры.

Например, патент RU2192978 C2 выделяется применением Т-образных промежуточных балок, что улучшает весовые нагрузки, но необходимость в объемных конструкциях может усложнить процесс установки и увеличить габариты. Патент RU44970 U1 использует резинометаллические демпферы для улучшения плавности движения и уменьшения воздействия на пути, однако это может вызвать повышенный износ деталей из-за трения. Патенты RU55713 U1 и RU2097234 C1 также дают понять, что конструктивная простота может привести к повышению надежности, однако такая простота может нарушить высокие динамические характеристики в условиях сложных нагрузок. Например,

использование сферических шарниров, как в RU2097234 C1, позволяет увеличить надежность, но может снизить общую живучесть под воздействием высоких динамических нагрузок.

Таким образом, создание конструктивного решения требует сбалансированного подхода, учитывающего специфику эксплуатации узла. Патенты с повышением уровня надежности и динамичности, такие как RU2192978 C2 и RU55713 U1, представляют интерес, но могут требовать более высоких затрат на производство и обслуживание. Напротив, патенты, предлагающие простые решения, такие как RU2106270 C1 и RU2097234 C1, могут оказаться более подходящими для стандартных условий, но с ограничениями по максимальным нагрузкам. При этом их успех зависит как от конструктивных особенностей, так и от условий, в которых они будут эксплуатироваться. Безусловно, такие улучшения в подвесном узле важны для повышения долговечности и надежности железнодорожного ПС.

Конструктивные решения, рассчитанные на снижение износа, могут найти применение в современных системах, однако при этом необходимо учитывать, что увеличение сложности конструкции может также приводить к увеличению стоимости и более сложному обслуживанию узлов.

Сравнительный анализ патентов показывает, что каждое из технических решений имеет свои уникальные подходы к решению задачи подвешивания кузова железнодорожного транспортного средства при этом не решая проблему необратимого повреждения стержня люлечного подвешивания, как следствие сверхнормативный износ стальной втулки люлечного подвешивания (8ТН.294.018), что не позволяет проводить НК контроль узла без его разборки.

3.2 Этапы технических решений, направленных на доработку узла, и их конструктивная реализация с учётом современных требований и стандартов. Корректировка подходов к проведению неразрушающему контролю стержня люлечного подвешивания электровозов: анализ текущей документации и предложения по модернизации

Анализ действующей документации показал, что в РК 103.11.363-2005-ЛУ «Руководство по ремонту и модернизации люлечного подвешивания при среднем и капитальном ремонтах электровозов ВЛ80 в/и» требования к методам НК стержня люлечного подвешивания (Э.1735.00.03, рисунок 3.2) изложены некорректно без учёта условий работы этой детали и возможности образования опасных дефектов.

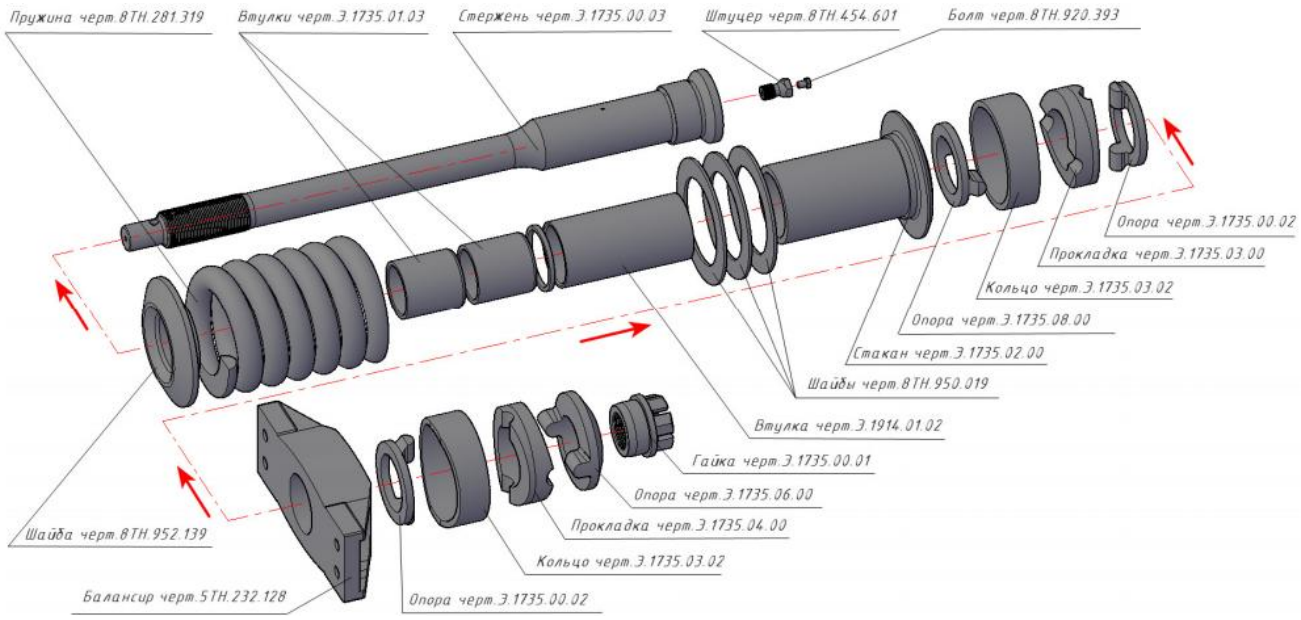


Рисунок 3.2 — «Взрыв схема» узла люлечного подвешивания

В приведенном в этом документе перечне деталей электровозов ВЛ80 в/и, подлежащих НК (таблица 1), требования к УЗК стержня люлечного подвешивания отсутствуют. Согласно требованиям таблицы 2 Руководства контроль стержней люлечного подвешивания допускается, проводят магнитопорошковым или вихретоковым методом, дополнительно цветным или алюминесцентным методом.

В то же время в п. 5.1.1 Руководства указано о необходимости проведения УЗК стержня люлечного подвешивания без демонтажа втулки, применение которого для этой детали **затруднительно**. Вид (метод) по проведению УЗК стержня люлечного подвешивания в инструкции ЦТт-18/3 «Инструкция по УЗК деталей локомотивов и вагонов электропоездов на базе программируемого дефектоскопа УД2-102» отсутствует. Без применения современнных технологий и средств НК разрабатывать и вносить изменения в Инструкцию ЦТт-13/3, в части УЗК стержня люлечного подвешивания не целесообразно, так как разработка эффективной методики представляется очень сложной и дорогостоящей.

При проведении ремонтных работ НК деталей электровоза проводится с целью выявления эксплуатационных дефектов типа усталостных трещин, которые образуются в основном в поверхностном слое детали. Поэтому нецелесообразно проводить УЗК стержня люлечного с целью выявления внутренних дефектов при демонтированных втулках, при этом при модернизации узла люлечного подвешивания в части замены стальных втулок на полиамидные, такой контроль необходим согласно п. 5.1.1 Руководства **без демонтажа втулок** (Э.1735.01.03).

Подробнее технологию ремонта и особенности УЗК модернизированного узла стержня люлечного подвешивания электровозов серии ВЛ80в/и, его конструктивные элементы и работу в эксплуатации рассмотрим в 6 разделе работы.

3.3 Технологическое оснащение ремонтного производства на участках неразрушающего контроля стержня узла люлечного подвешивания локомотивов серии ВЛ80

Стержень узла люлечного подвешивания на локомотивах серии ВЛ80в/и является одной из критически важных деталей, от состояния которой зависит безопасность и надежность эксплуатации ПС (рисунок 3.3).

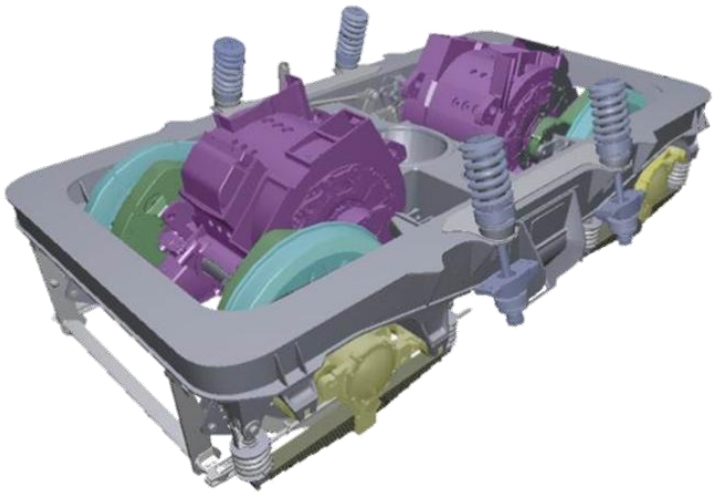


Рисунок 3.3 — Подвеска люлечная (5ТН.127.250)

Для обеспечения высокого уровня обслуживания и ремонта необходимо внедрение комплекса технологического оснащения для проведения НК данного узла. Классифицируем на четыре категории оборудования для эффективной работы ремонтного комплекса (рисунок 3.4): 1. Обязательное оборудование: — это ключевая категория, включающая устройства и системы, которые требуют замены в соответствии с законодательными предписаниями или замечаниями надзорных органов. Обновление этого оборудования необходимо для обеспечения безопасности, соблюдения норм и стандартов, а также для предотвращения потенциальных аварий и инцидентов. 2. Поддержание оборудования к этой категории относятся элементы, критически важные для поддержания работоспособности текущих мощностей СЛД. Замена устаревшего или неисправного оборудования не только минимизирует риски поломок, но и значительно увеличивает надежность системы. Поддерживающее обслуживание играет важную роль в предотвращении простоя, что ведёт к улучшению общей производительности. 3. Эффективность оборудования, влияющее на снижение простоя локомотивов в ремонте, критически важно для повышения эффективности работы и улучшения показателей коэффициента готовности в эксплуатации (КГЭ). Включение высокоэффективных диагностических и ремонтных технологий позволяет оперативно выявлять неисправности, что способствует сокращению

времени, затрачиваемого на восстановление работоспособности локомотивов. 4. Прочие: - эта категория включает в себя оборудование, необходимое для дооснащения СЛД в соответствии с регламентами, указанными в проектной документации. Оно может включать модернизацию систем в соответствии с современными требованиями и инновациями в области диагностики и ремонта, что позволяет СЛД соответствовать последним технологическим достижениям и стандартам качества.

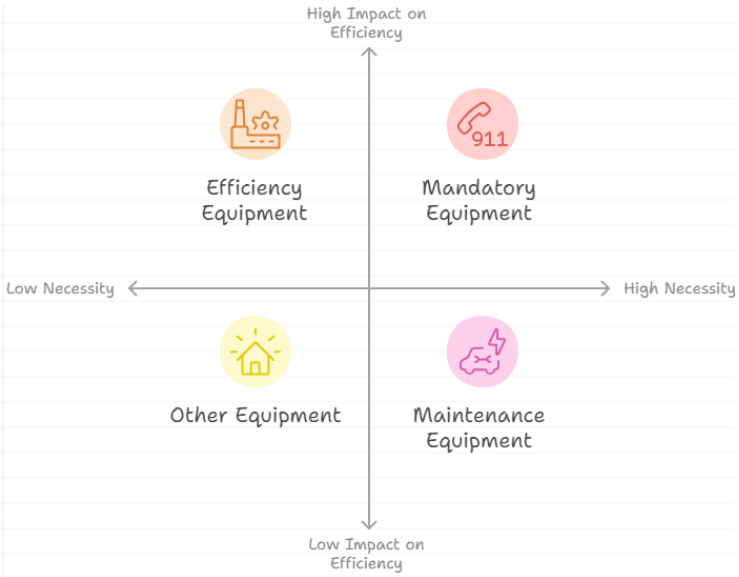


Рисунок 3.4 — Категоризация комплекса технологического оснащения

Эти категории являются основами для систематизации процесса модернизации и обеспечения бесперебойной работы ремонтного комплекса, что, в свою очередь, ведет к повышению безопасности и эффективности всего транспортного процесса.

Комплекс технологического оснащения участков НК для стержня узла люлечного подвешивания локомотивов серии ВЛ80 включает (рисунок 3.5).

1. Технологическое оборудование – для проведения НК стержня узла люлечного подвешивания необходим следующий комплект оборудования для визуально-оптического контроля (лупы и микроскопы с различными увеличениями, линейка и пр.), для УЗК (ультразвуковые дефектоскопы (портативные и стационарные), преобразователи (различных типоразмеров и

частот), иммерсионные и контактные жидкости для улучшения передачи ультразвуковых волн), для магнитопорошкового контроля (магнитные дефектоскопы (стационарные и портативные), магнитные порошки (сухие и суспензии), магниты и намагничивающие катушки).

2. Инструменты и вспомогательные средства – наряду с основным оборудованием используются дополнительные инструменты и материалы (комплекты шаблонов и калибров для измерения геометрии и размеров, специальные стойки и опоры для фиксации стержня в нужном положении, моечные установки и ультразвуковые ванны для очистки деталей перед НК).

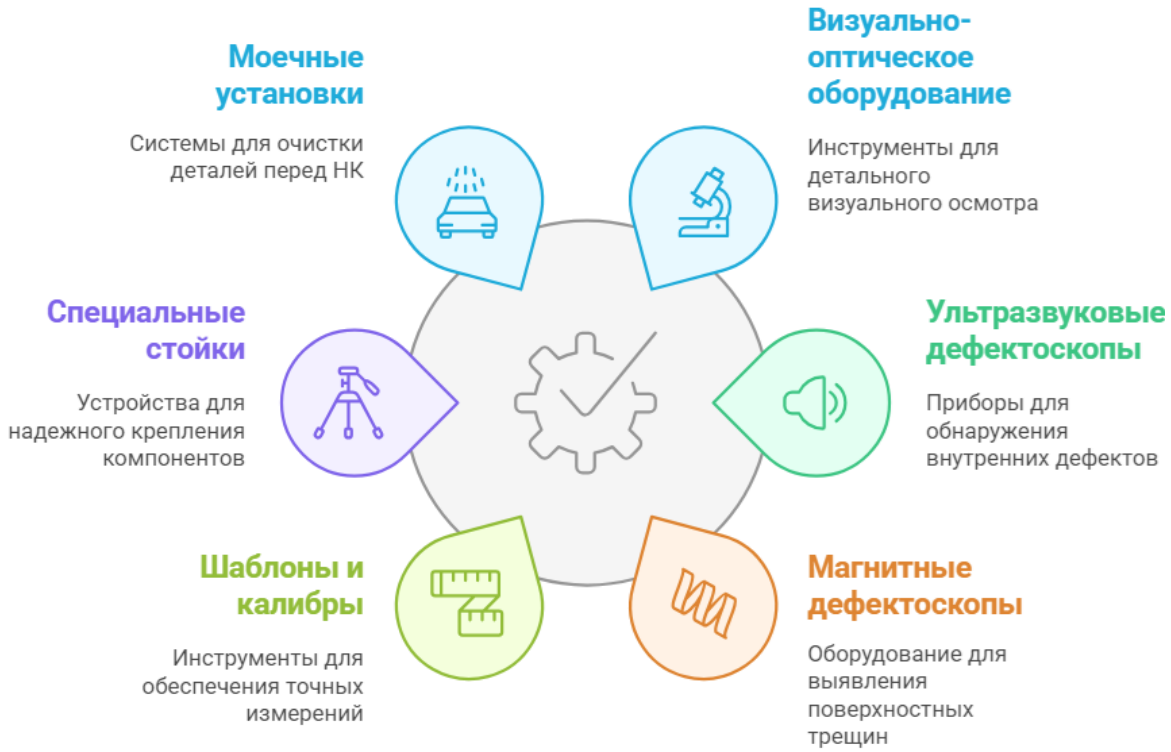


Рисунок 3.5 — Комплекс технологического оснащения участков неразрушающего контроля для стержня узла люлечного подвешивания локомотивов серии ВЛ80

Рационально организованное технологическое оснащение участков НК позволяет своевременно выявлять и устранять дефекты стержня узла люлечного подвешивания локомотивов серии ВЛ80, обеспечивая тем самым высокое качество и надежность ремонта. Правильное использование методик и профессионализм персонала являются ключевыми факторами успешного выполнения задач НК.

3.4 Проектно-конструкторская экспертиза предложенного технического решения по модернизации

В электровозе ВЛ80 конструкция люлечного подвешивания включает в себя стержень с привалочным фланцем в верхней части, который через шайбу опирается на пружину, как показано на рисунке 3.6.

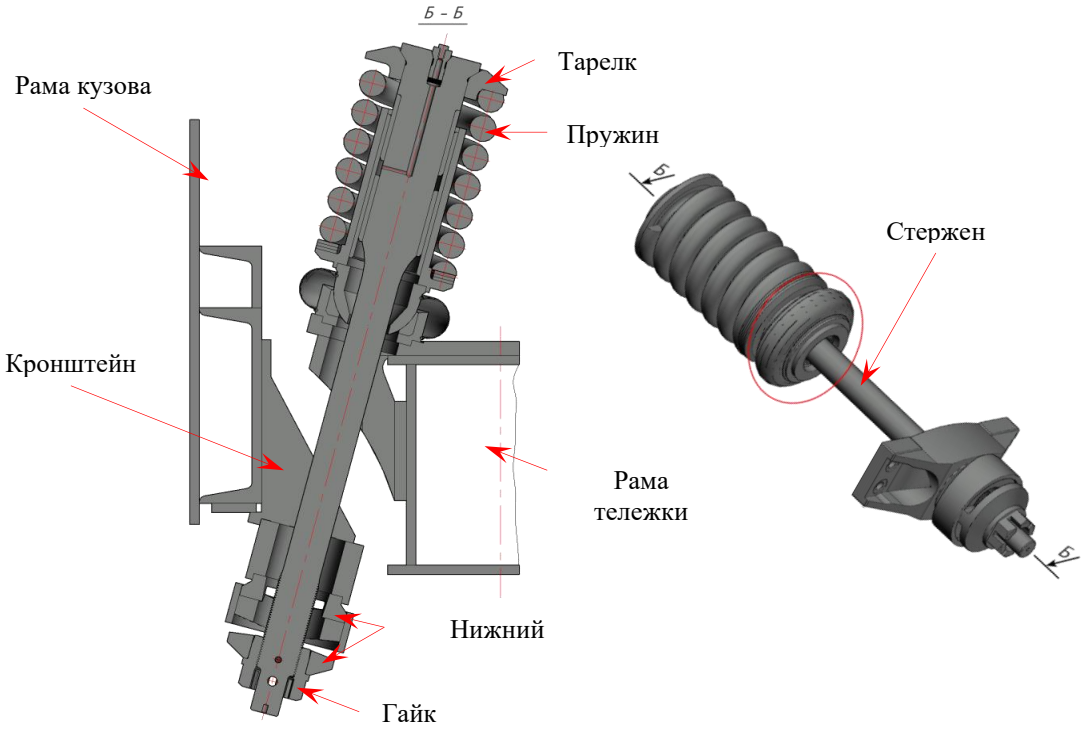


Рисунок 3.6 — Узел подвешивания электровоза

Утолщенная часть стержня фиксируется в стакане, а поверхности трения внутри стакана защищены износостойкими втулками, выполненными из высокомарганцовистой стали марки 110Г13Л по стандарту ГОСТ 977–88, что позволяет обеспечить функционирование узла без необходимости в смазке. В нижней части стержня располагается круглая резьба, на которую устанавливается гайка со шплинтом, что обеспечивает опору кузова через балансир, прикрепленный к кронштейнам кузова с помощью болтов. Для создания необходимой эластичности подвешивания кузова между опорными фланцами стержня и стакана устанавливается пружина. Стакан имеет специальную выточку для размещения опоры, которая вместе с прокладкой соприкасается с кронштейном рамы тележки.

Такая конструкция опор и прокладок образует своего рода шарнир, позволяя кузову перемещаться относительно рамы тележки в поперечном направлении и обеспечивая возможность поворота тележки под кузовом.

Когда кузов отклоняется от своего центрального положения, возвращающее усилие люлечного подвешивания меняется в соответствии с прямолинейным законом до момента, когда перемещение достигает 15 мм. После этого начинает работать пружина упора, обладающая жесткостью 183 кгс/мм, и возвращающее усилие начинает изменяться по новой прямой с другим углом наклона. При увеличении перемещения до 30 мм в систему включается жесткий упор, который также влияет на характеристику возвращающего усилия. При этом существующая конструкция люлечного подвешивания имеет недостатки:

– низкая надёжность, т. к. упругие стержни, установленные в узле люлечного подвешивания электровоза ВЛ80С, подвержены знакопеременному изгибу и кручению. В связи с этим они разрушаются в шейке в связи с естественным износом;

– низкую динамическую прочность за счет большого числа пружин и шарниров;

– низкую способность гашения высокочастотных составляющих динамических нагрузок, так как гашение происходит только за счёт упругих элементов типа пружин и резиновых прокладок.

Одним из таких усовершенствований, является Проект модернизации, который был разработан в 90-е годы Проектно-конструкторским бюро главного управления локомотивного хозяйства (ПКБТЛ), и применялся в рамках опытной эксплуатации для электровозов ВЛ10 в ТЧ-1 Ярославль и ВЛ80 ТЧ-11 Вологда. В данном проекте предусматривалась замена стальных втулок люлечного подвешивания на втулки, изготовленные из полиамида ПА6. За счет более низкого коэффициента трения по сравнению со сталью и смазывающих свойств полиамида ПА6, износ данных втулок происходит менее интенсивно по сравнению со стальными, что повышает их ресурс и по опыту СЛД позволяет отказаться от ревизии люлечного подвешивания при ТР2 и выполнять её при ТР3 на пробеге

400 тыс. км. К сожалению, из-за прекращения производства изделий из полиамида в СЛД, опыт применения втулок люлечного подвешивания из полиамида по проекту Э2341.00.00.ТО был прекращен.

Вновь к вопросу о применении втулок из полиамида для снижения отказов люлечного подвешивания вернулись в 2019 году в рамках разработки технологии комбинированного контроля, позволяющей отказаться от ревизии узла при ТР2 и проводить её при ТР3 на пробеге 400 тыс. км, осуществляя контроль остаточного ресурса эксплуатации без его разборки и с использованием ЦД узла.

Для реализации Проекта были подготовлены карта опыта № 01-2019-СП от 28 ноября 2019 г. и приказ от 27 ноября 2019 г. № ПС-07-16/98 о начале опытной эксплуатации электровозов с выполненными конструкционными изменениями люлечного подвешивания с отступлением от Проекта в части применения специального состава полиамида ПА6, структура которого сплошная однородная, что позволяет эффективно проводить УЗК стального стержня узла люлечного подвешивания локомотива (рисунок 3.7).

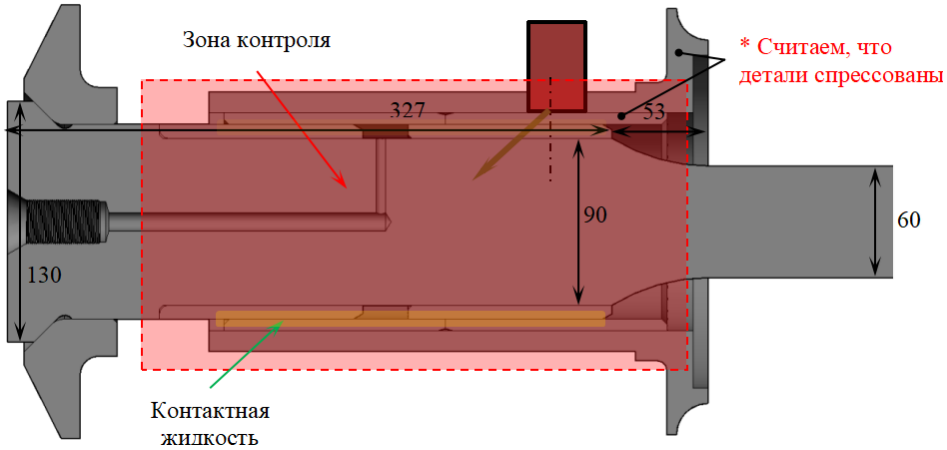


Рисунок 3.7 — Цифровой двойник узла люлечного подвешивания для проведения ультразвукового контроля

Ключевым требованием к концепции ЦД является необходимость его динамического характера и постоянного обновления, что обеспечивает актуальное представление о физическом продукте, устройстве или процессе. В отличие от этого, статическая модель реального пространства не может считаться ЦД. Связь

между реальным и виртуальным пространством прослеживается на всех этапах: начиная с производства и эксплуатации изделия, устройства или процесса и завершая его утилизацией. Данные, получаемые с датчиков, отчёты от пользователей и иная информация, поступающая на различных этапах производства и эксплуатации, должны безостановочно передаваться в **ЦД**. В ответ на это, прогнозы и оценки, а также управленческие параметры и другие переменные, которые могут быть использованы для разработки и функционирования физического устройства, обязаны непрерывно возвращаться из виртуального пространства в реальное (рисунок 3.8).

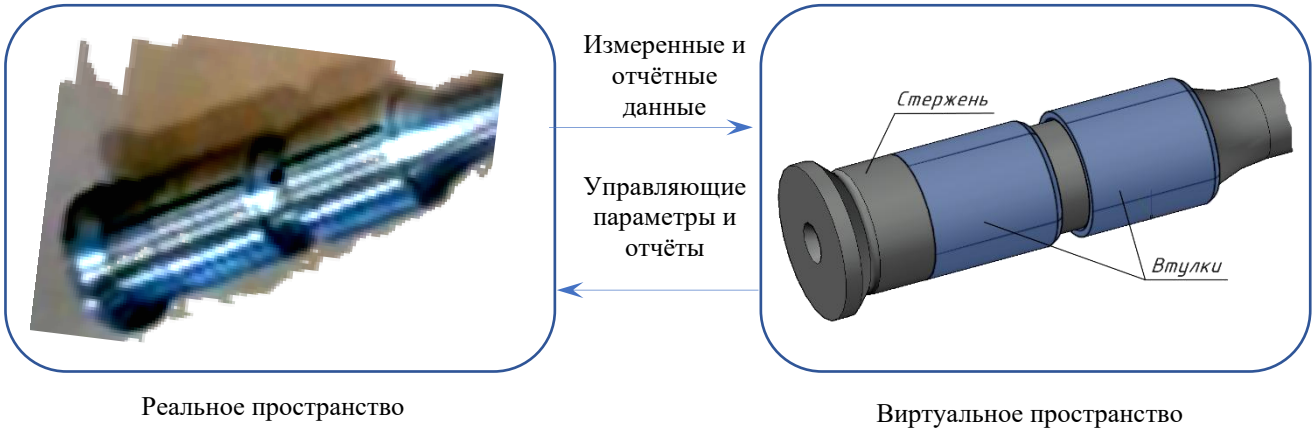


Рисунок 3.8 — Схема связи реального пространства и виртуального — в цифровом двойнике

В данном исследовании анализируется узел люлечного подвешивания локомотива в контексте применения ЦД на стадии ремонта. Система ЕИП АСУ, включая датчики, обеспечивает непрерывную передачу данных о состоянии узла в ЦД, который, в свою очередь, обрабатывает полученные данные и отправляет обратно управляющие параметры и отчеты, что позволяет оперативно реагировать на возникшие ситуации. Операторы локомотива также могут передавать актуальную информацию о работе системы, что способствует более эффективному мониторингу и управлению.

Концепция ЦД включает многоуровневые виртуальные подпространства и подсистемы, взаимодействующие между собой и активно запрашивающие

информацию. Система управления процессом моделирования должна координировать как сильные, так и слабые связи между различными мультифизическими и многомасштабными моделями. При этом для решения сложных задач может требоваться удаленная обработка данных вне реального времени. Строгое соблюдение взаимосвязи между реальным и виртуальным пространствами критически важно для обеспечения эффективной эксплуатации узла люлечного подвешивания и повышения надежности локомотива.

ЦД должны основывать свою работу на высокоточных расчетных моделях, данных с датчиков, исторических данных эксплуатации и отчетах пользователей. Эти элементы могут быть применены на различных этапах КЦЖ узла, включая проектирование, сертификацию, изготовление и эксплуатацию. Использование технологий ЦД позволяет не только точно смоделировать поведение узла в реальных условиях, но также получать актуальную информацию о окружающей обстановке, что способствует эффективному расчёту срока службы узла и выявлению потенциальных дефектов на ранних стадиях.

Важным аспектом дальнейшего развития данной технологии является численное моделирование, которое направлено на симуляцию распространения упругих волн в твёрдых телах и их взаимодействие с трещинами и неоднородностями исследуемых объектов.

Работа узла может быть описана через модели, учитывающие его геометрию и механические свойства материалов. 3D-сканеры создают детальные трехмерные модели узла, позволяя выявлять видимые дефекты, в то время как УЗК обеспечивает оценку внутреннего состояния материалов, что углубляет понимание состояния узла. Эти методы необходимо интегрировать с моделями, охватывающими динамические процессы, такие как вибрация и механические отклики в условиях эксплуатации. Надежный анализ требует применения методик, сочетающих данные 3D-сканирования и УЗК с математическими моделями, учитывающими физику процессов и взаимодействия компонентов узла.

Таким образом, в системе комбинированного контроля задействуются многочисленные подмодели, представляющие механические свойства, динамику и методы неразрушающей оценки, что позволяет не только идентифицировать текущие дефекты, но и прогнозировать возможные проблемы в будущем. Эта интеграция создает надежное виртуальное пространство, моделирующее все аспекты функционирования узла, что обеспечивает оперативное реагирование на выявленные несоответствия и улучшает процессы контроля и обслуживания.

В заключение рассматривается разработка концептуальной модели УЗК узла люлечного подвешивания, осуществляемого с помощью наклонного преобразователя и применения физического интерфейса *Elastic Waves* (с рус. упругие волны), *Time Explicit* (с рус. временной явный метод). Примеры применения технологии *DG-FEM* (с рус. метод конечных элементов с дискретизацией по Гальеркину) для решения данных задач иллюстрируются на базе модулей Акустика, Механика конструкций и *MEMS* (с рус. микроэлектромеханические системы) пакета *COMSOL Multiphysics*®. Эта реализация демонстрирует высокую эффективность по скорости расчётов, что проявляется при анализе крупных объектов с высоким числом степеней свободы. К числу ключевых преимуществ относятся лучшая масштабируемость в аспекте потребления оперативной памяти, возможность распараллеливания вычислительных процессов, поддержка неконформных сеток и имитация открытых границ, подтверждающие значимость и актуальность применения численного моделирования в области УЗК деталей и узлов ТПС.

3.5 Проектирование и интеграция высокоточных мультифизических моделей для осуществления контроля узла люлечного подвешивания локомотива с использованием COMSOL Multiphysics

Для решения задач комбинированного контроля стального стержня узла люлечного подвешивания локомотива без необходимости его разборки, проводимого через полиамидную втулку толщиной 6,5 мм с применением

индустриального масла в качестве контактной жидкости, программный комплекс *COMSOL Multiphysics* предоставляет широкий инструментарий для создания точных мультифизических и многомасштабных численных моделей. Эти модели станут основой для создания ЦД, что отвечает современным требованиям к точности и надежности детали и узла ТПС [375].

Использование *COMSOL Multiphysics* обеспечивает контроль и валидацию моделей на основе данных измерений, применяя различные методики параметрической оценки и подгонки, а также оптимизацию и контроль. В рамках данной платформы также реализованы методы понижения порядка моделей и разработки сосредоточенных представлений, которые необходимы для создания упрощённых версий сложных моделей и их последующей валидации (как было отмечено в 1 разделе).

В модели, разработанной в *COMSOL Multiphysics*, возможно интегрировать несколько компонентов для совместного моделирования различных подсистем. Например, системная модель может охватывать комплексный численный анализ УЗК, включая компоненты для вычисления распространения ультразвуковой волны в стержне узла люлечного подвешивания, расчёт переотражения ультразвуковых волн, прочностной анализ и прочее.

Для реализации интеграции между реальным и виртуальным пространствами в среде *COMSOL Multiphysics* можно использовать интерфейс *COMSOL API*, основанный на *Java*. Модель может быть сохранена в формате *Java*®, что позволяет ей взаимодействовать с внешними системами. Например, это взаимодействие возможно через динамически подключаемые библиотеки (*DLL*), что открывает возможности для создания веб-сервисов, функционирующих в рамках Java®-службы на платформе *Tomcat*. Такого рода решения могут реализовывать API-интерфейсы передачи состояния (*Representation State Transfer* (*REST*), что обеспечивает связь между реальными процессами и ЦД.

COMSOL Server™ предоставляет инструменты для управления моделями и приложениями для симуляции, позволяя отправлять запросы на получение

расчётных данных, инициируемые обновлениями входных файлов или действиями операторов. Важно отметить, что автономные приложения, скомпилированные с использованием *COMSOL Compiler™*, обеспечивают получение входных и выходных данных, но имеют ограничение на изменение входных параметров во время выполнения. Напротив, системы, использующие *COMSOL API* на базе *Java®*, позволяют обрабатывать входные данные в реальном времени: ввод осуществляется при запуске, а вывод может быть непрерывным в процессе вычислений. Подробнее о применении и нейронный сетей рассмотрим в 5 разделе работы.

В результате сочетание использования *COMSOL Server™* с автономными приложениями может обеспечить создание кастомизированных высокоточных расчётных моделей, которые можно запускать на мощных вычислительных станциях. Это позволит ЦД периодически обращаться к указанным приложениям для получения необходимых данных, что будет способствовать валидации упрощённых моделей, которые возможно интегрировать прямо в конечный продукт, устройство или производственный процесс.

3.6 Выводы по разделу 3

В третьем разделе проведена оценка применения современных решений при ремонте люлечного подвешивания ВЛ80, описан процесс ТПП при ремонте узла с применением современного технологий и средств, создание ЦД детали и процесса контроля, внедрение роботизированных комплексов НК и систем 3D-сканирования для визуально-оптического контроля

Представлен системный подход к исследованию и совершенствованию конструкции узла люлечного подвешивания локомотивов серии ВЛ80 с акцентом на 3D-промышленные решения и комплексный НК.

Анализ патентных разработок в области технологий подвешивания выявил как эффективные решения, так и возможности для внедрения инноваций,

направленных на повышение эксплуатационных характеристик. Отмечено, что увеличение активности в патентных исследованиях в период 2004–2006 годов обусловлено сочетанием факторов, таких как рост спроса на улучшение ПС и внедрение новых технологий, что создало предпосылки для совершенствования узлов подвешивания и увеличения числа патентных заявок. Некоторые ключевые патенты, такие как RU55713 U1 и RU2097234 C1, обладают конструктивными особенностями, способствующими повышению надежности, но также имеют недостатки, указывая на необходимость сбалансированного подхода в разработке новых решений с учетом эксплуатационных требований.

Анализ документации по НК, проведённый в соответствии со стандартом РК 103.11.363-2005-ЛУ, выявил недостатки рекомендованных методов, что открывает возможности для их модернизации и внедрения более современных технологий НК, учитывающих особенности конструкции узла.

Ключевым элементом дальнейшей работы является создание технологии ремонта узла люлечного подвешивания локомотивов в рамках ТПП, которая включает интеграцию ЦД в процесс ремонта, обеспечивающего постоянное обновление данных и взаимодействие реального и виртуального пространств, что позволяет оптимизировать контроль и обслуживание, а также эффективно управлять состоянием узла в эксплуатации.

Эта технология основана на модели прогноза, обеспечивающей безопасность и качество технического обслуживания и ремонта ТПС, использующая глубинные нейронные сети для выделения критических дефектов в их деталях и узлах.

Таким образом, проведённый анализ подчёркивает необходимость интеграции современных технологий и подходов при ТПП ремонта локомотивов для повышения надежности, безопасности и эффективности ТПС, что представляется актуальным в современных условиях.

4 ЕДИНОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ ПРОСТРАНСТВО ПРОЦЕССОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Глубокое обучение стало важным инструментом в современных научных и технологических сферах, применяясь в управлении роботами, автоматизации производственно-технологических процессов, а также проведении комбинированного контроля объектов ремонта при ТПП. Эта передовая технология активно используется для решения сложных задач, включая идентификацию дефектов.

В разделе предложен интеллектуальный подход к обработке диагностической информации при ремонте локомотивов, который использует нейронные сети для оценки дефектов деталей и узлов локомотивов по их индикатрисам рассеяния, разделяя на плоскостные и объёмные, с последующим прогнозированием их технического состояния. Разработанная система визуализирует текущее состояние объектов в Едином информационном пространстве управления, что повышает эффективность процессов и уменьшает потребность в ручной обработке данных.

Кроме того, была разработана методология для оценки состояния деталей и узлов локомотивов при ремонте, в основе которой применение искусственных нейронных сетей для идентификации дефектов. Этот подход позволяет эффективно классифицировать различные типы дефектов.

4.1 Обоснование подходов к интеграции разнородной информации с целью достижения наивысшей степени достоверности результатов

Keras является высокоуровневым *API* для нейронных сетей, реализованным на *Python*, который может работать поверх таких платформ, как *TensorFlow*, *CNTK* или *Theano*. Данная библиотека была разработана с акцентом на быструю реализацию экспериментов, что обеспечивает возможность перехода от концепции к результату с минимальными задержками, что является важным аспектом для

успешного выполнения исследований. Взаимосвязь между глубоким обучением, машинным обучением, нейронными сетями и искусственным интеллектом проиллюстрирована на рисунке 4.1.

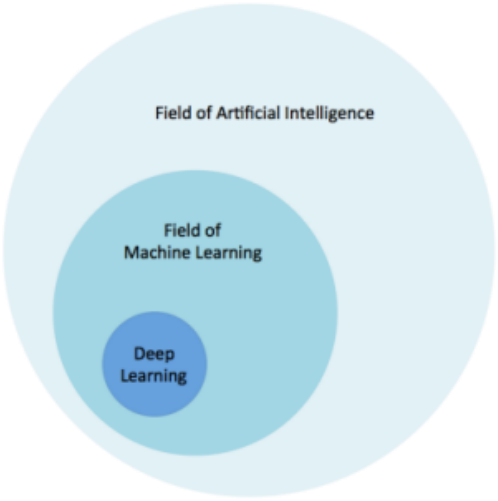


Рисунок 4.1 — Схема связи взаимодействия глубинного обучения с машинным обучением, нейросетями и искусственным интеллектом

В контексте ультразвукового НК с идентификацией дефектов по их индикатрисам рассеяния, внешний круг можно охарактеризовать как искусственный интеллект в целом, включая различные вычислительные системы. Далее, на следующем уровне, располагается машинное обучение, а в самом центре находятся глубинное обучение и искусственные нейросети, которые играют ключевую роль в аналитических процессах.

Методология конструирования математического ядра строится на теории нечётких нейронных сетей. Математическое описание и теоретическая база нейросетей сводятся к формированию отображения H от Y, при котором для каждого возможного входного вектора, представляющего собой набор измерений H, генерируется корректный свободный-выходной вектор остаточного ресурса Y.

Следует отметить, что для определения остаточного ресурса целесообразно применить метод искусственного интеллекта, который основан на глубинных нейронных сетях. Нейронная сеть, предназначенная для оценки технических

ресурсов деталей и узлов, понимается как система, состоящая из простых единиц данных (нейронов), соединённых между собой.

Векторы входных параметров, созданные на основе актуальных измерений и показателей, используются для обучения и процесса распознавания. При окончании любого этапа обучения производится оценка качества полученных результатов, проверяя их на свободных векторах, которые не использовались в процессе обучения (рисунок 4.2).

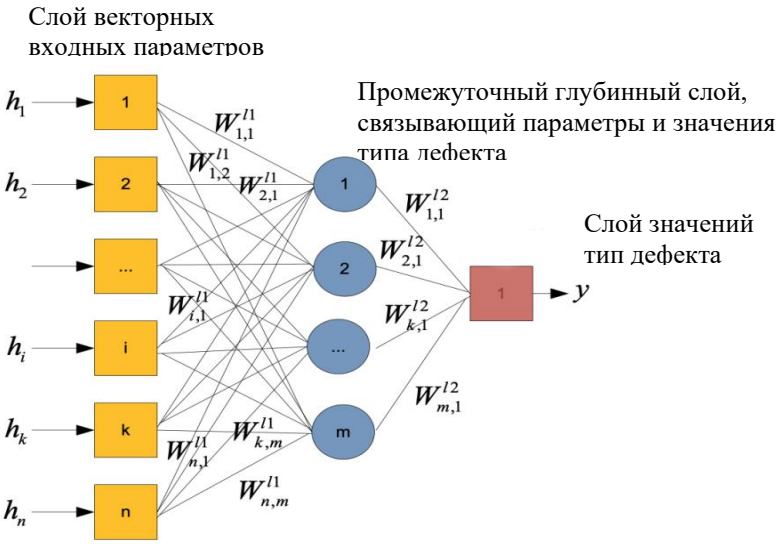


Рисунок 4.2 — Схема связи взаимодействия глубинного обучения с машинным обучением, нейросетями и искусственным интеллектом

С этой целью вычисляют вероятности (доли) как правильной, так и ложной классификации входящих измерительных наборов. Кроме того, создаётся таблица максимальных вероятностей для случаев неправильной классификации в зависимости от этапа обучения. В завершение работы выполняется оценка надежности алгоритмов, основываясь на процентном соотношении объектов, которые были классифицированы неверно (формула 2.45).

$$P = \frac{100n}{N}\%, \tag{2.45}$$

где n – число неправильно идентифицированных объектов; N – общее число объектов.

Для решения задачи классификации типов дефектов на основе измерительных данных и метрик была разработана многослойная глубинная нейронная сеть, позволяющая реализовать прямое распространение информации. Архитектура состоит из нескольких слоев, каждый из которых выполняет свои уникальные функции в процессе обработки и анализа данных. Первый слой отвечает за обработку входных параметров, включая значения h_1, h_2, ..., h_n. Эти параметры содержат информацию, связанную с техническим диагностированием дефектов и инцидентами, которые возникли в ходе эксплуатации конструкции. Это базовый слой, который собирает всю информацию, необходимую для дальнейшего анализа. Второй слой нейронной сети выполняет роль промежуточного элемента, который помогает лучше определить связь между входными данными и типами дефектов в деталях и узлах локомотивов. В этот слой добавляются данные о текущем состоянии этих элементов, включая информацию о внешних условиях, эксплуатационных значениях и показаниях систем мониторинга. Это помогает более точно анализировать и понимать ситуацию, что делает процесс выявления и классификации дефектов более надежным. Это позволяет создать более полное представление о текущем состоянии деталей и узлов и повысить качество оценки типа дефектов с последующим прогнозированием. Третий слой нейронной сети отвечает за вывод информации – он формирует значение y, представляющее тип дефекта деталей и узлов. Это значение определяется на основе уровня амплитуды эхо-сигнала: для плоскостных дефектов этот уровень составляет 0,2, в то время как для объемных дефектов он равен 0,5 и выше. Кроме того, вывод зависит от соотношения между параметрами акустического тракта, такими как длина волны, длительность импульса, ширина пучка и угол озвучивания, с одной стороны, и такими характеристиками, как размеры, конфигурация и степень шероховатости поверхности дефекта – с другой. Важным аспектом является анализ формы ИР. Также в качестве дополнительных параметров проводятся корреляционный анализ и оценка достоверности вычисления коэффициентов корреляции и конкордации при заданных уровнях значимости, где $y \in Y$. Это значение является конечным

результатом работы нейронной сети и играет ключевую роль в оценке остаточного ресурса конструкции.

Определение признакового пространства для этой задачи осуществляется с помощью промежуточного субдискретизирующего слоя нейронной сети *L*. Для веса коэффициентов в этой сети предполагается использование чётных чисел, таким образом, $W = 2, 4, ..., 2a$. В этом контексте ключевыми параметрами, которые принимаются во внимание при оценке остаточного ресурса, являются фильтры и дополнительные пороговые значения, обозначенные как $w_{m,l}$ и $b_{n,l}$ соответственно.

В процессе создания глубинного слоя нейронной сети карта признаков *n*-го слоя разделяется на отдельные непересекающиеся блоки размером 2x2 пикселя. В каждом блоке суммируются четыре значения входного вектора, и на выходе получается матрица $z_n^{l-1} = \{z_n^{l-1}(i,j)\}$, элементы которой представляют собой соответствующие суммы. Итоговая формула (2.46) для вычисления элементов этой матрицы выглядит как:

$$z_n^{l-1} = y_n^{l-1}(2i-1,2j-1) + y_n^{l-1}(2i,2j-1) + y_n^{l-1}(2i,2j), \quad (2.46)$$

Карта признаков *n*-го субдискретизирующего слоя *l* вычисляется по формуле (2.47):

$$y_n^l = f_l\left(z_n^{l-1} * w_m^l, n + b_n^l\right), \quad (2.47)$$

Таким образом, размер карты признаков H_l x W_l может быть вычислен исходя из предыдущих значений (2.48, 2.49):

$$H_l = \frac{H_l - 1}{2}; \quad (2.48)$$

$$W_l = \frac{W_l - 1}{2}, \quad (2.49)$$

Для оценки качества обучения классификатора применяются две ключевые метрики: средняя сумма квадратов ошибки на обучающей выборке, обозначаемая как m_{ei}, и средняя сумма квадратов весов, обозначенная как m_{wi}. Эти метрики могут быть вычислены по формулам (2.50), (2.51):

$$m_{ei} = \frac{1}{N_i}\sum_{i=1}^{N} e_i^2 = \frac{1}{N_i}\sum_{i=1}^{N} (t_i - a_i)^2, \quad 2.50$$

$$m_{wi} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} w_i, \quad 2.51$$

где N – число нейронов в выходном слое; t_i – целевые значения выходного сигнала; a_i – значения выходного сигнала; а w_i – весовые коэффициенты.

Общее число нейронов в нейронной сети, рассматриваемой в контексте системы классификации, составит:

$$\sum_1 = 1{,}5\left(N_{вх} + N_{вых1}\right) = 95 \text{ нейронов.}$$

По окончании работы нейронной сети генерируется выходной сигнал, который кодирует значение остаточного ресурса, к примеру, «0.73». Нейронная сеть работает в итерационном режиме, что дает ей возможность выявлять ключевые факторы, влияющие на несущую способность конструкций. Такой подход обеспечивает более точное прогнозирование и улучшение процессов диагностики, что имеет большое значение в области инженерного анализа и управления ресурсами конструкций.

В восьмидесятых годах большинство нейросетей были однослойными в силу высокой стоимости и ограниченности возможностей данных. При УЗК с применением нейросети используется множество слоев для решения сложных проблем (например, идентификации дефектов по их индикатрисам рассеяния) с помощью данных хранилища.

Интеллектуальный многокритериальный мониторинг можно охарактеризовать как итеративный процесс, в ходе которого осуществляется анализ внутренней структуры данных, получаемых в режиме реального времени в процессе оперативного мониторинга. Этот процесс включает в себя оценку отклонений текущей структуры данных от определенного эталона. Под внутренней структурой данных подразумевается совокупность статистических взаимосвязей, выявленных на основе исходного набора параметров, в то время как эталонная структура представляет собой статистический шаблон, отражающий наиболее типичное функционирование объекта мониторинга (рисунок4.3).

Рисунок 4.3 — Схема связи взаимодействия глубинного обучения с машинным обучением, нейросетями и искусственным интеллектом

Изучим подходы к сбору данных, применяемые в интеллектуальном многокритериальном мониторинге для оценки остаточного ресурса компонентов и узлов локомотивов. Автоматизация интеллектуального анализа и прогнозирования

состояния конструкций вызывает важные вопросы, связанные с различиями в обработке данных и принятии решений между автоматизированными системами и операторами. Методы теории распознавания образов играют ключевую роль в задачи искусственного интеллекта для оценки состояния деталей и узлов локомотивов (рисунок 4.4).

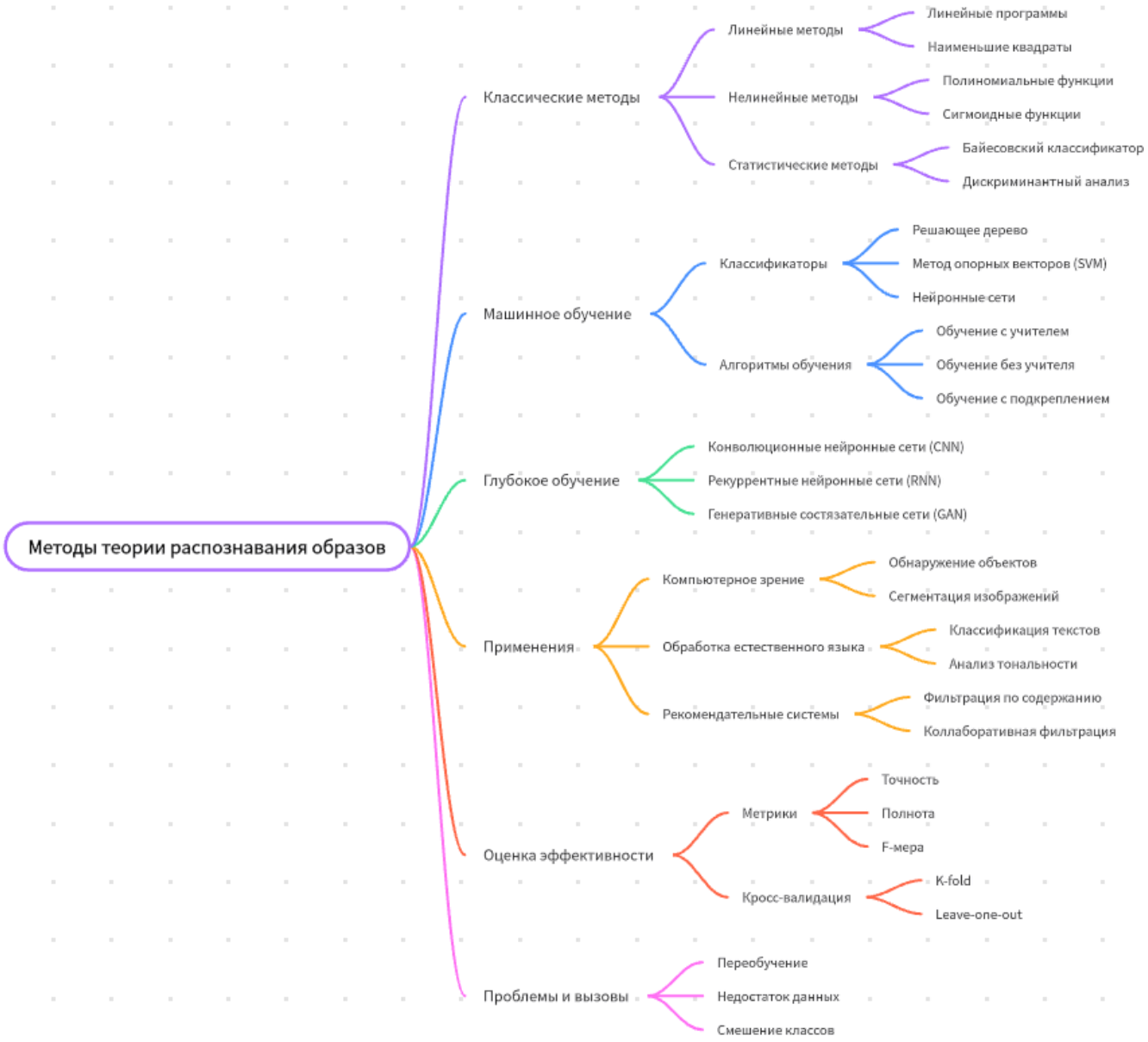


Рисунок 4.4 — Методы идентификации образов

Диагностические признаки, включая параметры и характеристики объекта, создаются для точного распознавания, обнаружения и идентификации дефектов. Они позволяют определить наличие, природу и степень дефектов, что улучшает диагностику и управление процессами контроля (рисунок 4.4).

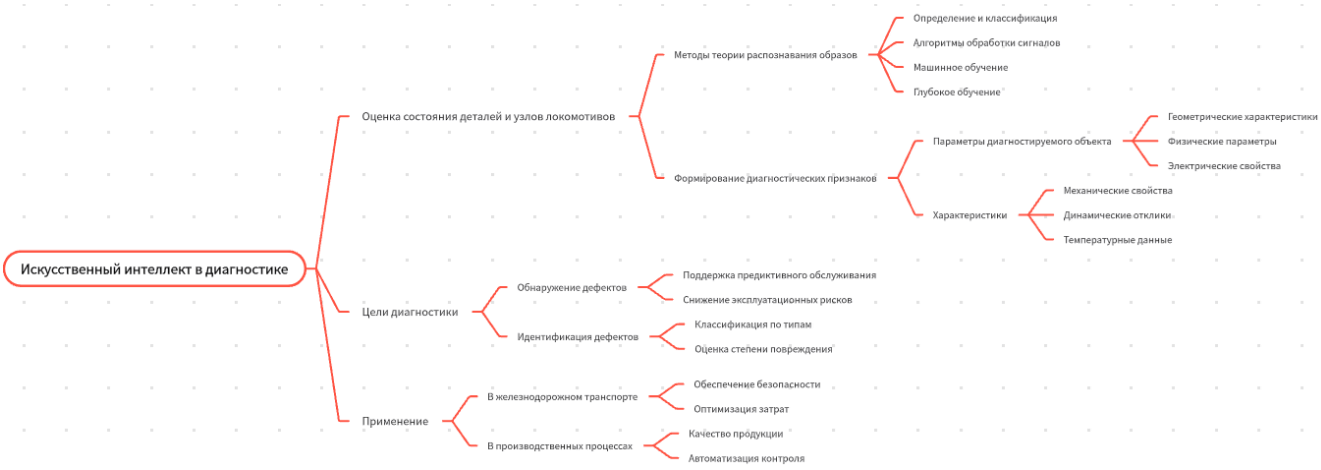


Рисунок 4.5 — Формирование диагностических признаков

При использовании метода ультразвуковой дефектоскопии с индикатрисами рассеяния дефектов в качестве диагностических параметров принимаются уровень амплитуды эхо-сигнала, который составляет 0,2 для плоскостных дефектов и 0,5 или выше для объемных. Важным аспектом является соотношение между параметрами акустического тракта, такими как длина волны, длительность импульса, ширина пучка и угол озвучивания, и характеристиками самого дефекта, включая его размеры, конфигурацию и степень шероховатости. Форма ИР, наряду с корреляционным анализом и оценкой достоверности вычисленных коэффициентов корреляции и конкордации при заданных уровнях значимости, также служит дополнительными параметрами для более точного диагностирования (рисунок 4.6).

Рисунок 4.6 — Схема настроечных параметров ультразвукового контроля

Для математической формализации задач диагностики используют методологию мягких вычислений [142], которая охватывает нейровычисления. Для решения задачи, связанной с анализом индикатрис рассеяния дефектов, наиболее подходящим методом из перечисленных может быть комбинация нечеткой логики (*Fuzzy Logic*) и нечетких систем управления (*Fuzzy Control Systems*).

Эти методы предоставляют эффективные средства для обработки и анализа данных, которые могут быть неопределёнными или неточными.

Поскольку информация о дефектах может быть выражена через различные уровни принадлежности. Например, нечёткие правила могут использоваться для оценки уровня дефекта, основываясь на амплитуде эхо-сигнала и анализе связей между характеристиками акустического тракта и дефектами, включая их размеры и степень шероховатости поверхности. Кроме того, нечёткие системы управления

могут помочь в создании адаптивных диагностических систем, которые учитывают разнообразные входные данные, такие как уровень сигнала и параметры акустического тракта, что позволяет эффективно идентифицировать дефекты по типу.

4.2 Классификация изображений с применением сверточных нейронных сетей на платформе Keras

Сверточные нейронные сети позволяют эффективно извлекать признаки из изображений благодаря своей архитектуре, включающей сверхточные слои и подвыборку.

Чтобы выполнить классификацию изображений с использованием *Keras*, следуйте следующим этапам: первый шаг – это установка необходимых библиотек. Убедитесь, что у вас установлены *Keras*, *TensorFlow* и другие требуемые библиотеки, такие как *NumPy* и *Matplotlib*. Вы можете установить их через *pip*, используя команду:

pip install tensorflow numpy matplotlib

Следующим этапом будет подготовка данных. Вы можете использовать наборы данных, такие как *CIFAR-10, MNIST* или любой другой набор, который вас заинтересует. *Keras* также предоставляет удобные инструменты для загрузки и предварительной обработки данных.

После того, как подготовлены данные, создается архитектура своей сверточной нейронной сети.

Пример простой модели выглядит следующим образом:

```
import tensorflow as tf
from tensorflow.keras import layers, models
# Создание модели
model = models.Sequential([
layers.Conv2D(32, (3, 3), activation='relu', input_shape=(32, 32, 3)),
```

```
# Первый сверточный слой
    layers.MaxPooling2D((2, 2)),  # Подвыборка
    layers.Conv2D(64, (3, 3), activation='relu'),  # Второй сверточный слой
    layers.MaxPooling2D((2, 2)),  # Подвыборка
    layers.Conv2D(64, (3, 3), activation='relu'),  # Третий сверточный слой
    layers.Flatten(),  # Преобразование в одномерный вектор
    layers.Dense(64, activation='relu'),  # Полносвязный слой
    layers.Dense(10, activation='softmax')  # Выходной слой для 10 классов
])
```

После создания модели вам нужно скомпилировать ее, выбрав оптимизатор, функцию потерь и метрики. Например, можно использовать *Adam* как оптимизатор и кросс-энтропию как функцию потерь:

```
model.compile(optimizer='adam',
              loss='sparse_categorical_crossentropy',
              metrics=['accuracy'])
```

Теперь вы можете обучить модель на подготовленных данных. Для этого определите количество эпох и размер батча:

```
# Допустим, у нас есть тренировочные и тестовые данные
# *train_images, train_labels - это тренировочные данные,
# *test_images, test_labels - это тестовые данные.
model.fit(train_images, train_labels, epochs=10, batch_size=64, validation_data=(test_images, test_labels))
```

После завершения процесса обучения вы можете оценить качество модели на тестовых данных:

```
test_loss, test_acc = model.evaluate(test_images, test_labels)
print('Тточность:', test_acc)
```

Для новых изображений необходимо предварительно обработать их в том же формате, в котором вы обучали модель. Получаем примерно 98 % точности на тестовом наборе что довольно неплохо для данной задачи (рисунок 4.7).

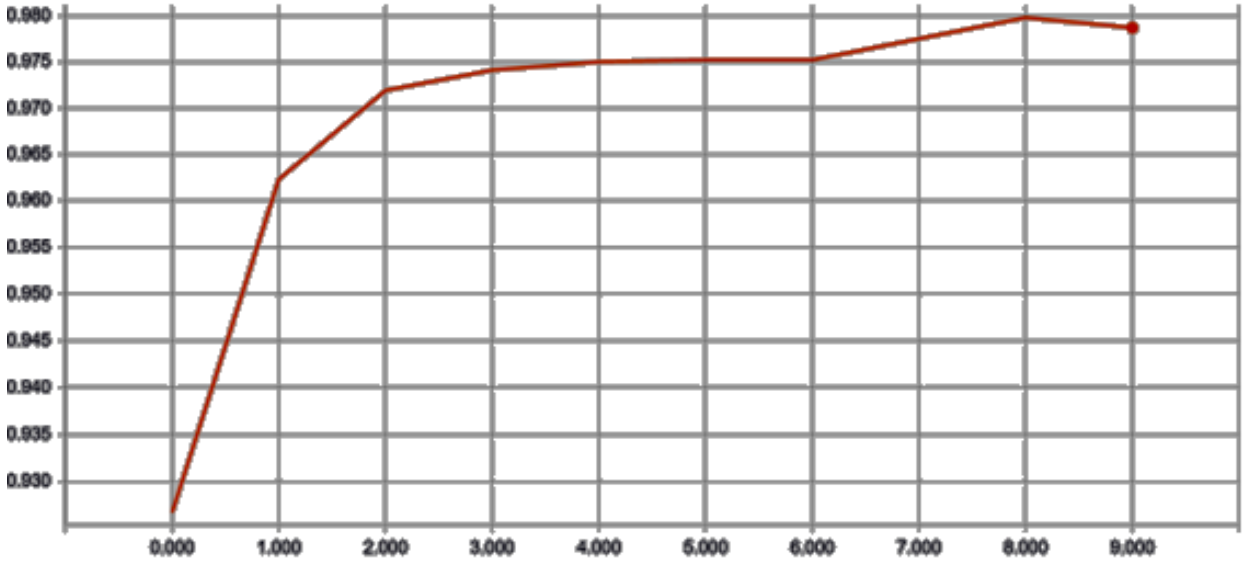


Рисунок 4.7 — Метод нечётких систем управления (Fuzzy Control Systems)

Мощный инструмент для задач компьютерного зрения, способный достичь высокой точности в распознавании объектов. Не забывайте, что для улучшения результатов можно применять различные техники, такие как аугментация данных, изменение архитектуры модели и настройка гиперпараметров.

4.3 Информационно-динамическое моделирование и управление процессом технологической подготовки производства по освоению ремонта и/или изготовления новых видов продукции

Информационно-динамическое моделирование и управление процессом ТПП являются важными аспектами для успешного освоения ремонта и/или изготовления новых видов продукции. Данные процессы обеспечивают оптимизацию ресурсов, снижение затрат и повышение качества продукции.

Рассмотрим основные этапы и методы, используемые в информационно-динамическом моделировании и управлении ТПП (рисунки 4.8, 4.9):

– проектирование и моделирование (создание 3D-моделей объектов ремонта/ контроля);

– разработка технологических процессов;

– закупка оборудования, монтаж и ввод в эксплуатацию;

– ремонтное производство и проверка качества;

– анализ результатов ремонтного производства (сбор данных и их анализ для выявления проблем и узких мест);

– внесение корректировок (оптимизация и коррекция технологических процессов на основе анализа).

Рисунок 4.8 — Ключевые стадии и подходы, применяемые в информационно-динамическом моделировании и управлении техническими производственными процессами

На стадии анализа и планирования внимание акцептируется на выявлении требований к новым продуктам и процессам, что позволяет существенно улучшить понимание технических характеристик и функциональных параметров.

Использование компьютерного проектирования (*CAD*) для создания трёхмерных моделей и методов конечных элементов (*FEA*) в процессе проектирования обеспечивает более детальную визуализацию.

Рассмотрим основные методы и средства информационно-динамического моделирования (рисунок 4.10).

1. Системы *CAD/CAM/CAE*.

– *CAD* – автоматизация проектирования и создания чертежей.

– *CAM* – управление и контроль производственно-технологических процессов через ПО.

– *CAE* – анализ и оптимизация инженерных моделей.

2. Системы *PLM* – управление ЖЦ продукта от концепции до утилизации, включая разработку, производство и обслуживание.

3. Системы *ERP* – интеграция управления производственными, финансовыми и материально-техническими ресурсами предприятия.

4. Системы *MES* – оперативное управление и контроль производственно-технологических процессов на уровне цехов и участков.

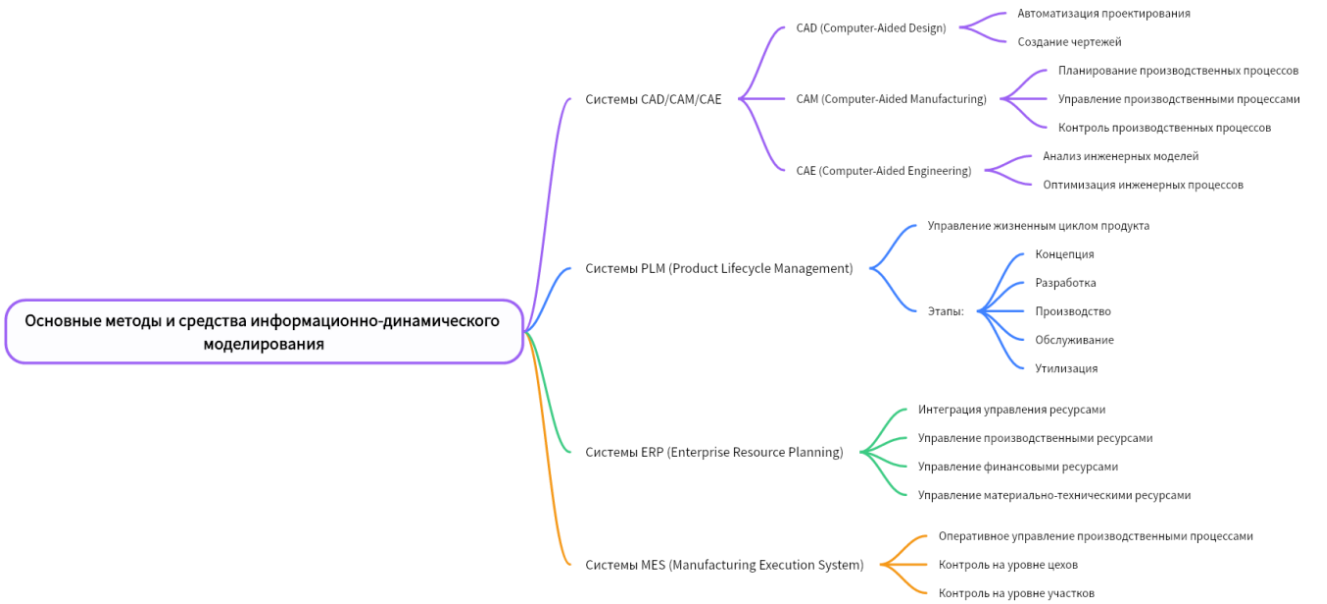


Рисунок 4.9 — Ключевые подходы и инструменты информационно-динамического моделирования

Информационно-динамическое моделирование и управление процессами ТПП позволяют значительно повысить эффективность и качество производственной деятельности предприятия. Современные технологии и программные инструменты предоставляют широкие возможности для автоматизации, анализа и оптимизации производственно-технологических процессов, что является ключевым фактором в условиях жёсткой конкуренции и быстро изменяющихся требований рынка.

4.4 Выводы по разделу 4

В четвёртом разделе работы была подробно рассмотрена роль глубокого обучения как важного инструмента в современных научных и технологических областях, с акцентом на его применение в управлении роботами, автоматизации производственно-технологических процессов, а также в проведении комбинированного контроля объектов ремонта при ТПП. В частности, предложен интеллектуальный подход к обработке диагностической информации при ремонте локомотивов, в основе которого лежит использование нейронных сетей для оценки дефектов деталей и узлов, что значительно улучшает прогнозирование технического состояния. Разработанная система визуализирует текущее состояние объектов в Едином информационном пространстве управления, что не только повышает эффективность процессов, но и снижает потребность в ручной обработке данных.

Методология, предложенная в данном разделе, акцентирует внимание на автоматизации процесса диагностики, используя ИР дефектов для их идентификации.

Важным аспектом является применение библиотеки *Keras* для быстрого создания и тестирования нейронных сетей, что также свидетельствует о стремлении к повышению научной достоверности.

Также в разделе демонстрируется интеграция методов машинного обучения и нечёткой логики для более точного анализа данных обратной связи, что позволяет учитывать неопределённости и многозначность данных, возникающих в процессе диагностики. Это сочетание поднимает уровень надёжности вовлечённых систем и способствует более глубокому пониманию процессов, происходящих в сложных системах.

Информационно-динамическое моделирование и управление в области ТПП сыграли ключевую роль в оптимизации разработки и внедрения новых видов продукции. Раздел подводит итог тому, что использование современных методов глубокого обучения и концепций искусственного интеллекта в инженерии не только насыщает инструментарий диагностики, но и вносит вклад в создание более адаптивных и эффективных производственных систем. Синергия этих технологий открывает новые горизонты для исследований и практического применения в сфере технической диагностики и автоматизации процессов, что крайне важно в условиях растущей конкурентоспособности и требовательности рынка.

5 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ПО ОСВОЕНИЮ РЕМОНТА И/ИЛИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НОВЫХ ВИДОВ ПРОДУКЦИИ

Разработка системы ТПП для освоения ремонта и/или изготовления новых видов продукции представляет собой многоэтапный и комплексный процесс, на который предшествует значительный объем подготовительных мероприятий. Запуск любого производственного цикла напрямую связан с необходимостью тщательно спланированной и организованной подготовки, что включает в себя как планирование, так и управление процессом ТПП. Основной задачей данной подготовки является обеспечение эффективного функционирования производства в установленные временные рамки и соответствии с высокими стандартами качества.

ТПП в контексте освоения новых видов продукции включает в себя создание и внедрение всех необходимых ТП, норм и стандартов. Это, в свою очередь, является основой для организации производственного процесса, направленного на успешный ремонт и изготовление продукции, соответствующей требованиям современного рынка. Надлежащим образом организованная система ТПП способствует минимизации рисков, связанных с особенностями качества и сроками выполнения работ, а также обеспечивает оптимальное использование ресурсов. Следовательно, целенаправленное и научно обоснованное осуществление ТПП служит важным условием для достижения конкурентоспособности на рынке и удовлетворения потребностей потребителей в качественной и инновационной продукции.

5.1 Технологическая подготовка производства при освоении ремонта тягового подвижного состава. Алгоритмическая модель построения сетевого плана работ в рамках технологической подготовки производства

ТПП ремонта локомотивов включает шесть ключевых этапов. Первый этап заключается в формировании программы подготовки производства, связанной с

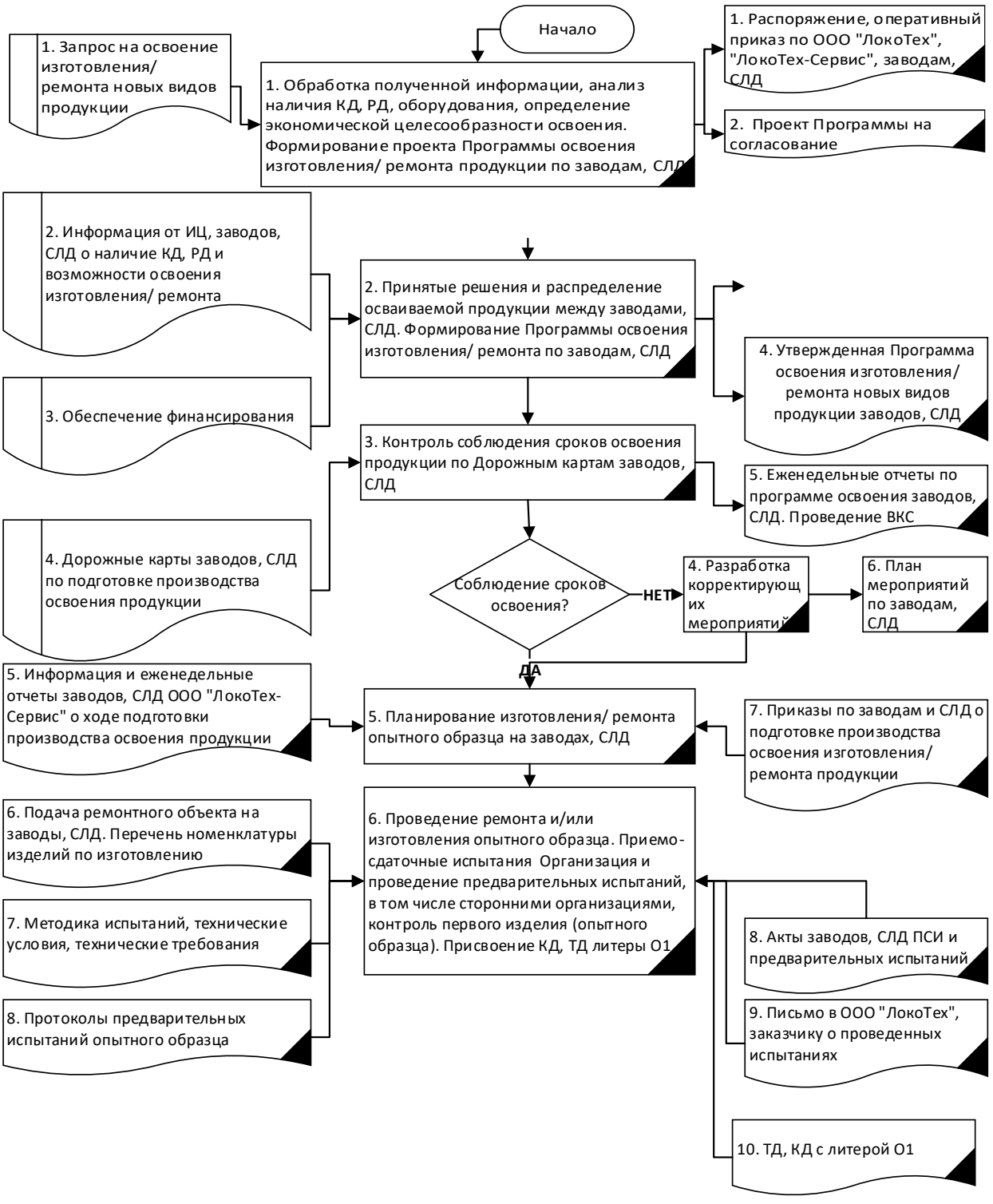
освоением ремонта локомотивов и их комплектующих. Второй этап представляет собой подготовительные работы, необходимые для начала ремонта продукции. Третий этап посвящен подготовке самого производства. На четвертом этапе определяются материальные и трудовые затраты, а также их обоснование. Пятый этап включает в себя проведение ремонта опытного образца с использованием передовых технологий и производственных средств. Завершается процесс ремонт подтверждением готовности к серийному выпуску путем проведения квалификационных испытаний.

Требования к технологическому процессу являются высокими и основаны на системах ЕСКД и ЕСТПП. Процесс ТПП регламентируется государственными стандартами, которые основываются на лучших практиках научно-технического прогресса в области ремонта локомотивов. Использование единой системы управления технологическим документооборотом значительно облегчает решение множества задач, которые являются важными для каждого отдельного ремонтного предприятия. В условиях производственно-технологической необходимости многие ремонтные предприятия создают собственные стандарты, учитывая требования, установленные ЕСТД. С целью повышения эффективности работы системы управления качеством в Дирекции тяги были внедрены несколько инициатив. Во-первых, разработан Регламент (утверждён Распоряжением ОАО «РЖД» от 12.10.2018 №2237/р (в редакции Распоряжения ОАО «РЖД» от 21.04.2022 №1096/р) по постановке локомотивов и их составных частей на ремонтное производство, а также проведению приемочных комиссий, который устанавливает порядок проведения оценки качества после ремонта и регламентирует процедуры обработки технологической документации. В дополнение к этому в компании ООО «ЛокоТех» был введен специальный Регламент № 240ЛТ-П от 05.05.2021 по ТПП для освоения новых видов продукции. Этот документ охватывает весь процесс, начиная с выпуска первого образца (РО) и заканчивая переходом к серийному производству (РА), а также определяет правила планирования, организации и управления ТПП новой продукции, включая

освоение ремонта на заводах АО «Желдорреммаш» и в СЛД. Он также гарантирует соответствие отремонтированной продукции установленным требованиям нормативно-технической документации. Во-вторых, были введены обязательные технические требования [29], которые должны соблюдать специалисты сервисных компаний, занимающихся разработкой технологических процессов для технического обслуживания и ремонта парка локомотивов ОАО «РЖД», находящихся на сервисном обслуживании. Этот документ обеспечивает единый подход к процедурам разработки и формирования рабочих документаций, необходимых для выполнения технического обслуживания и ремонта, а также их компонент. Он также предполагает возможность последующих корректировок на основе накопленного опыта эксплуатации и ремонта [30].

Основной целью ТПП при ТОиР ТПС является реализация всего комплекса мер, направленных на обеспечение серийного выпуска продукции, или, в данном случае, серийного ремонта ТПС, при безусловном выполнении требований заказчика, включая качество, безопасность, а также экономические факторы (стоимость) и разработку оптимального ТП для его ремонта, который бы обеспечивал высокое качество при невысоких затратах. На этапе подготовки особое значение приобретает четкая организация и выполнение ТПП, которое может занимать от 20 до 70% общего объёма подготовительных работ как по трудозатратам, так и по стоимости. Такие расходы неуклонно растут с усложнением конструкций локомотивов и необходимостью ускорения процессов освоения их ремонта. Объём работ по ТПП в крупносерийном и массовом производстве достигает 60% от общего объёма работ. Перевозочный процесс на сети железной дороге непрерывен, что заставляет сервисные компании осуществлять ТПП при выполнении ТОиР ТПС в кратчайшие сроки с небольшими потерями для основного ТП [376, 377]. При выполнении ремонта и восстановления деталей, узлов необходимо оперативное обращение к КД [376]. В процессе подготовки к ремонтному производству на этапе подготовительных работ возникает важная необходимость в наличии РД. Для лучшего понимания данного

вопроса на рисунке 5.1 представлена модель бизнес-процесса, иллюстрирующая алгоритм формирования сетевого плана работ по ТПП.



ИЦ – Инжиниринговый центр - филиал АО «Желдорреммаш»; ВКС – видеоконференцсвязь

Рисунок 5.1 – Алгоритмическая модель построения сетевого плана работ в рамках технологической подготовки производства

Применение алгоритмической модели построения сетевого плана работ позволяет показать все процессы на производстве не только со стороны управления и поставки его товарно-материальными ценностями (ТМЦ), ТД, квалифицированными сотрудниками, но и, самое главное, со стороны верификации технологии выполнения операций. Современные компании внедряют данную практику непосредственно при разработке ТД процессов производства и ремонта ТПС и его оборудования. Ключевым этапом в рамках ТПП является разработка технологии ремонта, поскольку, подготовленная, согласно требованиям ГОСТ, ТД содержит исчерпывающую информацию о необходимом технологическом оборудовании, инструменте для выполнения операций, а также нормы времени на их выполнение и используемые материалы. В результате можно оценить реальную потребность в ресурсах (кадровых, временных и д.р.), определить будущую планировку участков и мощности производства.

Рассмотрим более подробно этапы ТПП по освоению ремонта новых видов продукции.

Этап 1. Формирование Программы подготовки производства освоения ремонта локомотивов и их составных частей.

Этап 2. Подготовительные работы к освоению ремонта продукции, включающий в себя: анализ наличия КД, ТД, РД и НТД; определение необходимых объемов разработки КД и ТД; анализ имеющегося оборудования и недостающего, в том числе испытательного оборудования, технологической оснастки, инструмента и средств измерения; проработка вопроса по передаче деятельности другим организациям если нет соответствующих документов и возможности выполнять какие либо виды работ; определение экономической целесообразности проведения освоения ремонта; обеспечение финансирования.

Этап 3. Подготовка производства. Данный этап включает в себя следующие работы: формирование программы освоения ремонта новых видов продукции, планирование подготовки ремонта опытного образца, получение КД, отработка полученной КД на технологичность, разработка недостающей КД и РД, разработка

графика и разработка необходимой ТД (в минимальном требуемом количестве) для производства опытного образца, разработка проектно-сметной документации в соответствии с графиком проектирования, изготовление оснастки, формирование графика инвестиционной программы (ГИП) приобретения недостающего оборудования, приобретение оборудования в рамках утвержденной ГИП, разработка ведомости РД, определение маршрута ремонта продукции, проведение разузловки, подача заявок на приобретение ТМЦ), заключение договоров поставки ТМЦ.

Этап 4. Определение материальных и трудовых затрат, в том числе затрат на обучение и аттестацию персонала, занятого в ремонте опытного образца. Данный этап включает в себя следующие работы: разработка норма расхода ТМЦ на ремонт продукции, разработка перечня 100 % сменяемости, разработка и согласование ресурсных спецификаций, определение трудовых затрат, обеспечение, обучение и подготовка персонала, занятого в ремонте опытного образца, определение стоимости ремонта опытного образца, приобретение ТМЦ в соответствии с договорами поставки.

Этап 5. Проведение ремонта опытного образца. Данный этап включает в себя следующие работы: планирование ремонта опытного образца в общем цикле работ, подача объектов ремонта на завод/ СЛД, ремонт опытного образца, контроль за соблюдением ТП ремонта опытного образца, конструкторский надзор, контроль опытного образца на технологичность, проведение приемо-сдаточных испытаний (ПСИ) опытного образца, организация и проведение предварительных испытаний (ПИ), в том числе сторонними организациями, согласно программы и методики предварительных испытаний, проведение опытного пробега (если это определено Программой и методикой предварительных испытаний), отслеживание опытного образца в эксплуатации, оформление акта о завершении опытного пробега (если он проводился) представителями СЛД и ДТ, оформление протокола и акта ПИ комиссией завода/ СЛД проводившего ремонт, присвоение литеры «РО», «О» КД и ТД; разработка (при необходимости). Разработка корректирующих мероприятий,

направленных на изменение (улучшение) КД, ТД по результатам ПСИ и ПИ; организация и проведение приёмочных испытаний с присвоением КД, ТД литеры «$РО_1$», «$О_1$».

Этап 6. Ремонт установочной партии, переход на серийное производство. Данный этап включает в себя следующие работы:

– на основании результатов приёмочных испытаний согласование с заказчиком количества установочной партии для выполнения ремонта продукции;

– разработка дорожной карты по выполнению мероприятий для перехода на серийное производство;

– формирование производственного плана ремонта установочной серии; разработка плана поставок, заключение договоров поставки, приобретение ТМЦ в соответствии нормами расхода ТМЦ и планом ремонта установочной серии; окончательное выполнение всех мероприятий плана подготовки производства, в том числе и по инвестиционной программе; планирование ремонта установочной партии в общем потоке производственного цикла; ремонт установочной партии; проведение мониторинга установочной партии; организация и проведение квалификационных испытаний продукции с целью присвоения КД, ТД литеры «РА», «А», постановка на серийное производство; корректировка норм расхода ТМЦ, трудоемкости, утверждение цены на продукцию.

Основанием для начала организации и планирования ТПП по заводам – филиалам АО «Желдорреммаш», СЛД являются: запрос о потребности освоения ремонта новых видов продукции, годовая программа ремонта, перспективная программа развития и др.

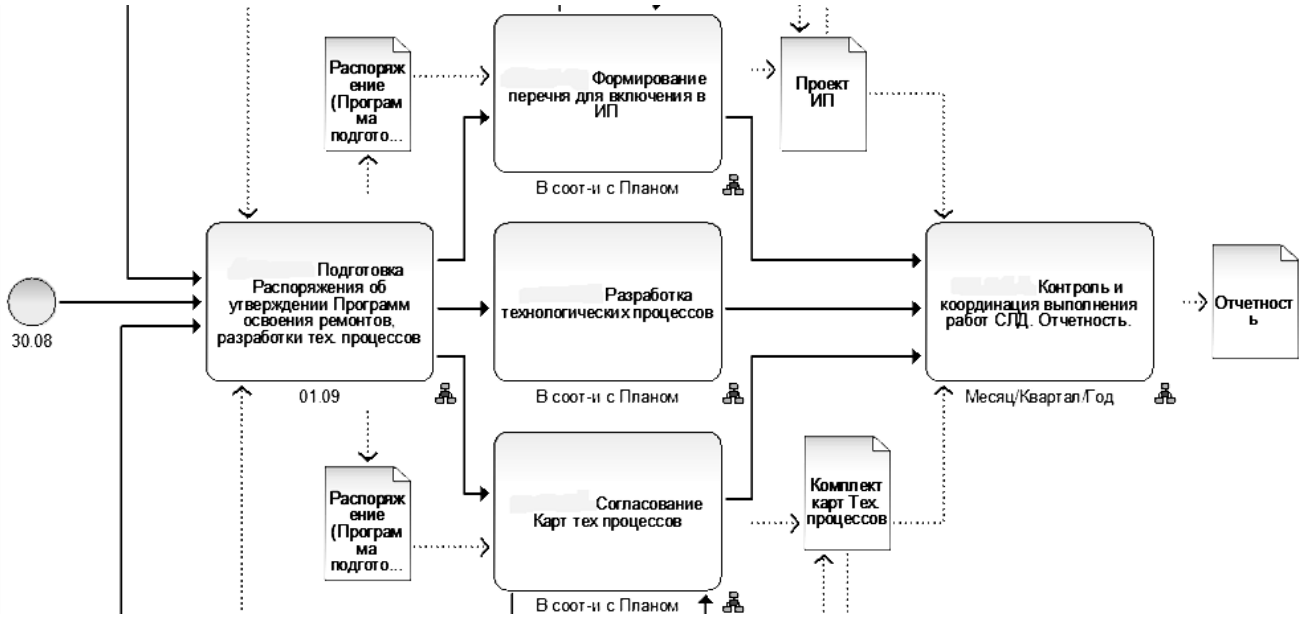
Исходными данными для планирования ТПП являются:

– план по ремонту ТПС и его составных частей;

– перечень продукции (потребность) в освоении ремонта;

– договоры поставок продукции потребителю.

На рисунке 5.2 представлена блок-схема описания процесса ТПП при освоении ремонта новых видов продукции.



ИП – Инвестиционная программа

Рисунок 5.2 — Схема алгоритма по повышению эффективности технологической подготовки производства при освоении технического обслуживания и ремонта тягового подвижного состава

С целью повышения эффективности ТПП и совершенствования процесса разработки ТД сервисные компании переходят на САПР ТП. Без внедрения подобных автоматизированных систем невозможно решать задачи ТПП при освоении ремонта ТПС, задачи разработки ТД, на всех этапах ЖЦ технологической подготовки при освоении их ремонта. Без этого продукция отечественных предприятий на зарубежных рынках априорно будет считаться некачественной, и соответственно неконкурентоспособной [378].

При всём богатстве выбора корпоративных систем управления информацией об изделиях очень сложно найти продукт, в котором бы сочетались достаточная функциональность, широкие возможности настройки под требования предприятия, понятный пользовательский интерфейс и умеренная стоимость [379]. Например, использование таких распространенных САПР ТП, как «Вертикаль» и «*Timeline*»,

затруднено для ремонтного производства, поскольку данные САПР ТП, в основном, предназначены для разработки ТП на изготовление продукции. Поэтому сервисным ремонтным компаниям приходится обращаться к специализированным системам [21]. К ним относятся следующие цифровые системы: КС ПТР [376] и *IPS Techcard* (*IPS*) [79].

Подрядчиком по разработке комплекта ТД в объемах ТО-15, ТР-75, ТР-300, ТР-600 тепловоза серии 2ТЭ25А выступил ОМГУПС в период с 2015–2017 гг. по заказу ИЦ – филиала АО «Желдорреммаш» разработал.

Существенным недостатком программного обеспечения КС ПТР, обнаруженных во время работы, является отсутствие функции централизованного подсчета расходов запасных материалов и запасных частей по каждому КТП в отдельности и по всему процессу ремонта локомотива в целом. Иными словами, отсутствует возможность сформировать ведомости ТМЦ, и усложняется процесс расчета применяемости деталей и сборочных единиц [376, 379]. Специалисты депо столкнулись с проблемой частично наполненных каталогов базы данных.

Система, которая позволяет соответствовать указанным выше критериям, является система – *IPS*. В ГК ООО «ЛокоТех» организован процесс опытного внедрения данной САПР ТП с целью повышения информативности и определения наполняемости ТП на ТОиР локомотивов, а также повышения их восприятия ремонтным персоналом СЛД.

Рассмотрим функциональность технологических модулей *IPS*, включающие все этапы ТПП на производстве, которые дают возможность полностью унифицировать и стандартизировать производственные процессы. *IPS* состоит из настраиваемых технологических каталогов, справочников, шаблонов выходных форм документов и примеры расчёта технологических режимов. Модель данных *IPS* ориентирована на стандарты ЕСКД и ЕСТД. ТП в системе *IPS* представлены в виде древовидной структуры, включающей информацию по операциям, переходам, используемому инструменту и оснастке, трудовым и материальным нормам. На основании дерева ТП система *IPS* автоматически формирует требуемый комплект

ТД в соответствии с нормами ЕСТД, автоматизирует и формализует основные задачи технолога на предприятии.

Для того, чтобы начать работу по разработке ТП от ТО до ТР в системе, требуется настройка бланков (форм), справочников (трудовых и материальных норм, оборудования, инструмента, оснастки и приспособлений), сценариев расчёта, поскольку вся эта информация не включена в состав *IPS* по умолчанию. В ходе оценки готовности системы *IPS* к разработке ТП на серию 2ТЭ25Км отмечены технические ограничения, сдерживающие «быстрое» развёртывание системы в депо:

– отсутствует база оснастки, приспособлений и инструмента;

– отсутствует база технологического оборудования;

– отсутствует актуальный перечень инструкций по охране труда;

– отсутствуют цеха и участки СЛД (которые расположены непосредственно на территории самого депо) для разработки расцеховочных маршрутов;

– отсутствует интеграция справочных систем АСУ СГ и КС НСИ с *IPS* для подвязки ТМЦ к ТП;

– отсутствует каталог отраслевых справочников трудоёмкости;

– отсутствует перечень основных используемых (шаблонных) переходов для часто применяемые ТО;

– отсутствует матрица по разработке, согласованию и утверждению ТП.

Также важно отметить, что значительное повышение эффективности ТПП реализуется путём верификации и автоматизации всех процессов предприятия, касающиеся не только этапов ТПП (выборочно), но и структуру управления ими, а также алгоритмы обмена информацией между данными этапами (создание единого информационного пространства). Увеличение расходов с одновременным усложнением конструкций ТПС и необходимостью уменьшения сроков освоения их ремонта.

5.2 Процедура продления срока службы подвижного состава с учетом предложенной модели

Действующая нормативная база предоставляет возможность ПСС определенным сериям ТПС и моделям НТПС. При этом реализация ПСС ТПС ограничено требованиями пункта 11 статьи 4 [226], которые касаются наличия в КД установленных временных периодов для ряда серий и моделей ПС. В связи с этим, для осуществления продления полезного эксплуатационного срока службы необходимо выполнить несколько условий. В первую очередь, изготовитель (или держатель) КД обязан внести для соответствующей серии ТПС или модели НТПС изменения, касающиеся ННСС, с учетом соответствующих корректировок (рисунки 5.3, 5.4).

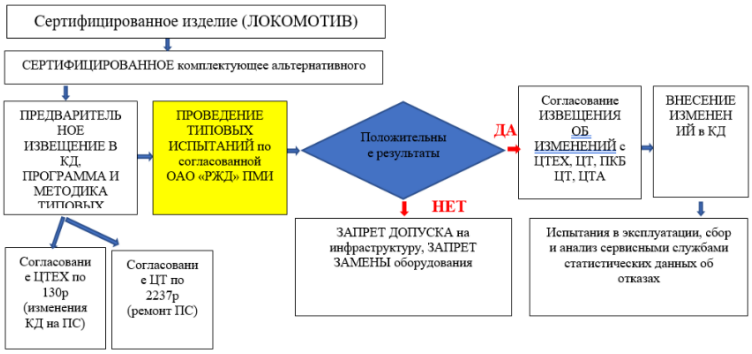


Рисунок 5.3 – Замена комплектующего альтернативного поставщика, прошедшего обязательное подтверждение соответствия в форме сертификации или декларирования, а также постановку на производство

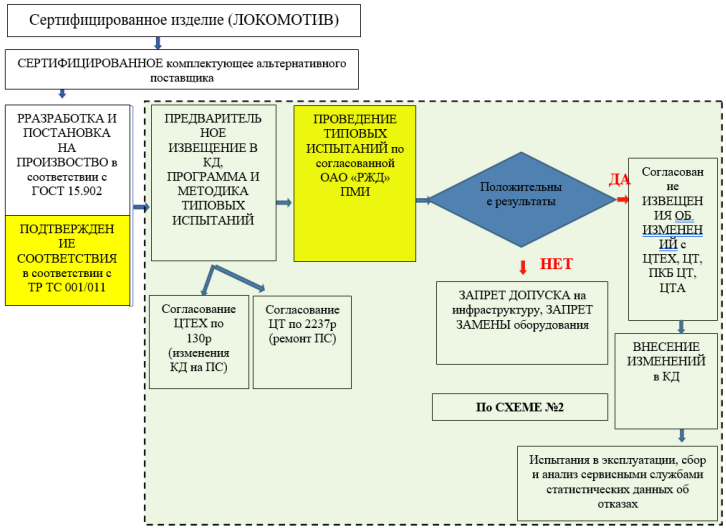


Рисунок 5.4 – Замена комплектующего альтернативного поставщика, требующего обязательного подтверждения соответствия в форме сертификации или декларирования, а также постановки на производство

Как было указано в пункте 1.5 настоящей работы, основными нерешенными вопросами в рассматриваемом контексте продолжают оставаться критерии квалификации персонала, точность и надежность получаемых данных, а также технологическая модель реализации процедуры диагностирования на машиностроительных и ремонтных предприятиях. В связи с этим, основная цель данного исследования заключается в детальном анализе последовательной процедуры подготовки производства, необходимой для продления срока службы как ТПС, так и НТПС, который эксплуатируется на инфраструктуре. Данное исследование сосредоточено на анализе действий, исходя из результатов ТД.

В результате проведённого исследования была разработана процессная расширенная модель бизнес-процесса, которая представляет собой алгоритм для формирования сетевого плана работ по ТПП (рисунок 5.5). Эта модель учитывает соблюдение норм и требований безопасности движения, а также надежности функционирования, что в свою очередь позволит предотвратить появление на железнодорожной инфраструктуре транспортных средств, которые не отвечают установленным нормативным требованиям [232, 233].

Важно отметить, что разработка системы ТПП является одним из решающих этапов в процессе освоения как ремонта, так и производства новых видов продукции. Данная система нацелена на оптимизацию различных процессов, сокращение затрат, повышение качества изготавливаемой продукции и уменьшение сроков её освоения.

Далее стоит рассмотреть важность создания и внедрения единой базы данных для хранения информации о состоянии ТПС. Регулярное обновление данных о проведённых диагностических процедурах, а также результатах ремонтов позволит обеспечить доступность информации для анализа трендов и разработки прогнозов. Более того, такая база данных может служить основой для принятия обоснованных решений на всех уровнях управления, от оперативного до стратегического.

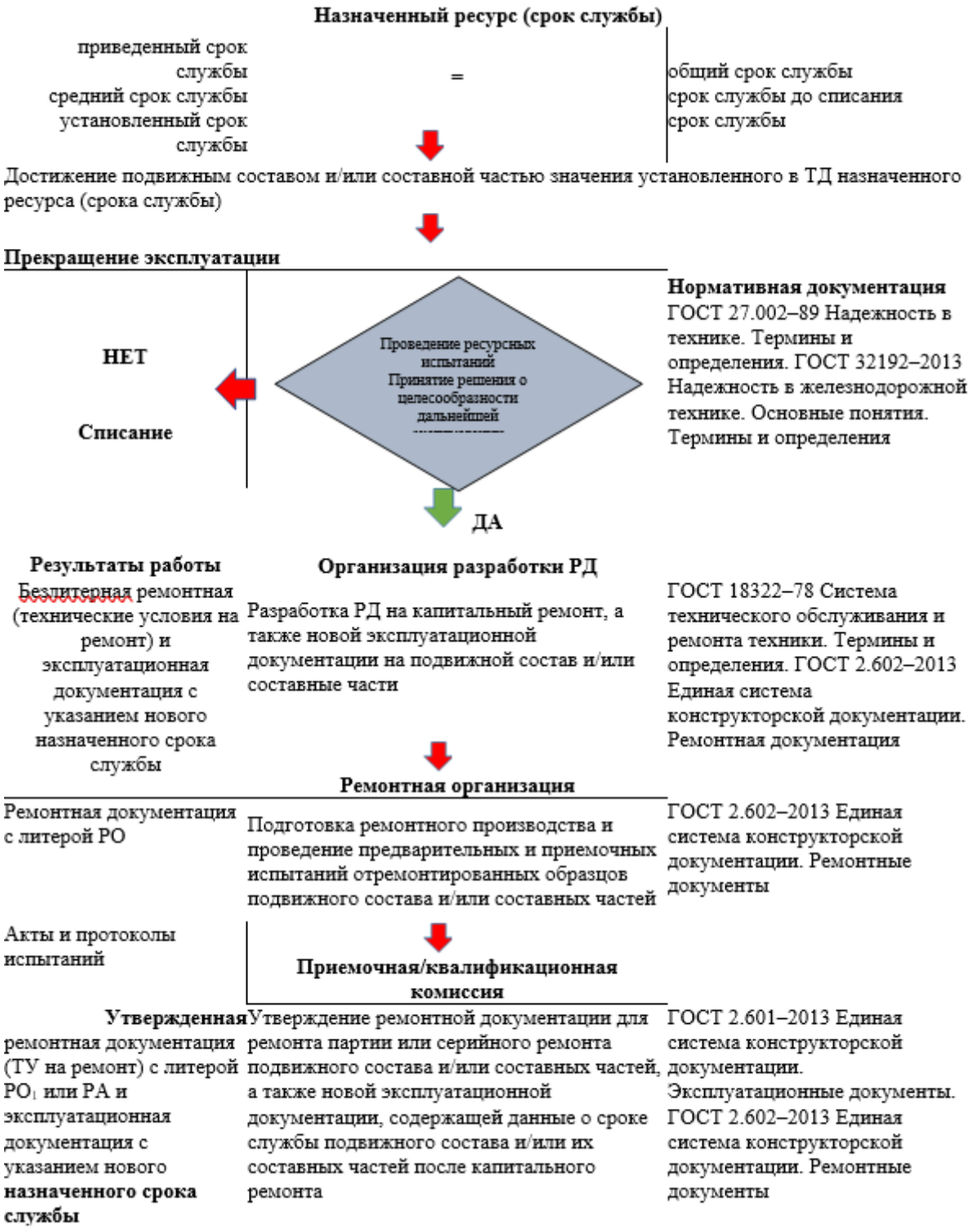


Рисунок 5.5 – Процессная расширенная модель бизнес-процесса – алгоритма формирования сетевого плана работ по ТПП при организации работ по ННСС подвижного состава и/или их составным частям [227]

Рассмотрим этапы подготовки производства. На текущем этапе уполномоченный представитель собственника ТПС передает комплект РД без

литеры, утвержденный в установленном порядке [227, 232]. На основании данных документов осуществляется разработка КД для опытного ремонта одной или нескольких единиц серии (модели) ТПС с целью обеспечения соответствия ремонта предъявляемым требованиям. Данный этап включает в себя следующие основные работы: отработка полученной КД на технологичность, разработка недостающих фрагментов КД и РД, формирование графика инвестиционной программы (ГИП) приобретения необходимого оборудования, приобретение оборудования в рамках утвержденной ГИП, разработка ведомости РД, определение маршрута ремонта элементов ТПС, подача заявок на приобретение ТМЦ, заключение договоров поставки ТМР [227, 232]. Началом испытаний является наличие следующих документов:

– утвержденные программы и методики предварительных испытаний;

– уведомление (или иной документ, его заменяющий) ремонтной организации о проведении опытного ремонта ТПС.

Предварительные испытания считаются завершёнными после утверждения протоколов предварительных испытаний и подписанием акта комиссионной приёмки и выдачи заключения о возможности организации данного ремонта ТПС по РД с литерой «РО» (при необходимости их корректировку по итогам проведённого – ремонта и – испытаний с присвоением литеры «РО», а также корректировку ЭД).

При подготовке отдельно можно выделить подготовку ремонтного производства в структурном подразделении, включающая в себя анализ технологической оснащённости (анализ имеющегося и недостающего оборудования, в том числе испытательного, технологической оснастки, инструмента и средств измерения), проведение выборочного соблюдения технологической дисциплины ремонта ТПС на производственных участках и принятие заключения по итогам испытаний.

Рисунок 5.6 – Ключевые этапы работ по назначению нового срока службы тяговому подвижному составу и/ или его составным частям

Данная модель позволяет полностью верифицировать процесс ТПП при освоении ремонта, изучая техническое состояние элементной базы ТПС. Это дает возможность определить максимально эффективные критерии долговечности ТПС, что в свою очередь позволяет своевременно внедрять дополнительные профилактические меры для поддержания его остаточного ресурса в процессе эксплуатации на различных этапах жизненного цикла.

5.3 Постановка продукции на производство с использованием технологии цифровых двойников

Модель изготовления изделия с использованием технологии ЦД (рисунок 5.7) отличается от классической (по ГОСТ 15.902–2014 [168]) меньшим количеством этапов и испытаний непосредственно физических объектов. Модель постановки на производство с использованием ЦД включает:

– разработка технического задания на основе технических требований заказчика;

– создание ЦД будущего изделия с высокой степенью адекватности;

– проведение цифровых виртуальных испытаний ЦД;

– проведение приёмочной комиссии с использованием результатам цифровых (виртуальных) испытаний;

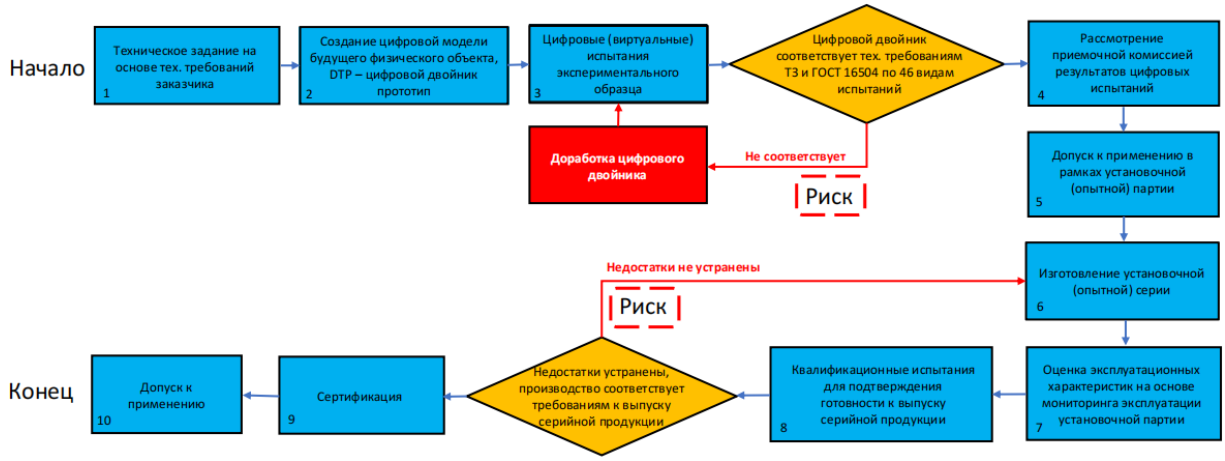
– производство установочной партии опытных изделий;

– проверка и подтверждение эксплуатационных характеристик опытных образцов; проведение квалификационных испытаний для подтверждения готовности продукции к серийному производству;

– оформление сертификации или получение лицензии на изделие.

Риски из-за ошибок в проектировании в указанной модели минимизируются за счёт достаточного количества проведённых цифровых (виртуальных) испытаний для подтверждения свойств и характеристик изделия, что исключает необходимость корректировки КД и изготовления новых экспериментальных образцов. В результате достигается снижение временного интервала от разработки

требований к изделию до его серийного производства производственной компанией.



При постановке на производство с использованием ЦД: 1. Риски связанные с выявлением несоответствий заявленных требований к изделию в соответствии с ГОСТ и ТЗ минимальные за счёт достаточного количества цифровых испытаний; 2. Доработка при выявлении несоответствий в изделии не требует изменения его в «железе»; 3. Постановка на производство упрощается за счёт уменьшения количества этапов и времени на их реализацию

Рисунок 5.7 – Модель постановки продукции на производство с использованием цифрового двойника

После получения допуска к выпуску серийного продукта, ЦД остаётся востребованным, так как за счёт обмена данными об эксплуатации физического изделия и ЦД возможно улучшать свойства и характеристики изделия.

5.4 Выводы по разделу 5

В пятом разделе данной работы был представлен всесторонний анализ разработки системы ТПП для освоения ремонта и/или изготовления новых видов продукции. Разработка этой системы является многоступенчатым и комплексным процессом, который включает в себя множество подготовительных мероприятий, необходимых для успешного запуска производственного цикла. Основное внимание уделялось важности тщательного планирования и организации всех

этапов ТПП с целью достижения эффективного функционирования производства в установленные сроки и в соответствии с высокими стандартами качества.

Одним из ключевых выводов является то, что ТПП играет важную роль в процессе освоения ремонта новых видов продукции. Эффективно организованная система ТПП способствует снижению рисков, связанных с несоответствием качественных показателей и сроков выполнения работ, а также обеспечивает оптимальное использование ресурсов.

Одной из задач, выделенной в разделе, является необходимость внедрения автоматизированных систем, таких как САПР, которые способствуют повышению эффективности разработки технологических процессов. Определено, что без автоматизации невозможно решать задачи, связанные с технологической подготовкой, особенно в условиях растущей конкуренции.

Также подчёркнута необходимость создания единой базы данных для хранения информации о состоянии ПС и проведённых диагностических процедурах. Регулярное обновление этой информации позволит анализировать тренды и разрабатывать прогнозы, что важно для принятия обоснованных управленческих решений.

Успешная реализация мероприятий по технологической подготовке не только улучшает конкурентоспособность на рынке, но и способствует удовлетворению потребностей потребителей в качественной и инновационной продукции.

6 ПРОМЫШЛЕННЫЕ 3D-РЕШЕНИЯ И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ РЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В разделе 5 диссертации, посвящённой разработке методологии повышения эффективности ТПП при ремонте ТПС, акцентирует внимание на важности применения современных промышленных 3D-решений и НК. В этих условиях стремительного прогресса и возросших требований к качеству, внедрение шестиосевых роботов-манипуляторов может значительно оптимизировать процессы ремонта. Данные технологии позволяют повысить точность и скорость выполнения работ, а также сократить затраты и время простоя оборудования, что в свою очередь способствует улучшению качества ремонта и надежности ТПС.

НК, как часть этой концепции, обеспечивает высокие стандарты производства и минимизирует риски, что является ключевым фактором для достижения устойчивости и конкурентоспособности в отрасли.

6.1 Функциональная структура робота как универсального автомата для выполнения механических действий: анализ исполнительных систем и сенсорного управления

Появление манипуляторов в Советском Союзе и их дальнейшее развитие в Российской Федерации стали важной вехой в области автоматизации и роботизации производства. С начала 1960-х годов, когда началась активная интеграция новых технологий в производственные процессы, в стране были разработаны и внедрены первые промышленные манипуляторы. Данные устройства вначале использовались в таких отраслях, как машиностроение и оборонная промышленность, где требовалась высокая точность и снижение трудозатрат.

Наиболее известным примером является создание манипуляторов на базе советских образцов, аналогичных зарубежным моделям, таких как манипуляторы, разрабатываемые в Японии и США. В 1970–1980-е годы в СССР производились манипуляторы, использовавшиеся в сварочном производстве, монтажных работах

и других областях, требующих высоких характеристик точности и повторяемости. Такие устройства позволяли автоматизировать множество процессов, тем самым способствуя более эффективному использованию рабочей силы и снижению производственных затрат.

С распадом Советского Союза в начале 1990-х годов процесс автоматизации и внедрения манипуляторов продолжался, хотя и в условиях экономических трудностей и трансформации промышленности. Некоторые из советских разработок были усовершенствованы, а ряд предприятий стал активно обновлять свое оборудование, что привело к появлению современных манипуляторов, способных выполнять более сложные операции.

В 2000-х годах, с ростом интереса к робототехнике на мировом уровне и с выделением значительных средств на науку и технологии в России, наблюдался новый виток в развитии манипуляторов. Российская Федерация начала активно внедрять автоматизированные системы на производственные предприятия, что привело к росту интереса со стороны как государственных, так и частных компаний. Количество промышленных роботов по странам (по данным на 2023 год – таблица 6.1).

Таблица 6.1 – Количество промышленных роботов по странам

Страна	Количество роботов (тыс.)	Плотность (роботы на 10 000 работников)
Южная Корея	30	900
Япония	48	450
Германия	35	400
США	25	200
Китай	40	150
Швеция	10	300
Россия	5	50

Плотность, как и в остальных странах, указывает на количество роботов на 10,000 работников, что позволяет лучше понять уровень автоматизации в каждой стране.

Робот можно охарактеризовать как универсальный автомат, предназначенный для выполнения механических операций, аналогичных тем, которые осуществляет человек при выполнении физической работы. На рисунке 6.1 представлена функциональная схема робота, которая включает в себя исполнительные системы — манипуляционные (один или несколько манипуляторов) и передвижения, в случае если робот обладает мобильностью, а также сенсорную систему, обеспечивающую робота информацией о внешней среде, и устройство управления. Исполнительные системы, в свою очередь, состоят из механической системы и системы приводов. Механическая система манипулятора, как правило, представляет собой кинематическую цепь, состоящую из подвижных звеньев с угловым или поступательным движением, которая завершается рабочим органом в виде захватного устройства или специализированного инструмента.

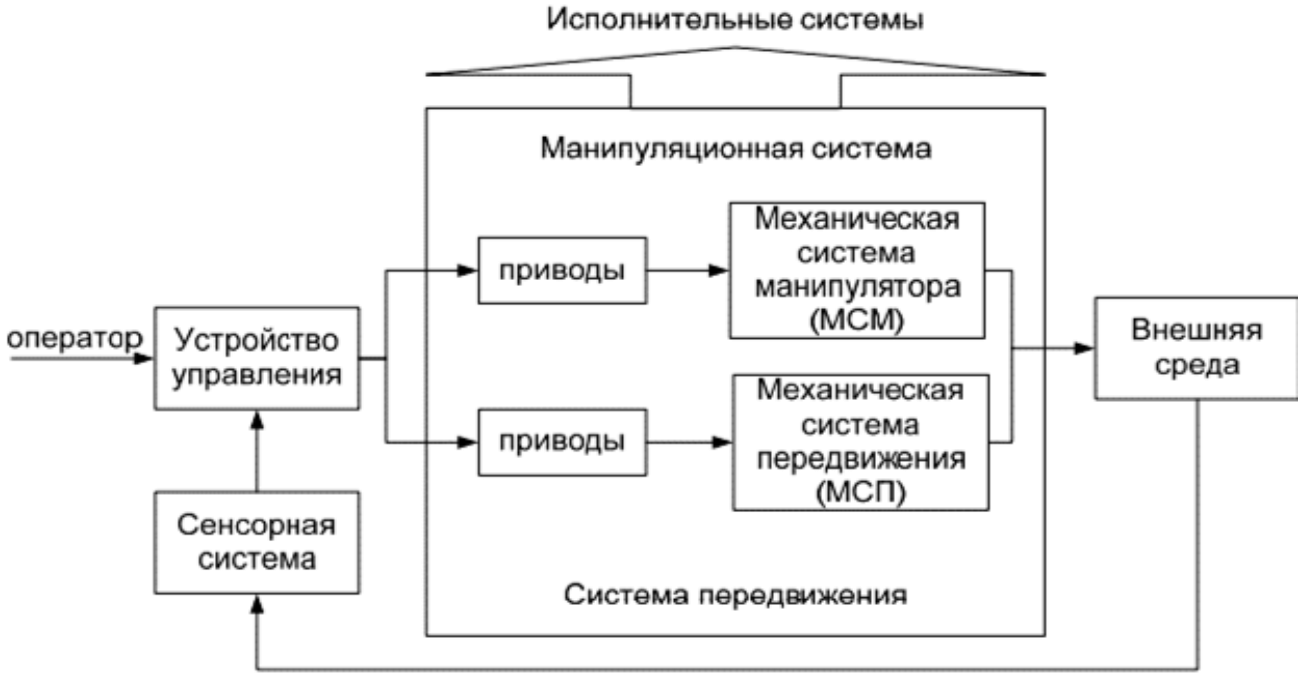


Рисунок 6.1 — Принципиальная схема роботизированного комплекса с автоматической обработкой данных контроля и калибровки

Схема, представленная на изображении, демонстрирует концепцию управления многозвенным манипулятором. В центре схемы находятся ключевые элементы, включая элементы управления и др.

Манипулятор состоит из нескольких звеньев, соединённых суставами, что позволяет ему выполнять различные движения. Каждый сустав управляется серводвигателем или другим исполнительным механизмом, что обеспечивает точность позиционирования. Указаны параметры, такие как углы поворота и линейные перемещения, которые необходимы для выполнения конкретной задачи.

Важным параметром является обратная связь, которая позволяет системе корректировать движения на основе информации о фактическом положении манипулятора по сравнению с заданным. Это может включать датчики положения, которые обеспечивают актуальные данные о положении и ориентации.

В системе управления также может быть задействована нейронная сеть, которая обучается для оптимизации процессов управления, улучшения точности и адаптации к изменениям в окружающей среде или структуре задач. Это позволяет значительно повысить эффективность выполнения манипуляций в сложных условиях.

В целом, схема отражает комплексный подход к управлению манипулятором, объединяющий механические, электронные и программные компоненты для достижения высоких показателей производительности.

6.2 Геометрический подход к решению обратной задачи кинематики шестизвенного манипулятора с вращательными сочленениями

Для шестизвенного манипулятора, состоящего из шести звеньев и шести вращательных суставов, обратная задача кинематики заключается в нахождении углов суставов, соответствующих заданной позиции и ориентации конечного эффектора. Предполагается, что концом манипулятора является инструмент или

захват, который должен быть размещён в определённой точке пространства с нужной ориентацией.

Планирование падения концов звеньев: каждое звено манипулятора можно рассматривать как линейный отрезок, соединяющий сочленения. В пространстве можно использовать декартову или цилиндрическую систему координат для обозначения положения каждого сустава.

Параметры манипулятора: Используйте стандартные параметры, такие как длины звеньев L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, а также углы между звеньями. Важным этапом является инициализация данных параметров для создания модели манипулятора.

Позиция и ориентация: Задание позиции конечного эффектора обычно определяется его координатами (x, y, z), а ориентация может быть задана с помощью углов Эйлера, или матрицы ориентации, которая описывает поворот объекта в пространстве.

Первый этап: найти положение i ориентацию первого звена манипулятора, которое соединяет базу и первый сустав. Угол вращения первого взрослого определяется как (2.52):

$$\theta_1 = atan2(y, x), \tag{2.52}$$

Итеративное вычисление: далее последовательно вычисляются углы для остальных суставов. Например, используя тригонометрические уравнения и правила косинусов, находят угол второго сустава θ_2 и длину второго звена D_2, решая систему уравнений, чтобы связать длины звеньев с координатами конечного эффектора.

Сложные конструкции: для упражнений с манипулятором, имеющим шесть степеней свободы, можно использовать так называемую «подходящую прямую», где учитываются дополнительные углы поворота для суставов, чтобы избежать «зависания» или коллизий манипулятора.

Геометрические преобразования: используйте матрицы преобразования для описания движения каждого звена и последовательно комбинируйте их для получения общей позиции и ориентации конечного эффектора.

Геометрический подход позволяет эффективно решать обратные задачи кинематики для манипуляторов, делая акцент на пространственных взаимосвязях между звеньями. Он не только облегчает расчёт углов суставов, но и способствует лучшему пониманию работы манипуляторов в сложных приложениях. Этот метод также предоставляет визуальные и графические модели, которые могут служить основой для дальнейшей робототехнической симуляции и контроля.

6.3 Управление многочленными манипуляторами в робототехническом комплексе на основе нейронных сетей

Прямая задача кинематики подразумевает определение пространственного положения и ориентации характерной точки, обычно расположенной в области рабочего инструмента манипулятора, на основании заданных обобщенных координат. Обратная задача кинематики, подобно прямой задаче, является одной из ключевых задач кинематического анализа и синтеза, и имеет решающее значение для управления положением звеньев, а также ориентацией рабочего инструмента манипулятора.

Решение обратной задачи кинематики представляет собой сложную вычислительную задачу, и большинство существующих аналитических методов, применяемых для этого, отличаются значительными затратами в плане вычислительных ресурсов. В качестве альтернативного подхода можно рассмотреть использование нейронных сетей для решения данной проблемы.

Шестизвенный манипулятор представляет собой робототехнический механизм, где движение конечного звена зависит от угловых состояний всех суставов. Для решения задач управления таким манипулятором требуется

определить закономерности соответствия между конфигурацией суставов (обобщённые координаты) и положением рабочего органа.

Рассмотрим, как можно использовать нейронную сеть, реализованную с помощью библиотеки *Keras*, для обучения модели решения задач прямой и обратной кинематики. Прямая кинематика: Вычисление положения и ориентации рабочего органа манипулятора на основе заданных угловых перемещений суставов. Обратная кинематика: Определение угловых конфигураций суставов на основе целевого положения и ориентации рабочего органа. Для решения данных задач мы используем параметры манипулятора (например, длины звеньев, предельные углы суставов и др.) и нейронную сеть. Параметры манипулятора представлены в виде таблицы (например, таблица 6.2 Денавита – Хартенберга, определяющая геометрические свойства каждого звена).

Таблица 6.2 – Параметры манипулятора

№ звена	Длина L_i, м	Угол смещения d_i, м	Наклон d_i,°	Наклон α_i,°
1	0,5	(от –180° до 180°)	0,2	90
2	0,4	(от –90° до 90°)	0	0
3	0,3	(от –90° до 90°)	0	90
4–6	...	...	...	...
Примечание: использование вышеописанных параметров позволяет точно описать манипулятор на основе математической модели. Эти данные будут использованы для генерации обучающего набора данных				

Решение задачи с использованием *Keras*: 1. Генерация данных для обучения: для создания обучающих данных мы можем использовать аналитические уравнения прямой и обратной кинематики, основанные на параметрах манипулятора. В случае прямой задачи данные будут представлять собой входные значения $\theta = (\theta_1, \theta_2, ..., \theta_6)$ (углы суставов) и соответствующие выходные позиции (x, y, z) и ориентацию (например, углы Эйлера или кватернионы).

Для обратной задачи входными данными станут (x, y, z) и ориентация, а выходными – θ.

Пример Python-кода для генерации данных (с недетализированной функцией кинематики):

```
import numpy as np
# Параметры манипулятора
link_lengths = [0.5, 0.4, 0.3, ...]  # длины звеньев, метры
num_samples = 10000  # количество данных
def forward_kinematics(theta):
    # Пример функции прямой кинематики (реализуется через библиотеку или вручную)
    # На выходе: (x, y, z, ориентация)
    pass
# Генерация данных для прямой задачи
angles = np.random.uniform(low=-np.pi, high=np.pi, size=(num_samples, 6))  # углы суставов
positions = np.array([forward_kinematics(theta) for theta in angles])      # прямой расчёт
# Данные для обучения
X_train = angles  # входные данные
y_train = positions  # выходные данные
```

2. Создание архитектуры нейронной сети. Мы можем построить нейронную сеть для задачи регрессии. Пример простой сети для прямой задачи кинематики:

```
from tensorflow.keras.models import Sequential
from tensorflow.keras.layers import Dense
# Создание нейронной сети
model = Sequential([
    Dense(64, activation='relu', input_shape=(6,)),  # 6 входных значений (углы суставов)
    Dense(128, activation='relu'),
    Dense(64, activation='relu'),
    Dense(3, activation='linear')  # 3 выходных значения: x, y, z
])
# Компиляция модели
model.compile(optimizer='adam', loss='mse', metrics=['mae'])
# Обучение модели
model.fit(X_train, y_train, epochs=50, batch_size=32, validation_split=0.2)
```

3. Решение обратной задачи: аналогично, для обратной задачи мы можем поменять входные и выходные данные. Но стоит учитывать многозначность решений: один и тот же набор (x, y, z) может соответствовать разным угловым положениям суставов. Для таких задач часто используются дополнительные ограничения или регуляризация. Пример архитектуры сети для обратной задачи:

```
# Изменяем выходное количество нейронов (6 суставов)
model_inverse = Sequential([
    Dense(128, activation='relu', input_shape=(3,)),  # Вход: x, y, z
    Dense(256, activation='relu'),
    Dense(128, activation='relu'),
    Dense(6, activation='linear')  # Выход: углы суставов
])
model_inverse.compile(optimizer='adam', loss='mse', metrics=['mae'])
model_inverse.fit(y_train, X_train, epochs=50, batch_size=32, validation_split=0.2)
```

4. Тестирование модели: после обучения можно протестировать модель, например:

```
# Для прямой задачи
theta_test = np.array([0.1, 0.2, -0.1, 0.5, -0.3, 0.4])  # пример углов (входных данных)
predicted_position = model.predict(theta_test.reshape(1, -1))
print(f"Предсказанная позиция: {predicted_position}")
```

Использование нейронных сетей для управления шестизвенными манипуляторами позволяет эффективно решать задачи прямой и обратной кинематики, заменяя сложные аналитические расчёты машинным обучением. Для успешного обучения модели важно иметь большой и разнообразный набор данных, который можно генерировать на основе математической модели манипулятора.

Методология, реализованная на основе *Keras*, сочетает простоту реализации и высокую гибкость настройки (рисунок 6.2).

Рисунок 6.2 — Методология управления роботизированными манипуляторами с использованием нейронных сетей при оценке и прогнозировании технического состояния

В данном разделе изложена методология управления роботизированными манипуляторами с использованием нейронных сетей. Применение данного подхода позволяет существенно оптимизировать процесс решения прямых и обратных задач кинематики, снижая вычислительные затраты и обеспечивая высокую точность результатов. Использование библиотек, таких как *Keras*, демонстрирует высокую эффективность нейронных сетей при решении задач прогнозирования параметров положения и ориентации манипуляторов, что способствует повышению быстродействия и точности управления робототехническими системами.

6.4 Роботизированный комплекс для автоматизированной обработки данных контроля и калибровки с использованием информации о дефектах, нейронных сетей и цифрового двойника для повышения эффективности технического обслуживания и ремонта

Современные технологии ремонта активно развиваются благодаря внедрению методов автоматизации, цифровизации и искусственного интеллекта. Одной из ключевых задач является обработка больших объемов данных, получаемых в процессе контроля, а также повышение точности и скорости принятия решений об исправности или необходимости ремонта оборудования.

Решение этой задачи становится особенно актуальным с учетом повышающихся требований к надежности техники и растущей сложности индустриальных объектов.

В данном контексте разработки роботизированных комплексов для автоматизированной обработки данных НК и проведения калибровки, интегрирующих информацию о дефектах, элементы искусственного интеллекта (включая нейронные сети) и концепцию ЦД, открывают новые возможности для повышения эффективности и точности процессов ТОиР локомотивов.

Основой предлагаемого подхода является интеграция нескольких ключевых компонентов.

1. Использование данных о выявленных дефектах для формирования обучающей выборки и последующей обработки с помощью нейронных сетей.

2. Применение ЦД – виртуального аналога объекта контроля – для моделирования и анализа поведения объекта в различных эксплуатационных условиях.

3. Роботизация процессов калибровки и контроля для обеспечения высокой точности выполнения операций и минимизации человеческого фактора.

Таким образом, представленный комплекс сочетает в себе новейшие достижения в робототехнике, обработке данных и искусственном интеллекте, что позволяет автоматизировать рутинные задачи, повысить эффективность технического обслуживания объектов, а также увеличить точность выявления и прогнозирования критических неисправностей.

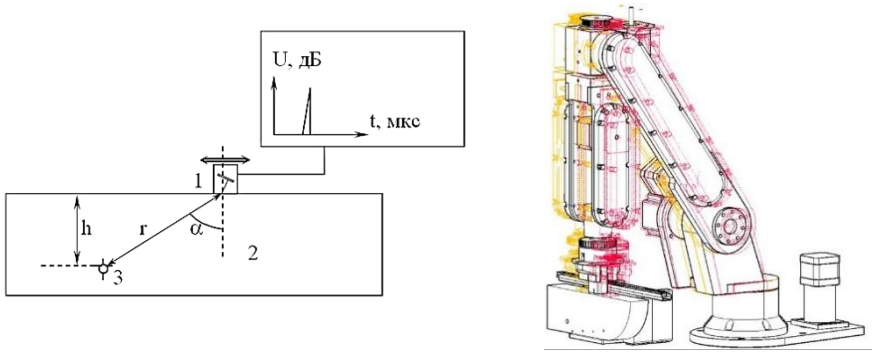
6.4.1 Роботизированный процесс измерения диаграмм направленности пьезоэлектрических преобразователей

В роботизированный комплекс для калибровки ПЭП в автоматическом режиме встроен ранее разработанный алгоритм [380]. Принцип работы, которого следующий: ПЭП 1 ставят в произвольное положение в пределах зоны регистрации эхо-сигнала на образце 2 с отражателем 3, представляющим собой боковое

цилиндрическое отверстие, расположенное на глубине *h*. С использованием данного комплекса, реализующего данный алгоритм, производится измерение амплитуды эхо-сигнала от ненаправленного отражателя в различных точках в пределах диапазона перемещения преобразователя по поверхности образца. Одновременно с измерением амплитуды в каждой из этих точек фиксируется время прихода эхо-сигнала.

Угол ввода ультразвука в материал образца определяется на основе времени прихода эхо-сигнала, известной глубины залегания отражателя и скорости распространения ультразвуковой волны в материале. На основании этих данных рассчитывается угол ввода, что позволяет определить диаграммы направленности преобразователя, параметры которых включают размер пьезоэлемента *a*, мм), частоту *f*, МГц и скорость ультразвуковой волны в материале *c*, м/с — все эти значения заносятся в память устройства.

Процедура повторяется для различных положений преобразователя в пределах зоны регистрации эхо-сигналов. В каждом из положений выполняются измерения амплитуды, времени прихода сигнала и вычисления угла ввода ультразвука. Полученные данные используются для составления диаграммы направленности (ДН) ПЭП. На рисунке 6.3 схематически представлен принцип работы предложенного алгоритма [380].

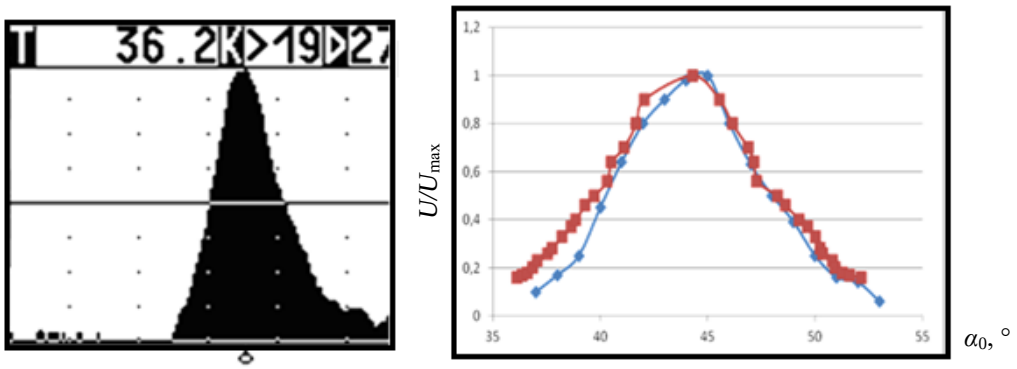


а) *б*)

а) Схема измерения; б) Роботизированный комплекс

Рисунок 6.3 — Роботизированный комплекс измерения

На рисунке 6.2, а представлена временная огибающая эхо-сигналов, зарегистрированных преобразователем П121–2,5–45 от бокового цилиндрического отверстия диаметром 6 мм, находящегося на глубине 44 мм в образце СО–2. На рисунке 6.2, б показаны пространственные огибающие сигналов от того же отражателя, полученные экспериментально (обозначены красными квадратами), а также результаты, рассчитанные путем преобразования временной огибающей в пространственную (обозначены синими квадратами). Аналогичные исследования проводились и для преобразователей с углами ввода 40° и 50°, что позволило получить схожие результаты.



а) *б*)

U – амплитуда эхо-сигнала, дБ; α_0 – угол ввода луча, град.

Рисунок 6.2 — Временная огибающая эхо-сигналов (*а*) и диаграммы направленности, полученные экспериментально на основе измерений пространственных огибающих (обозначены красными квадратами), а также построенные путем преобразования временной огибающей в пространственную (обозначены синими квадратами) (*б*) [381]

Преимуществом данного алгоритма [381] является практически полное исключение случайной ошибки в получаемых данных: высокая степень автоматизации, статистическая погрешность настолько мала, что значительно уступает приборной погрешности, обусловленной ограничениями измерительного оборудования. Это делает влияние случайной составляющей практически незначительным. Эффективность разработанного метода подтверждена патентом Российской Федерации № 2581082 от 10 апреля 2016 года.

6.4.2 Разработка автоматизированного технического средства определения диаграмм направленности пьезоэлектрических преобразователей

Для автоматизации предложенного алгоритма построения диаграмм направленности преобразователей было создано специализированное автоматизированное устройство [381], в основе работы которого лежат модули обработки сигналов, реализованные с использованием современных микропроцессорных технологий (патент РФ № 2581082 от 10.04.2016). Это устройство включает в себя следующие основные компоненты: генератор высокочастотных импульсов (4), соединённый с излучающим (*И*), приёмным (*П*) или приёмно-излучающим (*ПИ*) ПЭП (1), работающим в зависимости от установленного режима, ключ (5), приёмное устройство (6), оснащённое аттенюатором (7) и усилителем (8), блок программного управления (9), аналого-цифровой преобразователь (10), контроллер прямого доступа к памяти (11), оперативное запоминающее устройство (12), контроллер прерываний (13), генератор счётных импульсов (14), формирователь кода (15), индикатор (16), клавиатура (17), а также модуль обработки сигналов (18), содержащий блоки фильтрации (19), накопления данных (20), определения ДН (21) и распределения задач (22). Полученные ДН отображаются либо на встроенном индикаторе, либо передаются на внешнее устройство через *VGA*-интерфейс (23).

Принцип работы устройства, следующий: широкополосный генератор высокочастотных импульсов (4) формирует радиоимпульсы, которые возбуждают ПЭП (1), функционирующие в режиме излучения и приёма сигналов. Построение ДН осуществляется при установленном режиме ключа (5), соответствующем совместной работе преобразователя. Принимаемые преобразователем (1) эхо-сигналы поступают в аттенюатор (7), который регулирует динамический диапазон усиления, согласованный по цифровому управлению от блока программного управления (9). Аналоговые сигналы затем преобразуются в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя (10), взаимодействующего с

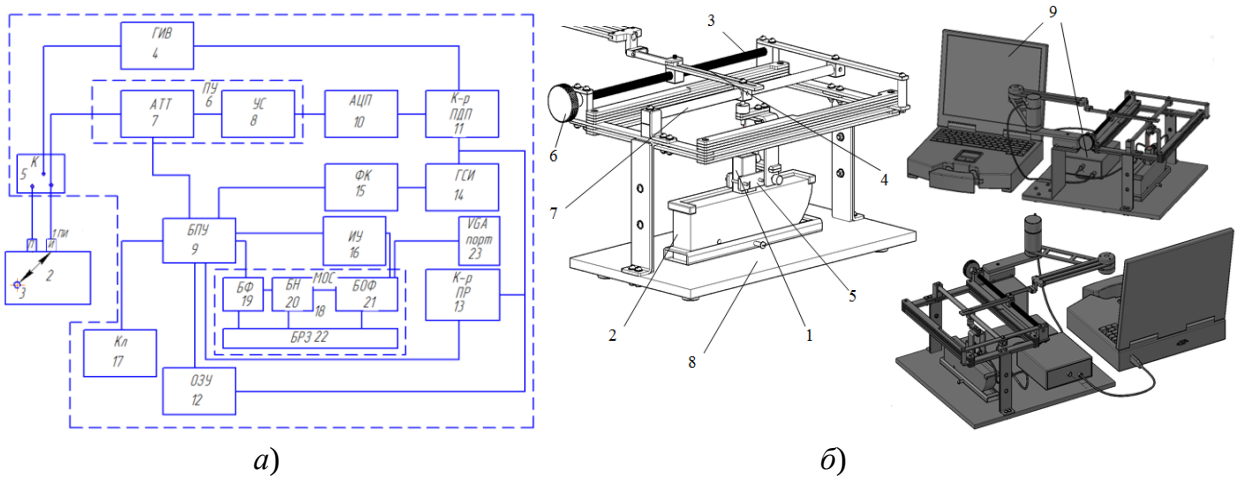
контроллером прямого доступа к памяти (11). Этот контроллер синхронизирует работу аналого-цифрового преобразователя и записывает цифровую информацию в оперативное запоминающее устройство (12). Одновременно он управляет выполнением операций на других устройствах системы, включая генератор счётных импульсов (14), согласуя процесс синхронизации возбуждения преобразователя (1) с моментом начала считывания данных.

Для обеспечения точной записи данных в память (12) контроллер прямого доступа формирует адресные и управляющие сигналы, координируя их с контроллером прерываний (13), который распределяет временные интервалы для передачи данных между блоком программного управления (9) и системой на общей шине. В момент активации генератора высокочастотных импульсов (4) включается генератор счётных импульсов (14), который измеряет интервал времени до прихода эхо-сигнала. После завершения измерений формирователь кода (15) преобразует временные данные в цифровую форму и передаёт их в блок программного управления (9), где фиксируется амплитуда эхо-сигнала (U) и время его прихода (t).

Обработанные данные направляются в модуль обработки сигналов (18). Блок фильтрации (19) устраняет статистические отклонения, определяя усреднённое значение амплитуды сигнала (U) с заданным временем прихода (t) на основе анализа нескольких контрольных точек. Очищенные данные передаются в блок накопления (20), где они накапливаются для дальнейшего анализа и обработки в блоке определения ДН (21). На этом этапе, используя временные характеристики сигнала (t), блок рассчитывает расстояние (r) до отражателя. Скорость ультразвука (c) вводится пользователем через клавиатуру (17), а глубина отражателя задаётся в начальных параметрах системы. На основе данных об амплитуде (U) и глубине отражателя вычисляется угол ввода (α), которому соответствует максимум амплитуды $U(\alpha_0)$.

После завершения анализа блок определения ДН (21) запускает алгоритм обработки, который формирует ДН преобразователей. Полученные результаты

либо отображаются на встроенном экране устройства (16), либо могут быть выведены на внешний монитор через *VGA*-порт (23). Вся структура автоматизированного устройства детально представлена на рисунке 6.3 [380].



а) *б*)

1 – излучатель-приемник; 2 – образец; 3 –направляющая преобразователя; 4 – каретка фиксатора преобразователя; 5 – фиксатор преобразователя; 6 – лимб, соединенный с передачей «винт-гайка», регулирующей перемещение преобразователя; 7 – рейка перемещения фиксатора преобразователя; 8 – основание установки; 9 – устройство обработки

Рисунок 6.3 — Автоматизированное техническое средство определения диаграмм направленности пьезоэлектрических преобразователей: *а*) структурная схема; *б*) устройство [380]

Научная новизна работы заключается в разработке алгоритма определения ДН преобразователя, основанного на одновременном анализе амплитуды и времени прихода эхо-сигналов от произвольных точек поверхности образца. Алгоритм предусматривает перемещение преобразователя по поверхности образца с последующим вычислением угла ввода для построения точной ДН. Важной особенностью разработанного подхода является устранение статистически значимой случайной составляющей в измерениях, что обеспечивает высокую точность и воспроизводимость получаемых данных. Кроме того, проведенные исследования подтвердили согласованность ДН, построенных на основе пространственных огибающих эхо-сигналов от ненаправленных отражателей, с диаграммами, рассчитанными из временных огибающих.

Разработанная система успешно адаптирована для интеграции в состав роботизированного комплекса, что позволяет автоматизировать процесс измерений и анализа. Внедрение алгоритма в роботизированную платформу обеспечивает высокую точность построения ДН, как основной, так и дополнительной плоскостях, в условиях автоматизированного движения преобразователя и способствует расширению применения методики в задачах НК.

6.4.3 Разработка автоматизированного устройства определения индикатрис рассеяния дефектов при ультразвуковом контроле

Согласно методологии, определение формы ИР дефекта осуществляется следующим образом [382]. С использованием ультразвукового дефектоскопа, оснащённого аттенюатором, проводится измерение пространственной огибающей амплитуды эхосигнала $U(x_i)$ в процессе позиционирования преобразователя вдоль поверхности контролируемого объекта. Здесь x_i представляет собой координату точки выхода ультразвукового луча, соответствующую i-й позиции преобразователя в пределах зоны регистрации эхосигнала.

На основании результатов измерений, с учётом известной глубины залегания центра дефекта и расстояния от проекции его положения на поверхность до точки выхода луча, вычисляются углы ввода ультразвуковых волн для каждой точки наблюдения. Далее проводится нормализация измеренной пространственной огибающей $U(x_i)$ с целью определения формы ИР дефекта, представленной в виде нормированной функции $F(x_i)$ [47]. Эта функция, в свою очередь, связана с угловой характеристикой индикатрисы дефекта следующим соотношением (2.53):

$$F(x_i) = \Phi_D(i), \tag{2.53}$$

где $\Phi_D(i)$ – представляет собой индикатрису рассеяния дефекта; $i = \arctan(\frac{x_i}{н})$ – угол ввода ультразвукового луча, вычисляемый для i-й точки сканирования;

H – обозначает глубину залегания дефекта. Коэффициенты затухания ультразвуковых волн в рассматриваемом материале, а также геометрические и физические параметры дефекта могут оказывать существенное влияние на форму индикатрисы, требуя их учёта при интерпретации результатов. Таким образом, предложенный метод позволяет определить угловые характеристики рассеяния ультразвуковых волн на дефекте, что играет важную роль в последующих этапах диагностики.

Метод предполагает использование данных об амплитуде и времени прихода эхо-сигнала, а также угле ввода ультразвука. Сначала по времени прихода эхо-сигнала в точке его максимальной амплитуды определяется глубина залегания дефекта. Затем, зная эту глубину, по времени прихода эхо-сигналов в произвольных точках изделия вычисляются углы ввода ультразвуковых волн и координаты точки выхода луча преобразователя. Далее проводится определение формы ИР дефекта с использованием устройства [383].

Предложенный метод отличается от прототипа следующими особенностями. Во-первых, измерение амплитуды эхо-сигнала от дефекта производится в произвольных точках в пределах диапазона движения преобразователя по поверхности изделия. Во-вторых, одновременно с измерением амплитуды в каждой точке фиксируется время прихода эхо-сигнала. На основе временных данных, в точке, где амплитуда эхо-сигнала достигает своего максимального значения, при известной скорости распространения ультразвуковых волн в материале изделия и заданном номинальном угле ввода преобразователя, вычисляется глубина залегания дефекта (H). Затем, в каждой точке, где произведены измерения, рассчитываются углы ввода ультразвука, а также координаты точки выхода луча преобразователя (x_i).

Завершающим этапом метода является определение формы ИР дефекта, которое осуществляется в устройстве [383]. На рисунке 6.4 приведена схема, иллюстрирующая принципы реализации предложенной методики.

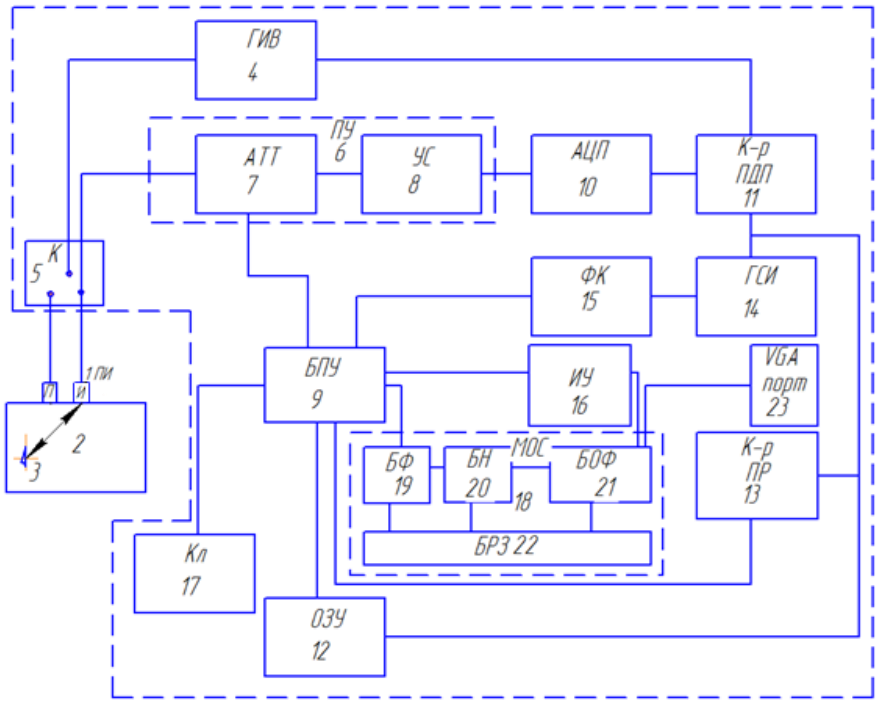


Рисунок 6.4 — Устройство определения формы индикатрис рассеяния дефектов

Разработанное топологическое решение устройства для определения формы индикатрис рассеяния дефектов, встроенная в робототехнический комплекс, обеспечивает повышение автоматизации процессов контроля, улучшение точности измерений и снижение влияния человеческого фактора при УЗК. В основе системы лежит модульно-иерархическая архитектура, позволяющая минимизировать временные затраты на обработку данных и повысить устойчивость к внешним помехам.

Устройство включает в себя следующие функциональные элементы:

1. Генератор высокочастотных импульсов (4) – обеспечивает формирование радиоимпульсов, необходимых для возбуждения ультразвуковых волн в преобразователе.

2. Приемно-излучающие преобразователи (1) – функционируют в режиме излучения и приема, обеспечивая ввод акустической энергии в контролируемый материал и регистрацию отраженных сигналов.

3. Мультиплексированный коммутатор режимов работы (5) – управляет переключением между режимами работы преобразователя (прием, излучение).

4. Приемное устройство (6), включающее:

– аттенюатор (7), обеспечивающий расширение динамического диапазона и цифровое управление ослаблением;

– усилитель сигнала (8) для компенсации ослабления амплитуды эхо-сигналов.

5. Блок программного управления (9) – реализует алгоритмы управления элементами системы, формирует управляющие сигналы и обрабатывает данные измерений.

6. Аналого-цифровой преобразователь (10) – осуществляет преобразование аналоговых эхо-сигналов с усилителя в цифровую форму для последующей обработки.

7. Контроллер прямого доступа к памяти (*DMA*, 11) – управляет передачей данных между подсистемами устройства, формирует сигналы синхронизации и обеспечивает временную согласованность работы модулей устройства.

8. Оперативное запоминающее устройство (12), в котором происходит временное хранение обработанных сигналов.

9. Контроллер прерываний (13), координирующий доступ к общей шине данных между *DMA*-контроллером и блоком программного управления.

10. Модуль обработки сигналов (18), содержащий:

– блок фильтрации (19) – производит устранение статистических искажений и предварительную обработку сигналов;

– блок накопления данных (20) – управляет хранением отфильтрованных данных до их обработки;

– блок определения формы ИР дефектов (21) – выполняет расчет параметров дефекта и отображает результаты;

– блок распределения задач (22) – инициирует выполнение задач по фильтрации, накоплению и расчету данных.

11. Генератор счетных сигналов (14) и формирователь кода (15) служат для измерения временных интервалов между возбуждением преобразователя и регистрации эхо-сигналов.

12. Индикаторное устройство (16) и порт *VGA* (23) – предоставляют визуализацию ИР на встроенном экране или внешнем устройстве.

13. Клавиатура (17) – предназначена для ввода параметров эксперимента (скорость ультразвука, толщина изделия, угол ввода) и управления функциональностью устройства.

Устройство работает так: генератор высокочастотных импульсов (4) создаёт радиосигналы, которые подаются на преобразователь (1). Преобразователь сначала излучает эти сигналы, а затем принимает их обратно. При прохождении акустического сигнала через исследуемую зону дефекта часть энергии отражается обратно к преобразователю. Прием сигнала активируется путем переключения ключа (5), после чего отраженный сигнал поступает в приемное устройство (6). Аттенюатор (7) адаптирует амплитуду сигнала в соответствии с предустановленным диапазоном, а усилитель (8) обеспечивает его фазоамплитудную стабильность.

Сигнал из аналоговой формы преобразуется в цифровую аналого-цифровым преобразователем (10), после чего данные передаются в запоминающее устройство (12) через контроллер (11). В момент старта генератора импульсов (4) запускается генератор счетных сигналов (14), который фиксирует временные интервалы между возбуждением ультразвуковой волны и приемом эхо-сигнала. Полученные данные преобразуются формирователем кода (15) в цифровую форму для последующего анализа.

Модуль обработки сигналов (18) выполняет следующие функции.

1. Первичная фильтрация данных в блоке фильтрации (19) с устранением шумов и аномальных выбросов.

2. Накопление статистически обработанных данных в блоке (20).

3. Расчет параметров дефекта выполняется в блоке (21), включая расчет угла ввода и координат положения дефекта по следующему алгоритму:

– определяется время t_0 прихода сигнала с максимальной амплитудой;

– вычисляется глубина залегания дефекта H;

– рассчитываются значения расстояний r_i до отражателя по (2.54):

$$r_i = \frac{ct_i}{2}, \tag{2.54}$$

где c – скорость ультразвука; t – время прихода сигнала. По известной глубине залегания дефекта определяется нормированная огибающая $\Phi(x_i)$, характеризующая форму.

На индикаторном устройстве (16) в графическом или табличном виде выводятся данные обработки. Для интеграции в более сложные измерительные комплексы предусмотрена возможность вывода данных через порт *VGA* на внешние устройства визуализации.

Интеграция с робототехническим комплексом

В усовершенствованной структуре предусмотрена возможность интеграции устройства с механизированными и роботизированными платформами для автоматического позиционирования преобразователя. Управление движением преобразователя может осуществляться подключением дополнительных интерфейсов связи и драйверов управления сервоприводами через контроллер блока программного управления (9). Это обеспечивает увеличение точности контроля за счет программной компенсации механических отклонений и возможности маршрутизации проверки сложных геометрий объектов.

Таким образом, предложенная конструкция значительно повышает надежность, корректность и производительность УЗК при снижении трудозатрат оператора.

6.4.4 Разработка метода определения шага сканирования при роботизированном ультразвуковом контроле

В статье [384] отмечено, что к 1955 г. стали применяться способы сканирования продольным перемещением преобразователя (впоследствии, *продольное сканирование, l*) и его поперечным перемещением (впоследствии, *поперечное сканирование, t*). Естественно, что эти способы сканирования,

разработанные применительно к контролю сварных соединений, распространяются и на контроль различных объектов, если принимать эти способы в редакции:

– способ сканирования продольным перемещением преобразователей (*l*) – это способ перемещения их в направлении по нормали к плоскости излучения волны;

– способ сканирования поперечным перемещением преобразователей (*t*) – это способ перемещения их в плоскости излучения волны. В статье [384] иллюстрируется применение данных способов при контроле таких сложных по конфигурации объектов, как рельсы. На базе данных способов сканирования впоследствии формируются их комбинации [385, 386]:

– способы сканирования поперечно-продольным;

– продольно-поперечным перемещениями преобразователей.

Предложенная методика определения шага сканирования поперечно-продольным и продольно-поперечным перемещением преобразователей заключается в следующем:

– определяют ДН в основной, дополнительной плоскостях, как описано в [47, 380, 381];

– измеряют расстояние между крайними точками *A* и *B*, в которых ДН пересекает отражатель при максимуме эхо-сигнала в плоскости *XOZ* отрезок *OB* – продольный Δ_{cl} шаг сканирования (рисунок 6.5), в плоскости *YOZ* отрезок *OB* – поперечный Δ_{ct} шаг сканирования (рисунок 6.6).

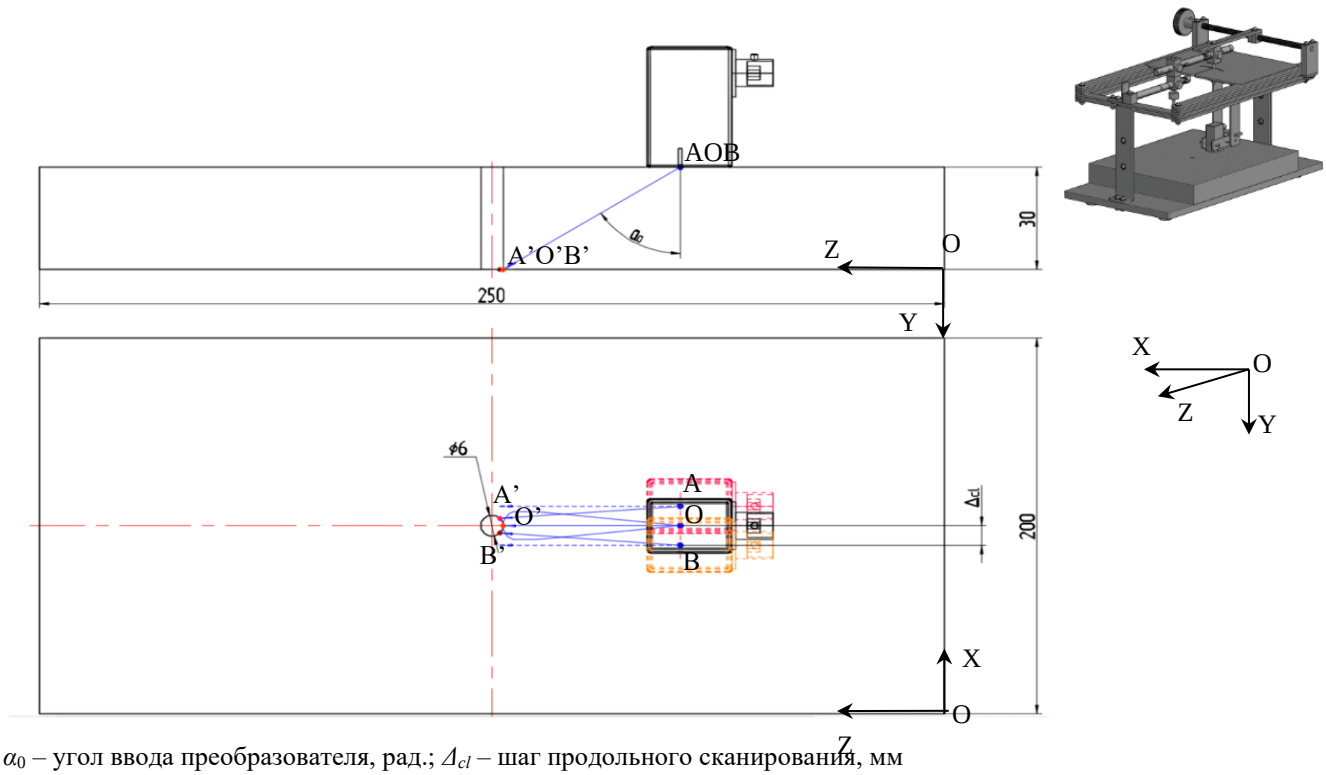
Применение и ограничения.

1. Методика позволяет определить продольно-поперечные и поперечно-продольные шаги сканирования с относительно высокой степенью точности.

2. Применение методики не требует специального опыта и навыка в выборе шага сканирования при УЗК.

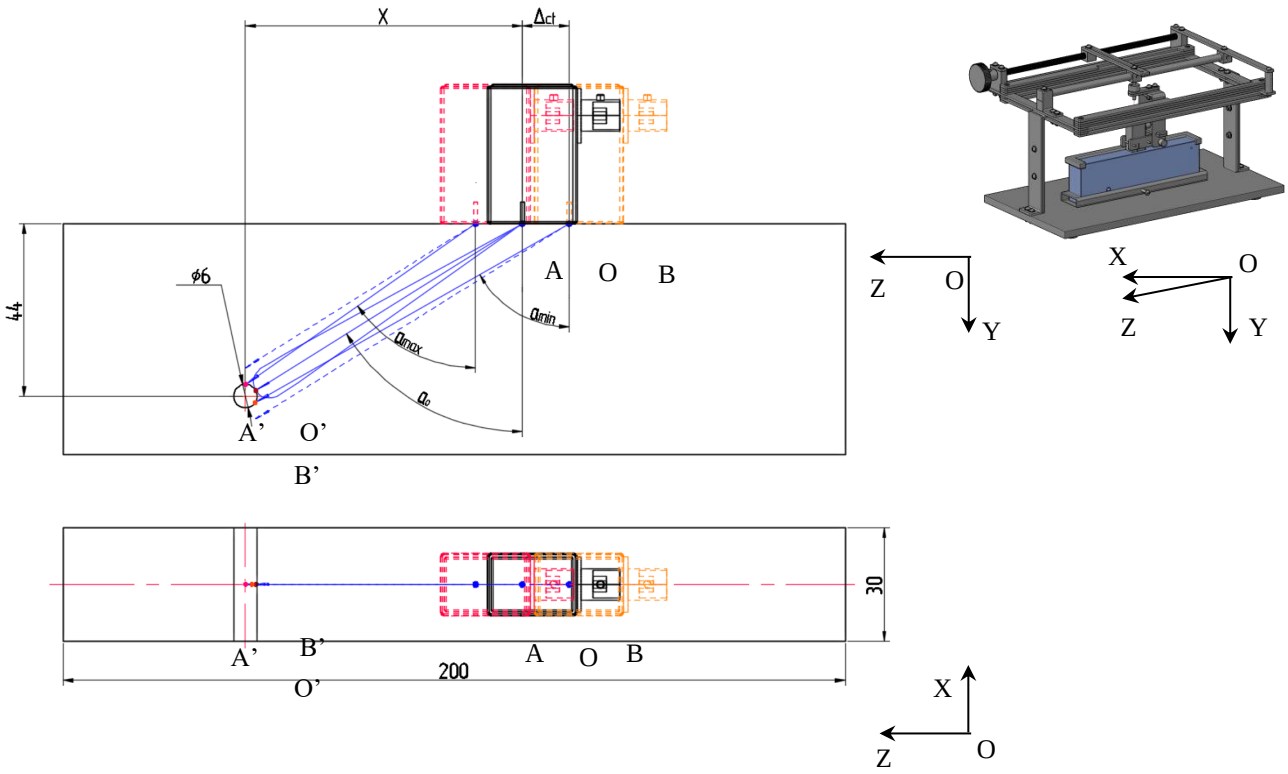
3) Методика применима только к несплошностям, имеющим размеры, удовлетворяющим условию $\lambda \geq b$, где λ – длина волны, b – размер несплошности.

На рисунках 6.5–6.6 представлены схемы определения шага сканирования с помощью способа и устройства определения ДН преобразователей [381].



α_0 – угол ввода преобразователя, рад.; Δ_{cl} – шаг продольного сканирования, мм

Рисунок 6.5 — Схема определения продольного шага сканирования при ультразвуковом контроле



α_0 – угол ввода преобразователя, град.; Δ_{ct} – шаг поперечного сканирования, мм

Рисунок 6.6 — Схема определения поперечного шага сканирования при ультразвуковом контроле

Измерения проводились с помощью роботизированной системы, оснащённой устройством для изучения направленности преобразователей (2,5 МГц). Контроль проводился на стальной плите толщиной 48 мм.

Робот-манипулятор перемещает преобразователь в начальную точку на образце так, чтобы амплитуда отраженного сигнала была максимальной. Угол ввода луча в этом положении зафиксировали по шкале и обозначили как угол α. Затем роботизированная система перемещает преобразователь в стороны (влево и вправо) по заданной траектории, чтобы определить минимальный и максимальный углы (α_{min} и α_{max}), при которых сигнал всё ещё оставался достаточно сильным для измерений. Эти данные используются для дальнейшего анализа и настройки параметров сканирования. Высокая повторяемость результатов обеспечивается за счет автоматизации усилия прижима преобразователя к объекту контроля.

На основе проведенных экспериментов, с использованием различных режимов перемещения преобразователей, были выделены эффективные стратегии сканирования, включающие комбинации поперечно-продольного и продольно-поперечного перемещения. Применение предложенных методик автоматизированного определения оптимального шага сканирования с использованием роботизированной системы способно значительно повысить производительность труда и обеспечить высокую точность УЗК.

6.4.5 Разработка технологии роботизированного комбинированного контроля деталей и узлов локомотивов при технологической подготовке производства

Повышение информативности технологии ремонта при ТПП участков НК при ТОиР за счет роботизированного комбинированного контроля, с использованием автоматической обработки данных в режиме реального времени. Роботизированный комплекс состоит из следующих ключевых элементов – механическая платформа (рисунок 6.6).

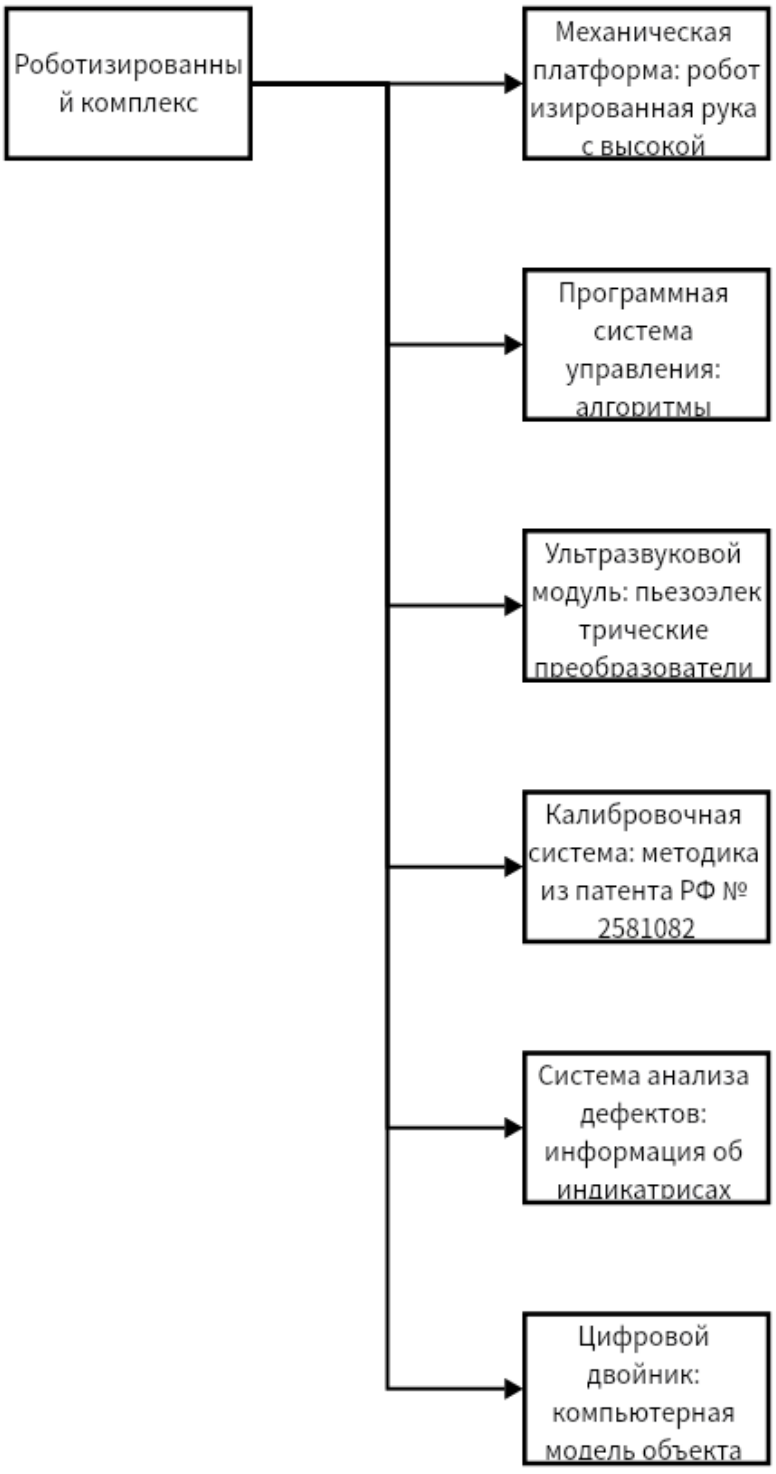


Рисунок 6.6 — Схема роботизированного комплекса

Разрабатываемая методика роботизированного УЗК обеспечивает построение ЦД объектов, автоматизацию процессов калибровки оборудования, адаптивное сканирование и высокоточное выявление дефектов в режиме реального времени (рисунок 6.7).

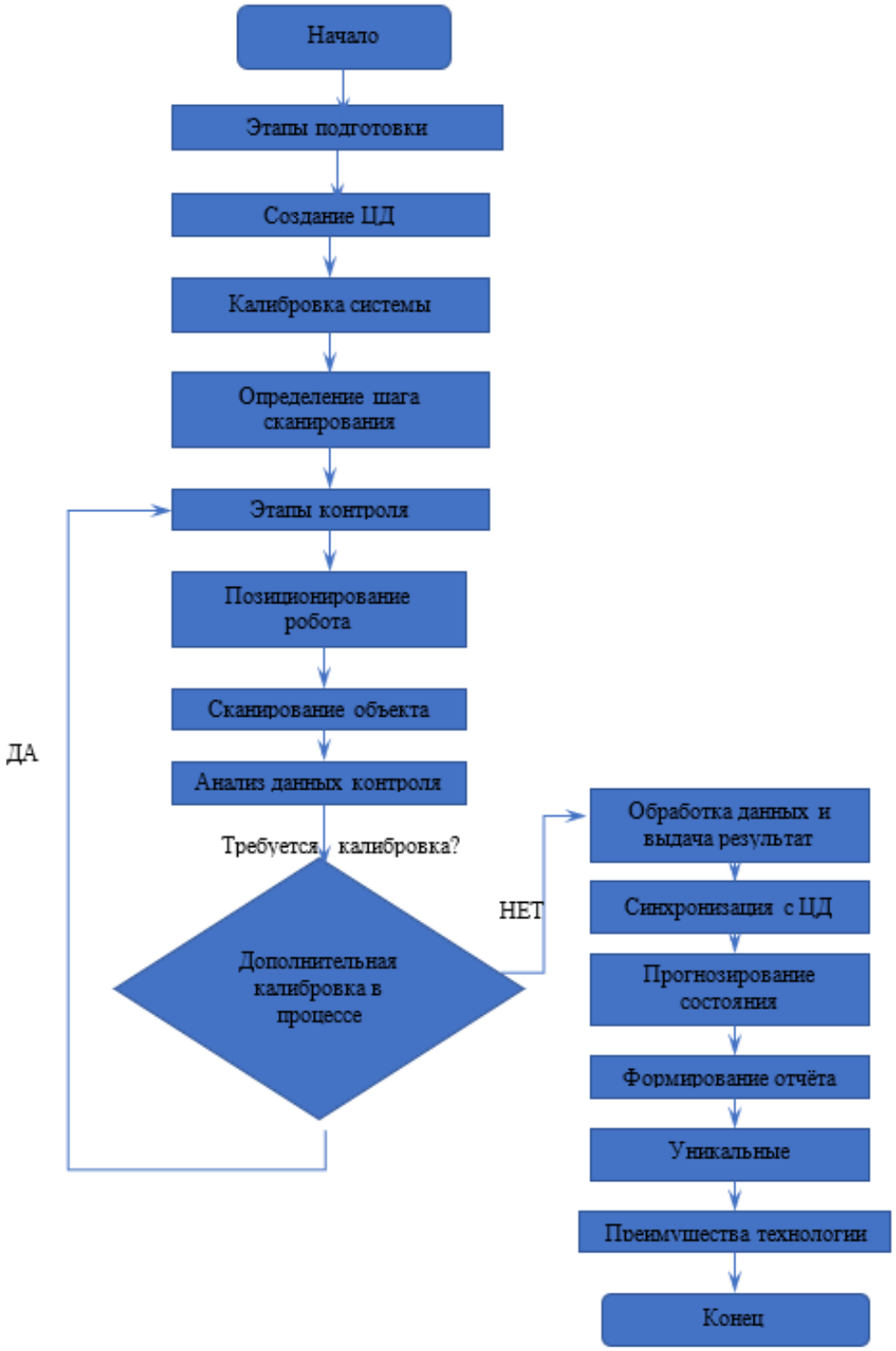


Рисунок 6.7 — Блок-схема методики роботизированного контроля при ремонте узла люлечного подвешивания локомотив

Ключевая цель технологии — расширить информативность контроля за счет применения инновационных подходов, таких как нейронные сети, ИР и прогнозирование состояния объектов на основе собранных данных и др. Все это не

только повышает точность диагностики, но и сокращает риски отказов за счёт своевременного выявления и анализа дефектов, а также оптимизации планирования ремонтных работ.

Рассмотрим основные этапы подготовки.

1. Создание ЦД. На основе КД, 3D-сканирования или предварительных данных создаётся ЦД объекта контроля (рисунок 6.7).

Рисунок 6.8. — Схема создания цифрового двойника

Он включает:

– структурные параметры (толщина стенок, тип материала, технология ремонта и др.);

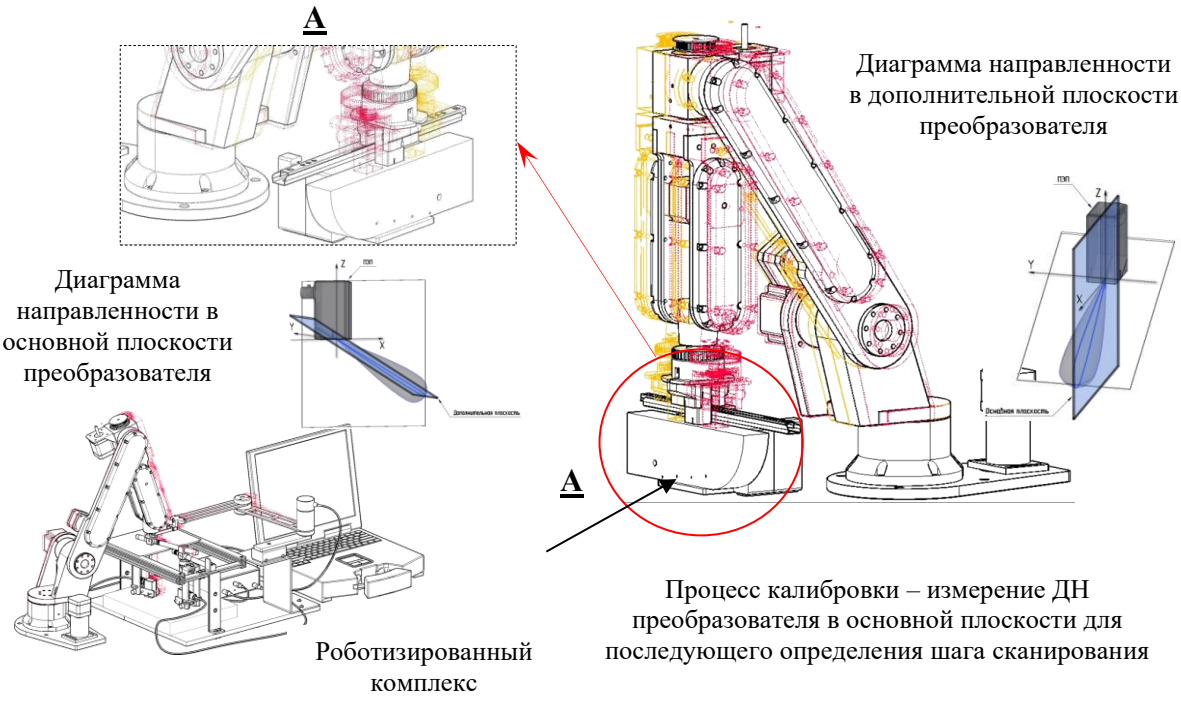
– зоны предполагаемых наличия дефектов, определённые статистически на основании прошлого опыта или предиктивного анализа.

2. Калибровка системы (рисунок 6.9): в соответствии с патентом РФ № 2581082, проводится калибровка преобразователей на эталонных образцах (или калибровочных блоках) с учетом таких параметров, как:

– чувствительность преобразователей;

– ширина ДН в основной и дополнительной плоскостях;

– параметры фокусировки сигнала. Этап калибровки обеспечивает минимизацию ошибок в амплитудных и временных характеристиках зарегистрированных сигналов при истирании контактирующей поверхности датчика [387–389].



а) *б*)

Жёлтым и красным цветами показан направления перемещения ПЭП при роботизированном перемещении

Рисунок 6.9 — Схема калибровки роботизированной системы *а*) в основной плоскости *б*) в дополнительной плоскости

3. Определение шага сканирования (по предложенному методу): на основании геометрических характеристик объекта и данных ЦД автоматически рассчитывается шаг сканирования.

Алгоритмы, реализующие технологии нейронных сетей, оптимизируют шаг для двух типов движения преобразователей:

– поперечно-продольное движение: используется для больших плоских и линейных поверхностей;

– продольно-поперечное движение: применяется на сложных геометрических участках (например, изогнутые поверхности или зоны сварных швов).

4. Этап контроля: процедура контроля включает в себя следующие шаги:

4.1. Позиционирование роботизированного манипулятора:

– роботизированная система перемещает ПЭП к точке старта, рассчитанной системой ЦД. Контроль движения осуществляется с точностью до долей миллиметра;

– углы ввода луча регулируются автоматически, что позволяет учитывать угол наклона обрабатываемой поверхности.

4.2. Сканирование объекта (роботизированный манипулятор перемещает преобразователи по заданной траектории с периодическим снятием данных):

– данные передаются в реальном времени в систему обработки, где формируются амплитудно-временные диаграммы и ИР;

– при обнаружении аномальной области (дефекта), система автоматически замедляет движение в этой зоне для повышения разрешения исследования.

4.3. Анализ данных контроля:

– для каждой обнаруженной аномалии определяется индикатриса рассеяния, как указано в патенте № 2581083;

– используя метод нейронных сетей, система автоматически классифицирует тип дефекта (поры, трещины, расслоения и др.), его размеры, форму и глубину;

– в зависимости от классификации дефекта, система может менять режим сканирования для уточнения данных;

4.4. Дополнительная калибровка в процессе контроля: если параметры акустического сигнала изменяются (например, из-за температурных воздействий или особенностей поверхности), система автоматически выполняет рекалибровку преобразователей.

5. Обработка данных и выдача результатов: данные контрольной обработки проходят следующие этапы.

5.1. Синхронизация с ЦД: все полученные данные накладываются на цифровую модель объекта. Это позволяет визуализировать места дефектов на геометрической схеме с высокой точностью.

5.2. Прогнозирование состояния: с использованием нейронных сетей и исторических данных система прогнозирует развитие обнаруженных дефектов. Учитываются эксплуатационные нагрузки и потенциальный риск разрушения.

5.3. Формирование отчета: на финальном этапе формируется детализированный отчет, который включает:

– описание объектов контроля (ремонта);

– зоны обнаруженных дефектов с их координатами, размерами и физическими характеристиками;

– рекомендации по ремонту/обслуживанию объекта, включая сроки и методы устранения повреждений.

6. Уникальные особенности:

– интеграция информации об индикатрисах рассеяния: позволяет детализировать характеристики дефектов с учетом направленности их отражения;

– система самообучения: реализация нейронных сетей позволяет алгоритмам улучшать свою точность при накоплении новых данных об объектах контроля;

– поддержка ЦД (значительно повышает точность контроля в сложных объектах и обеспечивает надежное планирование ТОиР при ТПП).

Настоящий документ описывает этапы подготовки к роботизированному УЗК, включая создание ЦД, калибровку сенсоров и выбор оптимального шага сканирования. В дальнейшем рассмотрены основные этапы контроля, анализ данных и выдача результатов, а также уникальные особенности и преимущества предлагаемой технологии, которые выделяют ее среди традиционных методов.

Данная технология сочетает достижения в области акустического контроля, анализа данных и автоматизации процессов. Она ориентирована на широкое применение для контроля изделий различных отраслей промышленности, включая машиностроение, энергетику и нефтегазовую инфраструктуру, обеспечивая повышение точности диагностики и эффективности процессов ТОиР при ТПП.

6.5 Цифровая методология прогнозирования, оценки и оптимизации технического состояния деталей и узлов локомотивов с использованием нейронных сетей, цифровых двойников и автоматизированных систем контроля

Современное развитие железнодорожного транспорта требует внедрения цифровых технологий для мониторинга, диагностики и управления техническим состоянием локомотивов.

ЦД создают виртуальные копии объектов, обеспечивая контроль и анализ износа, нейронные сети выявляют скрытые закономерности и предсказывают отказы, а автоматизированные системы улучшают точность и оперативность диагностики. Такая методология объединяет современные технологии обработки данных и моделирования, формируя комплексный подход для повышения надежности и безопасности железнодорожного транспорта. Технология ориентирована на комплексную оценку состояния локомотивов, с целью увеличения их эксплуатационной надежности и продления срока службы. Она базируется на интеграции новейших цифровых инструментов, таких как нейронные сети, ЦД и роботизированные системы контроля. Основные этапы и принципы работы технологии заключаются в следующем (рисунок 6.10).

Методы оценки состояния и прогнозирования износа деталей и узлов локомотивов.

1. Современные технологии анализа и прогнозирования. 1.1. Применение нейронных сетей. Модели искусственного интеллекта обрабатывают большие массивы данных, связанных с эксплуатацией и состоянием узлов локомотива, что позволяет обнаруживать даже небольшие отклонения от нормы и ранние признаки износа или деградации. 1.2. Диагностика дефектов по индикатрисам рассеяния сигналов. С помощью высокоточных методов обработки сигналов, распределённых по поверхностным и внутренним слоям элементов, достигается детальная локализация дефектов. Это позволяет не только выявлять повреждения, но и с высокой точностью определять их тип и характер развития.

2. Роботизированные системы контроля и анализа. 2.1. Интеллектуальная обработка данных и автоматическая калибровка. Используются алгоритмы искусственного интеллекта, обеспечивающие автоматическую настройку оборудования, корректировку параметров контроля и адаптацию методов калибровки для повышения точности диагностики. 2.2. Создание ЦД. Разрабатываются виртуальные модели (ЦД) узлов и деталей, позволяющие симулировать эксплуатационные нагрузки, прогнозировать развитие существующих дефектов и планировать оптимальные стратегии технического обслуживания и ремонта. 2.3. Адаптивный подход к сканированию. Роботизированные комплексы выбирают шаг и методику контроля в зависимости от выявленных проблем. Нейронные сети обеспечивают обработку данных в режиме реального времени, предоставляя аналитические выводы и рекомендации для проведения оперативного технического обслуживания.

3. Прогрессивные технологии ремонта локомотивных узлов. 3.1. Интеграция ЦД в ремонтный процесс позволяет предварительно тестировать вариативные стратегии ремонта при ТПП, что помогает избежать ошибок и сократить затраты времени на восстановление функциональности оборудования. 3.2. Использование прогнозных моделей. Системы на базе глубокого обучения оценивают критичность выявленных дефектов, позволяя классифицировать их на те, которые требуют немедленного вмешательства, и те, которые могут быть устранены в рамках плановых работ. 3.3. Адаптивные реакции на внешние воздействия. Применение данных ЦД позволяет ремонтным процессам автоматически подстраиваться под текущее состояние деталей, обеспечивая индивидуальный подход к каждому узлу. 3.4. Оптимизация ремонтных процессов. На основе анализов, выполняемых искусственным интеллектом, прогнозируется необходимый объём ремонтных работ. Это упрощает процесс планирования, позволяет сократить время на замену или восстановление деталей, а также повысить общую эффективность технического обслуживания.

Комплексное использование перечисленных технологий не только повышает надёжность локомотивов, но и снижает их эксплуатационные издержки, минимизируя вероятность внеплановых простоев.

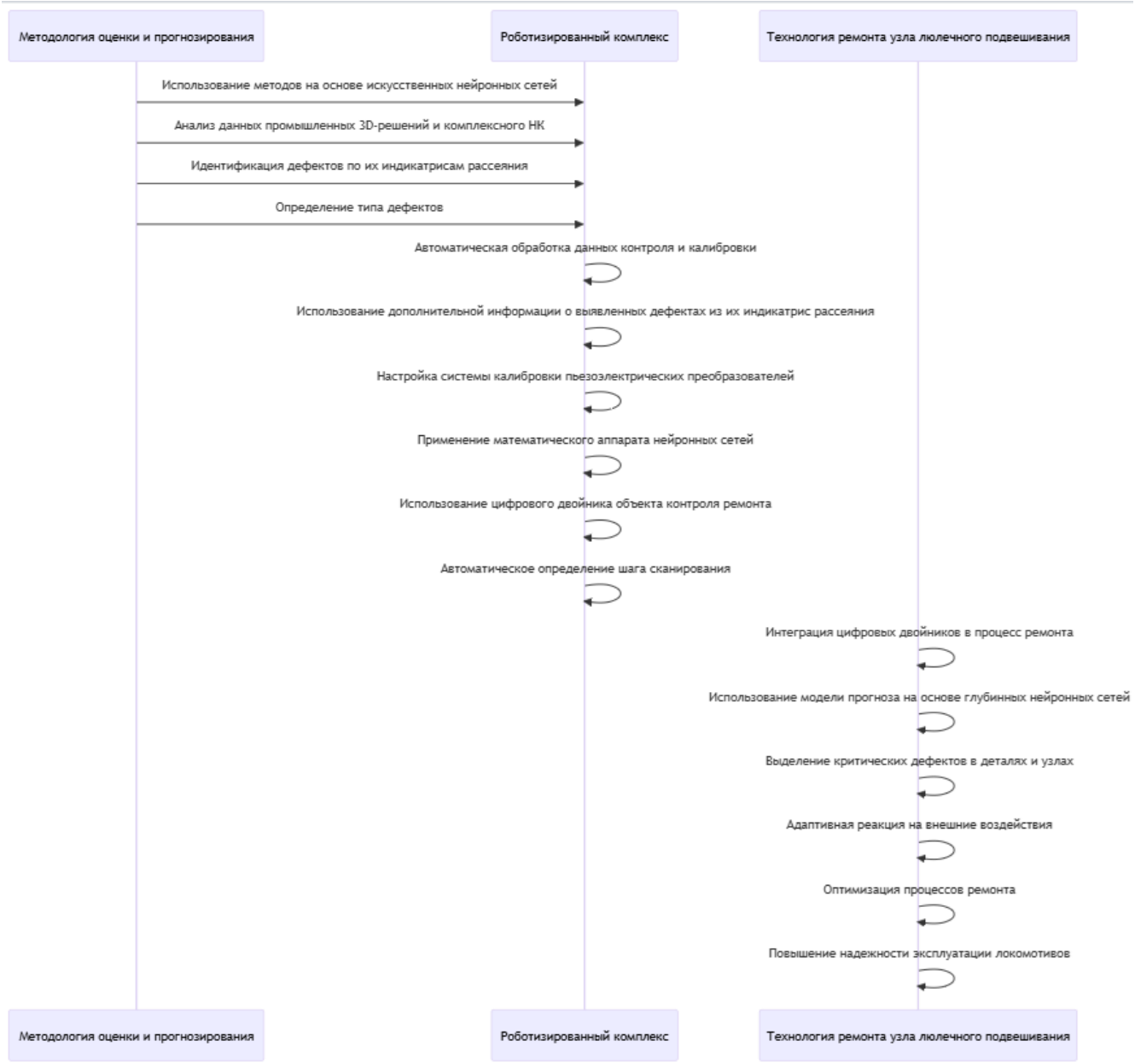


Рисунок 6.10 — Цифровая методология прогнозирования, оценки и оптимизации технического состояния деталей и узлов локомотивов с использованием нейронных сетей, цифровых двойников и роботизированных систем контроля

Данная технология, объединяя методы искусственного интеллекта, цифрового моделирования и роботизированного контроля, позволяет проводить высокоточное диагностирование, прогнозировать развитие дефектов и внедрять

адаптивные стратегии ремонта. Это обеспечивает увеличение межремонтных интервалов, снижение эксплуатационных затрат и повышение общей надежности локомотивов.

6.6 Методика расчёта повышения эффективности технологии ремонта на основе цифровой методологии прогнозирования

В предлагаемой системе эффективность можно моделировать математически:

1. E_{base} – текущая эффективность (без применения цифровой методологии);
2. E_{new} – прогнозируемая эффективность с учетом внедрения цифровой методологии;
3. T_{base} – время, затрачиваемое на ремонт/диагностику в текущей системе;
4. T_{new} – время, требуемое системой с цифровыми инструментами;
5. C_{base} – текущие затраты (материальные и трудовые) на ремонт;
6. C_{new} – затраты с использованием новой технологии;
7. A_{base} – текущая точность диагностики дефектов (%);
8. A_{new} – точность диагностики с использованием цифровых решений (%).

Формула (2.55) для расчёта повышения эффективности:

$$E_{improvement} = \frac{(T_{base}-T_{new})+(C_{base}-C_{new})+(A_{new}-A_{base})}{T_{base}+C_{base}+A_{base}} * 100\%, \quad (2.55)$$

Параметры для оценки на основе представленной схемы.

1. Сокращение времени выполнения диагностики и ремонта:

– автоматическая обработка данных;

– использование ЦД и роботизированного комплекса позволяет снизить трудоемкость (предположим, T_{new}= = 0.7 T_{base}).

2. Снижение затрат ресурсов: - оптимизация процесса ремонта, обнаружение неисправностей без разборки деталей, повышение надежности работы локомотивов. Для оценки можно предположить, что C_{new} = 0.8 C_{base}.

3. Увеличение точности диагностики: цифровые методологии (глубокие нейронные сети, индикаторы рассеяния и др.) обеспечивают рост точности до A_{new} = 95 %, в отличие от существующих A_{base} = 85 %.

Рассчитаем $E_{improvement}$:

1. T_{base} = 10 часов, T_{new}= 7 часов.
2. C_{base}= 100 тыс. рублей, C_{new}= 80 тыс. рублей.
3. A_{base} = 85 % , A_{new} = 95 %.

Подставляем:

$$E_{improvement} = (10 - 7) + (100 - 80) + (95 - 85) /(10 + 100 + 85)*100\ \%,$$

$$E_{improvement} = (3 + 20 + 10) / 95 *100\ \% = 33 / 195 * 100\ \% = 16.92\ \%.$$

Внедрение цифровой методологии обеспечивает повышение эффективности на 16.92 %. Это обусловлено значительным сокращением времени и затрат, а также ростом точности диагностики и качества ремонта. Для более точного расчёта в реальных условиях потребуется учитывать дополнительные параметры, такие как износ деталей, сложность оборудования и частота сбоев.

6.7 Выводы по разделу 6

Шестой раздел диссертации посвящен исследованию внедрения современных 3D-технологий и видов (методов) НК в процессы ремонтного производства. Особое внимание уделено анализу роботизированных систем, что позволило выявить их потенциал в повышении точности и эффективности технологических операций. Подчёркнуты преимущества роботов-манипуляторов, в их числе адаптивность, универсальность и высокая операционная точность. Также сформулированы принципы применения геометрических методов в задачах управления такими системами.

7 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА УЗЛА ЛЮЛЕЧНОГО ПОДВЕШИВАНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗОВ СЕРИИ ВЛ80 С УЧЕТОМ ВНЕДРЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА

Проанализировав данные о неполадках и ремонтах механических узлов грузовых магистральных электровозов ВЛ80 на базе эксплуатационной документации СЛД, Вологда за 2017–2019 годы, выявлено увеличение случаев неисправностей узла люлечного подвешивания. При пробеге в диапазоне от 100 до 200 тыс. км люлечное подвешивание выходит из строя из-за значительного износа детали втулки (8ТН.294.018), что провоцирует необратимое повреждение стержня подвешивания. Основной проблемой диагностирования является отсутствие регламентации ревизии втулки в рамках текущего ремонта первого объёма (ТР-1), что не позволяет своевременно обнаруживать критическое состояние узла без выполнения подъёмки кузова. Для подобных операций электровозы необходимо переводить на специальную позицию депо с домкратным оборудованием грузоподъёмностью (например, УД-40), что приводит к усложнению логистики и росту временных затрат. Перед подъёмом кузова выполняются операции по расцепке секций электровоза, подготовительные работы с межсекционными соединениями и фиксацией тележек. Далее осуществляется снятие нагрузок с подвешивания, разбор узла и его дефектоскопический контроль.

Среднее время, необходимое для проведения такого ремонта, превышает нормативные 18 часов более чем в два раза, что влечёт сверхнормативный простой локомотива, снижение КГЭ и экономические санкции от ОАО «РЖД». Дополнительно сложности создают высокие трудозатраты: на каждую ревизию уходит около 28 человеко-часов. Учитывая ежегодную выбраковку стержней (до 55 штук), ежегодные затраты на ремонт оцениваются в 3,5 млн рублей.

Ремонт и ревизия в рамках ТР-2 (200 ± 20% тыс. км) включает обязательный демонтаж тележек с предварительными подготовительными мерами и детальным

осмотром состояния деталей узла. В случае превышения износов или разрушения металлических частей, таких как стержень подвешивания (стоимость 18– 24 тыс. руб.) или втулки (400–600 руб.), производится замена компонентов. Это дополнительно увеличивает стоимость ремонта, особенно при масштабах депо, ремонтирующего до 102 локомотивов ежемесячно. Указанные недостатки конструкции определяют необходимость проведения модернизации узла с применением улучшенных технических решений. Основной целью является повышение ресурса и надежности люлечного подвешивания для исключения брака и минимизации эксплуатационных затрат.

Далее рассмотрим разработку технологического процесса по ревизии люлечного подвешивания без разборки, в котором применены втулки, изготовленные из полиамида. Новая технология предусматривает экономию 0,5 чел./час. при отсутствии необходимости выпрессовки втулок из стакана, в случае отсутствия видимых дефектов, что позволит сократить трудозатраты на ремонте.

7.1 Анализ технологического процесса ремонта люлечного подвешивания электровоза ВЛ80

Для выполнения ревизии люлечного подвешивания электровозов ВЛ80 в/и прошедших усовершенствование по проекту Проектно-конструкторского бюро по локомотивному хозяйству (ПКБТЛ) Э2341.00.00 ТО «Усовершенствование люлечного подвешивания» в рамках которого в конструкции узла вместо втулок 88Э.1914.01.02 и Э.1735.01.03 изготовленных из марганцовистой стали 110Г13Л ГОСТ 977–88 применены втулки, изготовленные из полиамида ПА6-210/310 ОСТ.6.06.С9–93, был разработан ТП с учетом применимых в рамках проекта конструктивных изменений и соблюдением требований инструкции ПКБ ЦТ.25.0130 «Техническое обслуживание и ремонт люлечного подвешивания электровозов».

Руководство по текущему ремонту и техническому обслуживанию электровозов ВЛ80 № ВЛ80 ИО – 2004 г. регламентирует ревизию люлечного подвешивания с заменой или ремонтом неисправных элементов или деталей со сверхнормативным износом на каждом текущем ремонте второго объёма (ТР-2) при достижении электровоза пробега 200 ± 20 % тыс. км. и на текущем ремонте третьего объёма (ТР-3) при достижении пробега 400 ± 10 % тыс. км. Данные виды ремонта предусматривают выполнение подъёма кузова электровоза с выкаткой тележек из-под кузова. Перед выполнением ревизии люлечного подвешивания секции электровоза расцепляют и перемещают на позицию ремонта.

Выполняется проверка наличия на деталях бирок, меток спаренности, осмотром устанавливается отсутствие ослабления посадки втулок, состояние резьбы стержней. Записывается высота пружин в нагруженном состоянии для выполнения операций регулировки при сборке. На всех подвесках отсоединяются предохранительные троса от рамы кузова; отворачиваются гайки крепящие балансиры к кронштейнам рамы кузова.

После отсоединения кузова от тележки выполняется подъёмка кузова домкратами на 140 мм для разгрузки люлечного подвешивания, после чего под кузов подводят стационарные опоры и устанавливают на них кузов для возможности проведения дальнейших работ снятию и ремонту люлечного подвешивания. Отсоединённые от кузова тележки транспортируются к месту их разборки. На позиции разборки с тележки снимают ограничительные горизонтальные упоры, а с кузова открепляют основания горизонтального упора. Стержни с пружинами зачаливаются в соответствии с схемой строповки и вынимаются из кронштейнов тележки. Отворачиваются гайки с хвостовиков стержней, снимаются опоры, прокладки, балансиры. Пружины с прокладками не распариваются. Стаканы с втулками спрессовываются со стержней. Детали люлечного подвешивания, опоры и ограничительные упоры перемещают на позицию мойки. Очистка деталей выполняется в моечной машине с применением моющего средства «Темп-100» ТУ38-40343-79 с концентрацией раствора от

10– 20 г/дм^3 при температуре от 60–80 °С в течение 5–15 мин. Допускается применение других моющих средств, рекомендованных к применению ОАО «РЖД» и обеспечивающих качество очистки. После очистки в моющем растворе детали промываются в воде и сушатся сжатым воздухом. Очищенные детали люлечного подвешивания осматриваются на наличие дефектов и сверхнормативного износа (рисунок 7.1).

Рисунок 7.1. — Схема осмотра деталей люлечного подвешивания на наличие дефектов и сверхнормативного износа

1. Осматриваются стержни люлечного подвешивания (Э.1735.00.03) и втулки (Э1735.01.03) при этом контролируется (рисунок 7.2):

– несоответствие размеров стержня и втулок требованиям чертежа;

– отклонение прямолинейности стержня по длине не более 0,5 мм;

– наличие износа стержня в области верхнего шарнира с глубиной более 3 мм;

– износ резьбы стержня свыше 1 мм, отсутствие повреждений резьбы стержня и гайки;

– увеличение суммарного зазора между втулками стержня и стаканом менее 0,23 мм или более 0,69 мм (при отклонении этого параметра от нормы втулки подлежат замене);

– наличие дефектов резьбы на стержнях, подтверждённых магнитопорошковым или ультразвуковым видами (методами) контроля;

– наличие дефектов на открытых частей стержней, подтверждённых магнитопорошковым или ультразвуковым видами (методами) контроля;

– наличие на втулках винтовой риски глубиной более 0,25 мм;

– наличие вмятин, трещин на поверхности втулок;

– предельный износ втулок, диаметр втулки 104,76–104,41 мм.

Рисунок 7.2 — Осмотр стержня люлечного подвешивания (Э.1735.00.03) и втулки

2. Осматриваются гайки (Э.1735.00.01) при этом контролируется:

– износ резьбы по диаметру более 1 мм;

– наличие механических повреждений.

3. Осматриваются шайбы (8ТН.952.139) при этом контролируется:

– наличие трещин, износа опорных поверхностей более 2 мм шайбы;

– наличие износа, сколов, трещин прокладок.

4. Осматриваются кольца (Э1735.03.02) и прокладки (Э1735.04.00) при этом контролируется (рисунок 7.3):

– наличие трещин в сварных швах прокладки с кольцом;

– сокращение радиуса впадин в прокладках до значения менее 18 мм (норма составляет 20–21 мм);

– увеличение высоты впадин в прокладках свыше 16,5 мм (норма – 12±1 мм);

– износ кольца прокладки в точках контакта с выступами опоры глубиной более 4 мм;

– износ рабочих поверхностей прокладок более чем на 0,5 мм;

– зазор между прокладкой и сопряжённой с ней опорой должен быть не менее 10 мм.

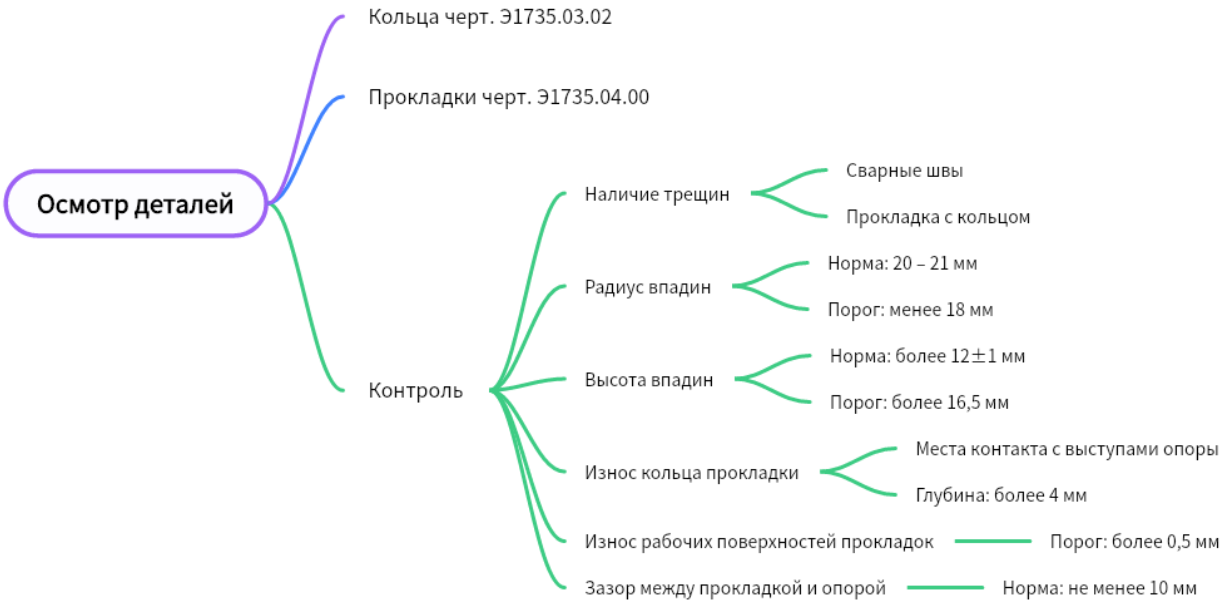


Рисунок 7.3. — Проверка состояния кольца (Э1735.03.02) и прокладки (Э1735.04.00)

5. Проводится осмотр опор (Э1735.00.02) и (Э1735.08.00), при котором проверяется следующее:

– отсутствие трещин и сколов;

– износ опорной поверхности, не превышающий 0,5 мм;

– зазор между опорой и прокладкой в собранном виде, который не должен превышать 10 мм.

6. Осматриваются стакан (Э1735.02.00) и втулка (Э1914.01.02) при этом контролируется:

– отсутствие трещин в трубе стакана и сварном шве;

– отсутствие выработки на наружной поверхности трубы стакана более 0,5 мм;

– отсутствие механических повреждений втулки;

– не превышение износа опорной поверхности пружины более 1 мм.

7. Осматриваются балансиры (5ТН.232.128) при этом контролируется:

– отсутствие трещин, сколов, изломов в корпусе;

– отсутствие отклонения перпендикулярности (более 4 мм по высоте пружины) при установке опорного витка на поверочную плиту.

8. Осматриваются пружины 8ТН.281.319 при этом контролируется:

– высота пружины в свободном состоянии должна соответствовать 372–387 мм;

– высота пружины в комплекте с регулировочными прокладками высотой до 15 мм под тарированной нагрузкой 68,7 кН должна соответствовать размеру 309–311 мм;

– разница под статической нагрузкой пружин одного комплекта не должна превышать более 2 мм.

9. Осматриваются кронштейны рамы тележки (8ТН.121.235) и кронштейн кузова (8ТН.121.238) при этом контролируется:

– отсутствие изломов, трещин в кронштейнах;

– отсутствие в кронштейнах рамы тележки износа в поперечном сечении более 10%, трещин в сварном шве, износ отверстия диаметром 130 мм под стержень более 6 мм на диаметр.

10. Осматриваются горизонтальные упоры (5ТН.270.056) при этом контролируется (рисунок 7.4):

– отсутствие износа вкладыша крышки упора на кузове более 2 мм;

– отсутствие износа накладок на раме тележки более 1 мм;

– отсутствие трещин на крышке упора;

– отсутствие износа отверстий в крышке упора под шпильки боле 1 мм;

– отсутствие ослабления посадки втулок в крышке и стакане;

– отсутствие износа более 5 мм втулки по диаметру 130 мм;

– отсутствие трещин и сколов пружины;

– высота пружины в свободном состоянии не должна быть менее 99 мм.

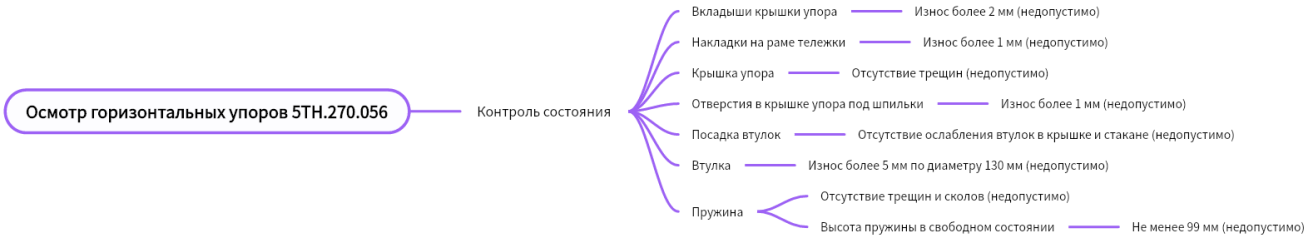


Рисунок 7.4. – Осмотр горизонтальных упоров (5ТН.270.056)

11. Осматриваются вертикальные упоры (5.ТН.270.048) при этом контролируется:

– отсутствие механических повреждений (вмятин, потёртостей на поверхности крышки глубиной более 2 мм);

– отсутствие износа (поверхности крышки упора более 2 мм);

– отсутствие износа мест под накладки на раме тележки (более 3 мм).

Детали с наличием дефектов и сверхнормативного износа ремонтируются в соответствии с требованиями восстановительного ремонта, перечисленными в данном ТП, как правило сваркой наплавкой с последующей механической обработкой, или заменяются на новые.

Основными узлами, которые определяют надежность люлечного подвешивания, являются стакан и стержень, так как они наиболее подвержены

динамическим ударным нагрузкам, а упругие стержни, установленные в узле люлечного подвешивания электровоза ВЛ80С, подвержены знакопеременному изгибу и кручению. В связи с этим они разрушаются в шейке в связи с естественным износом или развитием микротрещин в структуре металла деталей.

Поэтому для более тщательного контроля стержня и стакана они подвергаются НК. Магнитной дефектоскопией проверяется сварной шов приварки фланца к трубе стакана (Э1735.02.00), трещины в сварном шве не допускаются, также выполняется контроль наружных дефектов стержня (Э.1735.00.03) при помощи магнитного или вихретокового методов НК, а внутренних дефектов при помощи УЗК, при этом допускается контроль стержня без съёма годных втулок, с обязательным контролем на отсутствие трещин поверхности под втулками ультразвуковым дефектоскопом. Дефекты, обнаруженные в пределах чувствительности вида (метода) УЗК не допускаются.

7.2 Адаптивная технология ремонта узла люлечного подвешивания локомотивов с интеграцией цифровых двойников и прогностических моделей на основе глубинных нейронных сетей для повышения надежности и качества эксплуатации

Важно отметить, что при сохранении исправного состояния втулок стержня и стакана, за счёт конструкционных усовершенствований в рамках проекта Э2341.00.00 ТО, ТП ревизии значительно упрощается, исключаются некоторые операции (таблица 7.1).

Оптимизация конструкции люлечного подвешивания электровоза ВЛ80С имеет существенное значение как с точки зрения повышения эффективности технической подготовки производства, надежности эксплуатации ПС, так и с точки зрения повышения информативности самого ТП ремонта участков НК и экономической эффективности в целом. В данном контексте акцептируется внимание на повышении эффективности ТПП при ремонте ТПС путём повышения информативности ТП ремонта участков НК, связанном с усовершенствованием

технологии ремонта (контроля) в рамках мероприятий, предусмотренных для проведения технического обслуживания второго уровня (ТР-2).

Таблица 7.1 – Анализ предложенного ТП ревизии

№	Операция	Трудоёмкость, чел/ час
Стержень Э.1735.00.03		
1	Нагреть втулки стержня до температуры 180 °С и снять втулки со стержня	0,16
2	Зачистить на токарном станке посадочную поверхность стержня под втулки	0,1
3	Провести НК открытых частей стержня методом магнитной или вихретоковой дефектоскопии	0,25
4	Провести механическую обработку заготовки новой втулки	0,42
5	Надеть втулку на стержень	0,22
6	Провести чистовую токарную обработку стержня с надетыми втулками	0,35
7	Осмотреть стержень с надетыми втулками (контроль размеров)	0,06
	Итого:	**1,56**
Стакан Э1735.02.00		
1	Подрезать сварные швы втулок стакана с двух сторон	0,15
2	Подогреть стакан о температуры 180 °С, спрессовать втулку	0,16
3	Проверить состояние опорных поверхностей стакана под запрессовку новой втулки	0,06
4	Провести механическую токарную обработку заготовки новой втулки согласно чертежу	0,25
5	Запрессовать втулку в стакан	0,2
6	Приварить торцы втулки к стакану	0,08
7	Провести чистовую обработку внутренней поверхности втулки в сборе со стаканом до чертёжного размера	0,22
	Итого:	**1,12**
	Общая трудоёмкость на замену втулок на одной подвеске	**2,68**
	Общая трудоёмкость на электровозе (16 подвесок)	**42,88**
	Расходы на оплату труда исходя из среднего разряда выполняемых работ 4-й, с оплатой 66,87 руб./ч.	**2867 рублей**

Ключевым преимуществом данного усовершенствования является исключение операций по замене втулок стержней (Э.1735.00.03) и стакана (Э1735.02.00), что, в свою очередь, приводит к достоверному снижению трудоёмкости ремонтного процесса. Конкретно, разрабатываемая оптимизация позволяет сократить время, затрачиваемое на выполнение операций, на 2,68 человеко-часа на один узел люлечного подвешивания. Учитывая, что в конструкции электровоза ВЛ80С предусмотрено четыре узла люлечной подвески на одной тележке и, соответственно, шестнадцать таких узлов в двух секциях электровоза, становится очевидным масштаб экономической выгоды.

Суммарное снижение трудозатрат, достигаемое при проведении одного ремонта ТР-2, составляет 2,68 человеко-часа, что в денежном эквиваленте

выражается как экономия в размере 2867 рублей на один ремонт. Данный расчёт не включает сопутствующие затраты, такие как расходы на электроэнергию, материалы и амортизацию, которые также могут значительно варьироваться в зависимости от условий работы и объёмов обслуживания. Тем не менее даже без учёта этих дополнительных расходов, данное усовершенствование понимается как положительный вклад в повышение рентабельности производственно-технологических процессов, а также в оптимизацию использования трудовых ресурсов.

Опытная эксплуатация показала положительные результаты, полиамидные втулки, установленные в узел люлечного подвешивания электровозов ВЛ80С, при наработке ресурса 200 тыс. км и 400 тыс. км не имели износа и повреждений. Тем самым данная модернизация может быть применена на всём парке электровозов ВЛ80 и ВЛ10, что позволит получить следующие эффекты:

– снизить количество отказов узла люлечного подвешивания электровозов серии ВЛ80, ВЛ10, тем самым сократить внеплановые ремонты и издержки на них, включая штрафы от невыполнения КГЭ;

– снизить простой электровозов на плановых ремонтах ТР1 из-за выполнения сверхцикловых работ;

– снизить трудоёмкость при ремонте ТР2 от внедрения новой технологии;

– уменьшить себестоимость ремонта ТР1 и ТР2;

– реализовать возможность увеличения пробега до ремонта люлечного подвешивания с 200 до 400 тыс. км, от установки до ремонта ТР3.

7.3 Сравнительный анализ втулок из стали и полиамида ПА6

Для более глубокого анализа можно создать матрицу, где будут сравнены характеристики втулок из стали и полиамида ПА6 по различным критериям, таким как нагрузки, прочность, ремонтопригодность и другие (таблица 7.2).

Таблица 7.2 – Сравнительные характеристики втулок из стали и полиамида ПА6

Критерии	Стальные втулки	Втулки из полиамида ПА6
Нагрузка	Высокая (до 150–200 т)	Умеренная (до 50–70 т)
Прочность на сжатие	Высокая (около 1000 МПа)	Средняя (около 80–100 МПа)
Прочность на изгиб	Очень высокая	Средняя
Износостойкость	Высокая (долговечные в условиях высоких нагрузок)	Средняя (может терять свойства при высокой температуре и нагрузках)
Температурный диапазон	Широкий (от -40 до +600 °C)	Ограниченный (от -40 до +120 °C)
Коррозионная стойкость	Низкая (подвержены коррозии без защиты)	Высокая (устойчива к воздействию химических веществ)
Вес	Высокий (значительная масса)	Низкий (облегчает конструкцию)
Ремонтопригодность	Средняя (требуется специальное оборудование для замены)	Высокая (легко заменяются, не требуют спецоборудования)
Производственные затраты	Высокие (долгий процесс обработки)	Низкие (меньшие затраты на обработку)
Срок службы	Долгий (может достигать 15–20 лет)	Средний (5–10 лет)

Стальные втулки превосходят полиамидные втулки ПА6 по нагрузочной способности, прочности и диапазону рабочих температур, что делает их предпочтительными для применения в условиях воздействия значительных динамических и статических сил, а также при эксплуатации в экстремальных температурных режимах. Однако сталь требует защиты от коррозии, в то время как полиамид обладает естественной устойчивостью к химическим воздействиям и не подвержен коррозии, что выгодно в агрессивных средах. Полиамидные втулки отличаются большей ремонтопригодностью за счёт простоты замены и меньших требований к инструментам, что ускоряет процесс технического обслуживания. В экономическом аспекте более низкие производственные затраты полиамида делают его привлекательным для краткосрочных решений, тогда как долговечность стальных втулок способна оправдать их более высокую стоимость в долгосрочной перспективе.

Выбор между стальными и полиамидными втулками зависит от требований к эксплуатации, желаемого срока службы, условий работы и бюджета. Стальные втулки подходят для сложных и ответственных узлов, где важна прочность и долговечность, в то время как полиамидные втулки могут использоваться в менее критичных местах, где вес и коррозионная стойкость играют ключевую роль.

Анализируя свойства стальных втулок и втулок из полиамида ПА6, можно заключить, что каждая из этих материалов имеет уникальные преимущества и ограничения, определяющие их область применения (таблица 7.3). Стальные втулки характеризуются высокой прочностью, долговечностью и устойчивостью к экстремальным температурам, что делает их незаменимыми в условиях тяжёлой механической нагрузки, высокой динамики и сложных эксплуатационных режимов. Однако их высокая масса, необходимость в защите от коррозии и сложность производства могут ограничивать их использование в определённых отраслях. В свою очередь, втулки из полиамида ПА6 выгодно отличаются лёгкостью, низким коэффициентом трения и высокой коррозионной стойкостью, что позволяет эксплуатировать их в агрессивных средах и конструкциях, где требуется снижение массы рисунок 7.5).

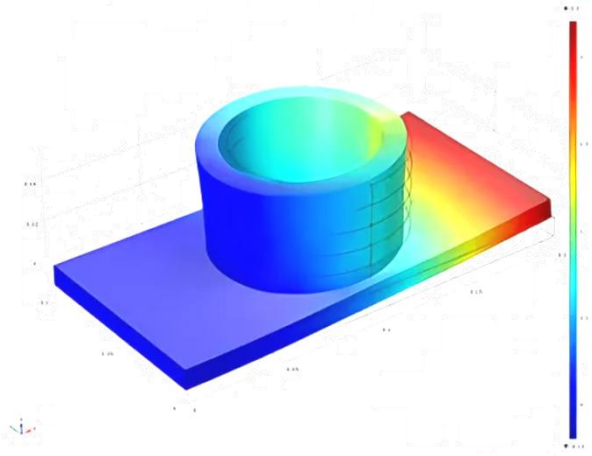


Рисунок 7.5 — МКЭ анализ полиамидной втулки (ПА6)
(влияние агрессивной среды – масло)

Однако полиамидные втулки имеют ограничения в виде низкой сопротивляемости высоким нагрузкам, ограниченного температурного диапазона и чувствительности к внешним эксплуатационным факторам. Таким образом, стальные втулки преимущественно применяются в тяжёлом машиностроении, железнодорожной технике и грузовом транспорте, в то время как полиамидные втулки находят широкое применение в автомобильной промышленности, бытовых устройствах и иных производствах, где нагрузочные требования менее критичны.

Таблица 7.3 – Характеристики материалов стальных втулок и втулок из полиамида ПА6

Критерии	Стальные втулки	Втулки из полиамида ПА6
Производственные затраты	Высокие (дорогое сырье и сложный процесс обработки)	Низкие (дешевле сырьевые материалы и проще обработка)
Трение	Высокое (требуют смазки)	Низкое (может работать без смазки)
Шумоизоляция	Низкая (металлический шум)	Высокая (глушит вибрации и шум)
Гигиеничность	Нужно учитывать коррозию и биообрастание	Гигиеничность выше, не подвержены биообрастанию
Конфигурируемость	Ограниченная (сложнее в изменении формы)	Высокая (легко изготавливаются в различных формах)

Выбор между стальными втулками и втулками из полиамида ПА6 зависит от конкретных требований к эксплуатации. Если критическими факторами являются высокая нагрузка и температура, предпочтение следует отдать стальным втулкам. Если же важно снизить вес конструкции, упростить установку и эксплуатацию, а также обеспечить хорошую коррозионную стойкость, выбор в пользу втулок из полиамида ПА6 будет обоснованным.

7.4 Создание трёхмерной информационной модели производственного комплекса с использованием передовой технологии воздушного сканирования

Железнодорожная отрасль в современном мире сталкивается с возрастающей необходимостью цифровой трансформации, обусловленной стремлением к повышению эффективности эксплуатационных процессов и обеспечению конкурентоспособности в быстро меняющемся технологическом ландшафте. Однако темпы внедрения инновационных цифровых технологий, таких как ЦД, системы анализа больших данных и промышленный *IIoT*, остаются относительно невысокими по сравнению с другими секторами экономики. Учитывая очевидный потенциал интеллектуального анализа данных в оптимизации эксплуатационных затрат и минимизации рисков.

В перспективе ближайших 5–10 лет ключевое направление развития отрасли будет связано с активным внедрением *data-driven* подходов, базирующихся на использовании алгоритмов машинного обучения для прогнозирования.

Ключевыми характеристиками данной платформы должны стать технологическая нейтральность, удобство коммерческого применения и возможность интеграции с существующими системами управления, а также наглядное отображение информации о состоянии оборудования, регламентах его технического обслуживания и прогнозируемых сроках эксплуатации. Это особенно важно в условиях высокой сложности организационных структур железнодорожных компаний и значительного влияния инфраструктурных факторов.

Дополнительно перспективным направлением является внедрение технологий высокоточного лазерного сканирования с последующей обработкой данных для формирования трёхмерных моделей инфраструктуры. Такие технологии способны обеспечить более точный контроль состояния путевой сети, мониторинг износа оборудования и повышение безопасности эксплуатации. Всё это открывает новые возможности для цифровизации отрасли, направленные на улучшение качества управления и эксплуатационной эффективности.

Для получения достоверной исходной информации, необходимой для построения информационно-цифровой модели комплекса производственных зданий, было проведено воздушное лазерное 3-х мерное сканирование с применением передовой технологии от компании *DJI* (рисунок 7.6).

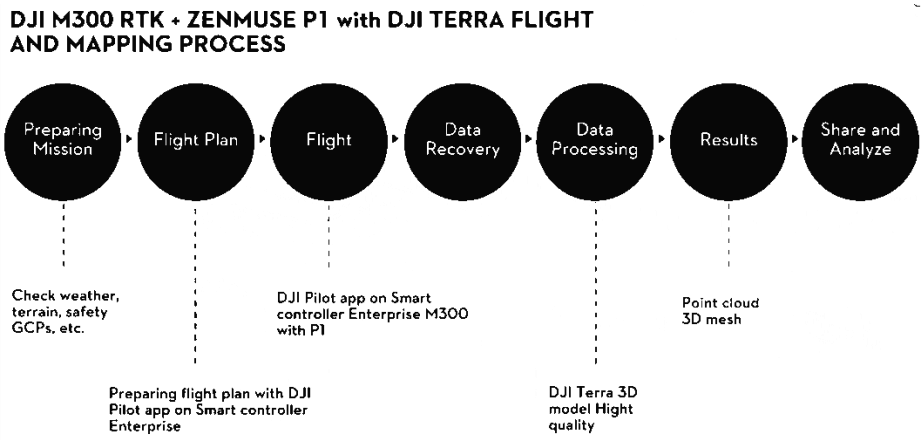


Рисунок 7.6 — Процесс составления карты (с англ. *mapping process*)

Последующее получение 3D-модели с интеграцией в нее информационной модели производилось с применением различных продуктов и технологий

компании *Agisoft Photoscan*. Технология картирования на примере показанного процесса (с использованием дрона *DJI M300 RTK*, камеры *Zenmuse P1* и программного обеспечения *DJI Terra*) включает несколько последовательных этапов, направленных на создание точных карт и моделей местности. Этот процесс используется для создания 3D-моделей, облаков точек или ортофотопланов с высокой точностью. Рассмотрим основные этапы процесса:

1. Подготовка миссии (*Preparing Mission*):

– анализируются погодные условия, особенности рельефа местности и безопасность миссии;

– проверяются контрольные точки наземной съемки (*GCPs*) для обеспечения точности проекта;

– планируется полетная миссия с помощью приложения *DJI Pilot* на смарт-контроллере, задаются параметры съемки и траектория полета.

2. Планирование полета (*Flight Plan*):

– создается маршрут съемки с учетом целей картирования;

– задаются высота, перекрытие снимков и направления полета для обеспечения полноты данных.

3. Полёты и съемка (*Flight*):

– дрон выполняет автоматический полет по заданному маршруту с использованием камеры *Zenmuse P1*;

– проводится съемка территории в высоком разрешении, соблюдается геопривязка каждой фотографии благодаря модулю *RTK* (*Real Time Kinematics*).

4. Извлечение данных (*Data Recovery*):

– собранные дронами фотографии и данные сохраняются и выгружаются для последующей обработки;

– проверяется целостность данных перед их обработкой.

5. Обработка данных (*Data Processing*):

– данные обрабатываются в программном обеспечении *DJI Terra*;

– на основе полученных фотографий создаются облака точек и трехмерные сеточные модели (*3D-mesh*).

6. Получение результатов (*Results*):

– результатом обработки может быть ортофотоплан, 3D-модель, высокоточные облака точек или другие визуализационные данные.

7. Анализ и обмен (*Share and Analyze*):

– итоговые данные используются для анализа или передаются заинтересованным сторонам;

– на данном этапе модели могут использоваться для принятия решений, проведения исследований или создания документации.

Технология картирования с использованием дронов активно применяется в различных отраслях:

– городское и земельное планирование;

– мониторинг строительных объектов;

– управление инфраструктурой;

– исследования рельефа, геологии и экологии;

– создание ЦД местности. Процесс позволяет минимизировать риск, повысить скорость получения данных и добиться высокой точности картографической информации.

7.4.1 Создание и использование цифровых моделей для управления и оптимизации производственно-технологических процессов в эпоху цифровой трансформации

Одним из самых перспективных методов улучшения производственно-технологических процессов считается использование ЦД, как было отмечено в предыдущих разделах, производственных мощностей, которые представляют собой информационно-цифровые модели, включающие данные о структуре производства и его ключевых элементах. Такие модели способны содержать подробную информацию о геометрии производственных площадей, в то время как

каждый отдельный элемент модели может обладать своим уникальным набором характеристик, которые связаны через высокоуровневую базу данных. Например, для станка эти характеристики могут включать тип оборудования, модель, год выпуска, дату последней калибровки, а также сроки проведения следующего ремонта или техобслуживания.

Дополнительно, благодаря интеграции с высокоуровневой базой данных, возможно установить связь с внешними объектами, такими как склады поставщиков запасных частей и материалов. Это позволяет эффективно взаимодействовать с внешними производственными процессами и ресурсами. В конечном счёте, использование таких информационно-цифровых моделей создаёт гибкую и масштабируемую систему, которая обеспечивает анализ и оптимизацию всех этапов производственно-технологических процессов, повышая их эффективность и снижая эксплуатационные риски.

Сканирование проводилось с доступных для полёта локаций. Для выполнения проекта была выбрана относительная система координат, так как привязка к местной или глобальной системе координат не требовалась.

DJI сканер выполняет измерение расстояний с использованием технологии *LiDAR*, определяя расстояния от точки своего размещения во всех направлениях. Дальность измерений определяется техническими характеристиками устройства, при этом плотность точек зависит от заданной разрешающей способности сканера. В ходе одной операции сканирования формируется облако точек, которое описывает плоскости и криволинейные поверхности объектов, попавших в зону сканирования. Пример полученного облака точек представлен на изображениях ниже (рисунок 7.7). На представленном изображении четко видны области и объекты, которые не попали в зону сканирования из-за их затенения другими элементами. Именно поэтому процесс сканирования выполняется неоднократно, с различных позиций, чтобы минимизировать количество непросканированных участков.

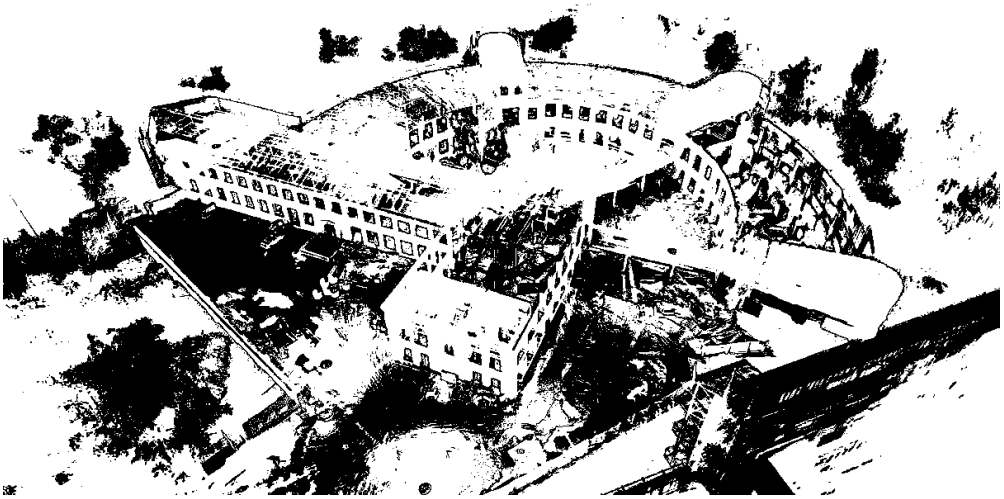


Рисунок 7.7. — Пример облака точек, полученных с беспилотного летательного средства

Перед началом работ был составлен предварительный маршрут движения группы специалистов по сканированию. Однако в ходе выполнения задач этот маршрут регулярно корректировался прямо на месте, в зависимости от текущих обстоятельств: наличия объектов, создающих затенение, необходимости уделить особое внимание определенным элементам здания или обеспечения доступа к помещениям для проведения сканирования.

По итогам первого этапа работ было создано объединённое (сшитое) облако точек, отражающее весь комплекс зданий, предусмотренный договором, а также сформированы отдельные облака точек, связанные с запасными частями для электровозов. В процессе работы были предложены методы оптимизации сканирования с учётом специфики помещений, подлежащих обработке.

Итоговый проект включает 2125 станции сканирования и состоит из облака, содержащего 25 231 115 086 точек.

7.4.2 Анализ возможностей использования информационной 3D-модели в создании «Цифрового производства»

Анализ показал её высокий потенциал и практическую ценность. Разработанная в результате выполнения научно-исследовательских работ модель

отличается высокой точностью и актуальностью на момент проведения лазерного сканирования, что позволяет учитывать все фактические изменения, внесённые после постройки зданий депо.

Данная модель может стать основой для проектов по перепланировке комплекса, так как она включает не только капитальные строительные конструкции, но также технологическое оборудование и ключевые инженерные коммуникации. Это обеспечивает более точную и эффективную подготовку проектных решений.

Ввиду высокой степени точности представленной модели она содержит детальное отражение всех актуальных параметров объекта, включая фактические размеры помещений, габариты дверных проёмов, уклоны полов в пределах помещений и переходов между цехами, а также рабочие зоны мостовых кранов. Указанные данные являются критически важными для тщательного планирования операций по перемещению крупногабаритного оборудования, поскольку они позволяют минимизировать риски возникновения аварийных ситуаций, предотвращают травматизм и угрозу жизни сотрудников, а также исключают возможность повреждения или поломки оборудования. Помимо этого, учёт данных параметров содействует максимальной эффективности использования подъемно-транспортных устройств и рациональной организации производственно-технологических процессов.

7.4.3 Информационные структуры и функциональные возможности 3D-моделей, созданных на основе данных беспилотных летательных аппаратов

Информационная структура цифровой 3D-модели и её функциональные возможности представляют собой ключевые аспекты современных подходов к цифровизации. Каждому элементу или группе элементов модели может быть приписан набор параметров, которые подразделяются на три категории: числовые, символьные и бинарные. Числовые параметры могут содержать сведения, такие как

масса, мощность, год выпуска и другое. Символьные параметры предназначены для идентификации модели, типа элемента, материально ответственного лица или функционального назначения данной составляющей. Бинарные параметры указывают на наличие или отсутствие объекта, его состояние (например, включён/выключен) и другие дихотомические характеристики.

Эти параметры могут быть интегрированы с высокоуровневыми базами данных и использоваться в системах класса ЦД. Такой подход обеспечивает не только традиционный «бумажный учёт» активов предприятия. Примером такого анализа может послужить оперативное определение наличия необходимых деталей на складе либо доступ к информации о предстоящих регламентных работах.

Набор типов, количеств, значений и связей параметров практически не имеет ограничений, за исключением требований, определённых конкретными задачами. Кроме того, он может быть изменён или дополнен по мере эксплуатации системы, что делает модель гибкой и адаптивной к изменениям производственных и бизнес-процессов.

Применение данной технологии обладает высоким потенциалом для цифровизации технологических и управленческих процессов на промышленных предприятиях и, учитывая её функциональные преимущества, в ближайшие годы ожидается значительное расширение её использования в различных отраслях.

В рамках исследования были разработаны и успешно протестированы практические методы, ориентированные на ускорение процесса 3D-сканирования с применением беспилотных летательных аппаратов *DJI*, а также на улучшение точности получаемых данных и сокращение погрешностей с учётом специфики сканируемых объектов и помещений. В ходе выполнения работ полученные данные 3D-сканирования были интегрированы в единую информационную модель производственного комплекса, где каждому элементу присваивались группы параметров в зависимости от их типа и функционального назначения. Такая структуризация позволяет в дальнейшем интегрировать модель с

высокоуровневыми программными решениями сторонних разработчиков для более эффективного управления.

Созданная информационная модель, по сути, представляет собой ЦД производственного комплекса, который обеспечивает возможность оперативного отслеживания состояния всех компонентов, прогнозирования их износа и поломок, а также планирования регламентных обслуживания и ремонта. Благодаря интеграции плановых мероприятий с общим производственным расписанием и базой данных, возможна такая организация процессов, которая исключает технологические простои и снижает риски несоответствий между ремонтом оборудования и текущей операционной деятельностью производства.

Важно отметить, что использование данной модели выходит за рамки мониторинга и технического обслуживания. Она также открывает широкие возможности для оптимизации внутрицеховой логистики и решения задач обратного инжиниринга, например, при проектировании аналогичных производственных комплексов. Таким образом, полученная цифровая модель становится не только инструментом текущего контроля и управления, но и основой для долгосрочного совершенствования и развития производственно-технологических процессов.

7.5 Расчёт матрицы влияния трещин на прочность стержня узла люлечного подвешивания локомотива ВЛ80

Для разработки матрицы влияния трещин на прочность стержней люлечного подвешивания локомотивов серии ВЛ80 и моделирования зависимости времени эксплуатации от размера трещины, необходимо учитывать несколько ключевых факторов: механические свойства материала стержня, характер нагрузки, условия эксплуатации и размер трещин (таблица 7.4). Основные параметры для анализа: материал стержня: обычно стержни изготавливаются из углеродной стали с определенными механическими свойствами. Нагрузки: оценка статических и динамических нагрузок, действующих на узел подвешивания во время

эксплуатации. Размеры трещин: длина, ширина и ориентация трещин, которые могут влиять на прочность стержня.

Таблица 7.4 – Матрица влияния трещин на прочность стержня узла люлечного подвешивания

Параметры	Описание	Уровни допуска	Способы измерения	Влияние на работоспособность узла
Глубина дефекта	Максимальная глубина обнаруженного дефекта	До 2 мм – допустимо, более 2 мм – брак	Ультразвуковое сканирование	Чем глубже, тем больше риск разрушения детали
Длина дефекта	Максимальная длина дефекта	До 10 мм – допустимо, более 10 мм – брак	Ультразвуковое сканирование	Длинные дефекты могут привести к трещинам и поломке
Расположение дефекта	Место нахождения дефекта (поверхностный или внутренний)	Поверхностные – более опасные	Ультразвуковое сканирование, визуальный осмотр	Внутренние дефекты менее критичны, чем поверхностные
Тип дефекта	Характер дефекта (трещина, включения, пустоты и т. д.)	Трещины - критично, включения и пустоты - допустимы	Ультразвуковое сканирование, металлографический анализ	Тип дефекта определяет необходимость ремонта
Размер зоны дефекта	Общая площадь зоны дефекта	Меньше 5 % общей площади – допустимо	Ультразвуковое сканирование	Большие зоны могут ослаблять стержень
Эхо-сигнал амплитуда	Амплитуда отраженного сигнала от дефекта	Меньше 20 % от максимальной амплитуды – допустимо	Ультразвуковое сканирование	Параметр показывает размеры и наличие дефекта
Скорость распространения ультразвука	Скорость распространения ультразвуковых волн в стержне	Отклонения до 5 % – допустимо	Ультразвуковое сканирование	Позволяет определить материал или наличие дефектов
Частота сигнала	Частота применяемого ультразвукового сигнала	2–5 МГц	Ультразвуковое сканирование	Влияет на разрешающую способность
Доверительный интервал для среднего размера дефектов при ультразвуковом контроле стержня люлечного подвешивания с уровнем доверия 95 % составляет от 0,644 до 1,056 мм				

Глубина дефекта является важным параметром, так как более глубокие дефекты оказывают более серьезное влияние на структурную целостность стержня. Длина дефекта также играет значительную роль, поскольку длинные дефекты могут провоцировать образование трещин под нагрузкой. Расположение дефекта имеет критическое значение, особенно если дефекты находятся на поверхности, где материал подвергается наибольшим нагрузкам, что делает их более опасными. Тип дефекта определяет степень угрозы: трещины считаются наиболее критичными,

так как способны быстро развиваться под внешним воздействием. Важным фактором также является общая площадь дефектной зоны, определяемая размером дефекта, что влияет на степень ослабления стержня. Значение амплитуды эхо-сигнала позволяет оценить размеры дефекта, а изменения в скорости распространения ультразвука могут указывать на наличие скрытых повреждений или неоднородностей в структуре материала. Частота ультразвукового сигнала подбирается таким образом, чтобы обеспечить оптимальный баланс между глубиной диагностики и разрешающей способностью.

Матрица может быть представлена в виде таблицы (см. таблицу 7.5), где оценка влияния каждого параметра от 1 до 5 (где 1 – минимальное влияние, 5 – максимальное).

Таблица 7.5 – Оценочная матрица

Размер трещины (мм)	Влияние на прочность (баллы)	Вероятность аварии (баллы)	Рекомендации
0.1 – 0.5	1	1	Регулярный осмотр
0,6 – 1.0	2	2	Минимум раз в 10 000 км
1,1 – 2.0	3	3	Интенсивный мониторинг
2,1 – 3.0	4	4	Необходимость ремонта
> 3.0	5	5	Срочная замена

Для создания зависимости можно использовать логистическую или экспоненциальную модель, учитывающую уменьшение прочности со временем по мере роста трещин. Один из возможных подходов — использование модели, описывающей уровень здоровья стержня (H) в зависимости от размера трещины (Т), формула 6.5:

$$H(T) = H_e e^{-kT}, \tag{6.5}$$

где: $H(T)$ – остаточный ресурс конструкции или предельное оставшееся время эксплуатации на момент времени T; H_0 – начальный ресурс или расчетное время эксплуатации при отсутствии значительного развития трещины (или изначальном состоянии материала); T – время, в течение которого эксплуатируется конструкция (сколько времени прошло, начиная с момента начала эксплуатации или появления

трещины); k – параметр, связанный с динамикой роста трещины (он зависит от материала, характера нагрузки и условий эксплуатации). Чем выше k, тем быстрее ресурс конструкции исчерпывается. Результаты расчёта представлены в таблице 7.6.

Формула показывает, что по мере увеличения времени эксплуатации T, ресурс $H(T)$ уменьшается экспоненциально. Это связано с тем, что трещина в материале со временем увеличивается под действием нагрузок или внешних факторов, а её рост ослабляет конструкцию, уменьшая её способность противостоять дальнейшим воздействиям.

Таким образом: В начальный момент времени ($T = 0$), остаточный ресурс конструкции равен H_0, что соответствует её исходному состоянию.

Со временем (T), из-за роста трещины ресурс $H(T)$ уменьшается. При значительных значениях времени эксплуатации ($T \to \infty$) ресурс $H(T)$ стремится к нулю, что соответствует разрушению материала или конструкции.

Таблица 7.6 – Расчётные данные

Размер трещины (мм)	Уровень прочности (H)
0	100
0,5	90,5
1,0	82,0
1,5	74,3
2,0	67,0
2,5	60,5
3,0	54,0
3,5	48,2

Оценка влияния трещин на прочность стержней люлечного подвешивания и количественная модель зависимости времени эксплуатации от размера трещины позволяют эффективно планировать техническое обслуживание и выявлять потенциальные угрозы безопасности. Регулярный контроль, анализ и оценка состояния стержней помогут минимизировать риск аварий и продлить срок службы локомотивов серии ВЛ80.

7.6 Анализ корреляционной матрицы: оценка надежности узла, ключевые параметры и пути совершенствования конструкции

На основании анализа корреляционной матрицы можно сделать следующие выводы: об оценке надежности узла после модернизации, определении ключевых параметров, которые оказывают значительное влияние на надежность конструкции, а также о потребности в дальнейших улучшениях или корректировках конструкции либо процесса монтажа полиамидных втулок при наличии выявленных слабых мест (таблица 7.7).

Таблица 7.7 – Параметры оценки надежности узла

Параметр	Нагрузка	Вибрация (до)	Вибрация (после)	Температура (до)	Температура (после)	Изношенность (до)	Изношенность (после)	Частота отказов (до)	Частота отказов (после)	*MTBF* (до)	*MTBF* (после)
Нагрузка	1.00	0.45	0.34	0.58	0.40	0.22	0.30	0.50	0.36	–0.40	–0.35
Вибрация (до)	0.45	1.00	0.70	0.25	0.60	0.55	0.50	0.65	0.50	–0.55	–0.45
Вибрация (после)	0.34	0.70	1.00	0.20	0.55	0.48	0.67	0.40	0.30	–0.40	–0.60
Температура (до)	0.58	0.25	0.20	1.00	0.32	0.30	0.25	0.35	0.40	–0.25	–0.20
Температура (после)	0.40	0.60	0.55	0.32	1.00	0.38	0.30	0.25	0.20	–0.15	–0.18
Изношенность (до)	0.22	0.55	0.48	0.30	0.38	1.00	0.80	0.60	0.55	–0.75	–0.60
Изношенность (после)	0.30	0.50	0.67	0.25	0.30	0.80	1.00	0.45	0.30	–0.50	–0.40
Частота отказов (до)	0.50	0.65	0.40	0.35	0.25	0.60	0.45	1.00	0.75	–0.70	–0.55
Частота отказов (после)	0.36	0.50	0.30	0.40	0.20	0.55	0.30	0.75	1.00	–0.60	–0.75
MTBF (до)	–0.40	–0.55	–0.40	–0.25	–0.15	–0.75	–0.50	–0.70	–0.60	1.00	0.85
MTBF (после)	–0.35	–0.45	–0.60	–0.20	–0.18	–0.60	–0.40	–0.55	–0.75	0.85	1.00

Здесь каждое значение показывает уровень корреляции между различными параметрами до и после ремонта. Положительные и отрицательные значительные

корреляции нужно интерпретировать для выработки рекомендаций по улучшению надежности системы. Наибольшая корреляционная связь (0,85) наблюдается между *MTBF*[5] (до) и *MTBF* (после). Это свидетельствует о том, что время наработки на отказ до модернизации тесно связано с этим же показателем после модернизации, несмотря на улучшения. Следует отметить, что модернизация сильно влияет на эти показатели, однако их взаимосвязь остаётся значимой.

Наименьшее значение корреляции с учётом знака: −0,75 между *MTBF* (до) и изношенность (до), а также между *MTBF* (после) и частота отказов (после). Это подтверждает, что при увеличении изношенности или частоты отказов наблюдается сильное снижение значения MTBF (взаимно обратная связь, говорит о том, что модернизация сильно влияет на эти показатели, однако их взаимосвязь остаётся значимой).

7.7 Выводы по разделу 7

1. Проанализировано состояние люлечного подвешивания электровозов ВЛ80 на основе данных 2017–2019 годов. Обнаружено увеличение дефектов узла при пробеге от 100 до 200 тыс. км, что связано с износом металлических втулок и невозможностью их своевременного диагностирования из-за недостатка регламентов текущего ремонта первого объёма (ТР-1). Это приводит к росту простоев локомотивов, снижению эксплуатационной готовности и значительным материальным издержкам (до 3,5 млн рублей ежегодно).

2. Подтверждена необходимость применения полиамидных втулок, взамен стальных., что позволяет существенно снизить трудозатраты и сложность ремонта. Данные втулки обеспечивают более высокий уровень коррозионной стойкости, лёгкость замены, отсутствие необходимости демонтажа стакана и стержня при отсутствии видимых дефектов, а также минимизацию времени ремонта.

[5] *MTBF* (*Mean Time Between Failures*) — это среднее время наработки на отказ.

3. Внедрение новых материалов позволяет исключить ряд металлоёмких операций, таких как выпрессовка втулок и обработка стержней и стаканов, снизив трудоёмкость процесса ремонта люлечного подвешивания на каждом узле до 2,68 человеко-часа. Для всего электровоза, имеющего 16 узлов, экономия достигает значительных значений (42,88 человеко-часов). Благодаря внедрению полиамидных втулок и оптимизации процесса, достигается значительная экономия трудозатрат – около 2867 рублей на один ремонт люлечного подвешивания. Уменьшается потребность в сверхцикловых ремонтах при пробегах ТР-1 и ТР-2, что сокращает время простоя локомотивов. Кроме того, опытная эксплуатация полиамидных втулок при ресурсах в 200 и 400 тыс. км показала их высокую надёжность и отсутствие износа, что предполагает их дальнейшее распространение на весь парк электровозов ВЛ80 и ВЛ10.

4. Результаты исследования показали, что полиамидные втулки превосходят стальные по коррозионной стойкости, меньшему весу, простоте ремонта и экономической эффективности, однако уступают по прочности на сжатие и износостойкости при воздействии высоких динамических нагрузок. Тем не менее, полиамидные втулки подходят для условий, соответствующих средней интенсивности эксплуатации, с перспективой внедрения в другие технические решения.

5. Совершенствование управленческих процессов через моделирование и оптимизацию: проанализированы возможности трёхмерного картографирования производственных площадок с использованием технологий лазерного сканирования и воздушного картирования. Такие модели совмещаются с информационными базами данных, способствуя более управляемой системе координации ресурсов, диагностики неисправностей и контроля ремонтного цикла при ТПП.

Таким образом, раздел 7 уделяет особое внимание внедрению полиамидных втулок, инновационных методов технического обслуживания и цифровизации ремонтных процессов. Данные изменения не только снижают себестоимость и

трудоёмкость ремонта, но и существенно увеличивают надёжность эксплуатации электровозов ВЛ80 за счёт рационализации конструктивных решений и перехода на прогрессивные технологии диагностики и планирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование направлено на повышение эффективности ТПП и организации процессов ТОиР ТПС, направлено на увеличение эффективности и надёжности локомотивов. Основной акцент сделан на модернизацию системы ТПП с внедрением современных цифровых инструментов.

Проведённый анализ выявил серьёзные проблемы, связанные с износом локомотивных узлов, высокой долей отказов и значительным объёмом незапланированных ремонтов. Эти недостатки объясняются низким уровнем автоматизации и механизации процессов, а также отсутствием современных методов диагностики и контроля. Для решения этих задач были разработаны инновационные технологии, включая роботизированные комплексы, которые интегрируют глубокое обучение и системы автоматического обнаружения дефектов и их идентификации. Применение полиамидных втулок в узлах, таких как люлечное подвешивание, позволило увеличить прочность и надёжность конструктивных элементов, сократить коррозионный износ и повысить экономическую эффективность эксплуатации.

Научная новизна работы заключается во внедрении комплексных решений для повышения качества и оперативности процессов ТПП ТОиР. Создана АС КТПП, интегрирующая ЦД и обеспечивающая оптимизацию ремонта, снижение трудозатрат и улучшение управления техническим состоянием локомотивов. Применение методов, основанных на нейронных сетях и идентификации дефектов по их индикатрисам рассеяния, позволило значительно повысить точность прогнозирования ресурса деталей и узлов ТПС.

Практическая значимость работы подтверждается внедрением разработанных технологий в ряде СЛД, что привело к снижению времени простоя ТПС, увеличению межремонтных пробегов и общей надёжности эксплуатируемого парка. Экономический эффект выражается в снижении затрат на ремонтные работы и повышении устойчивости системы ТПП в современных условиях.

Диссертационная работа представлена комплексным исследованием, направленным на разработку и внедрение инновационных подходов к ТПП при освоении ремонта ТПС. В процессе работы разработаны научно обоснованные методики, современные технологические решения, а также внедрены прогрессивные подходы, которые обеспечивают повышение надежности, безопасности и эффективности эксплуатации локомотивов, такие как модернизация конструкции узлов, внедрение ЦД и систем автоматизированной диагностики.

1. Установлена необходимость модернизации существующей системы ТПП, включающей интеграцию 3D-решений и комплексного НК, что позволяет эффективно диагностировать техническое состояние локомотивов, прогнозировать их остаточный ресурс и снижать долю аварийных отказов. На этой основе разработана технология оценки технического состояния деталей и узлов локомотивов, обеспечивающая высокую точность определения дефектов, их классификацию и прогнозирование с использованием нейронных сетей.

2. Проведён анализ существующих конструктивных решений узла люлечного подвешивания электровозов серии ВЛ80, что позволило выявить их основные эксплуатационные проблемы и разработать инновационные решения для замены традиционных элементов полиамидными втулками.

3. Создана обобщённая модель АС КТПП, позволяющая оптимизировать процессы создания и постановки локомотивов на производство, сократить сроки освоения ремонта и повысить качество ТД. Внедрение ЦД модернизированных узлов, таких как узел люлечного подвешивания, открывает новые возможности в планировании и управлении ремонтом.

4. Разработаны роботизированные комплексы с функцией автоматической обработки данных контроля, которые обеспечивают повышение информативности ТП ТОиР и значительно снижают ручные трудозатраты. Это стало возможным благодаря интеграции методов глубокого обучения и систем автоматического выявления дефектов на основе индикатрис рассеяния.

5. Проведённое исследование подтвердило, что использование современных методов цифровизации производственно-технологических процессов, 3D-технологий и нейронных сетей позволяет существенно сократить время диагностики и повысить качество ремонта. Это особенно важно для СЛД, где требуется высокая оперативность и точность при ТПП ТОиР.

Экономический анализ показал, что внедрение предложенных технологий, включая модернизацию узлов и применение полиамидных втулок, позволяет существенно снизить затраты на ремонт, сократить время простоя ТПС и повысить надежность работы локомотивного парка.

Таким образом, диссертация вносит значительный вклад в развитие теории и практики ТОиР ТПС. Предложенные технологии позволяют развить систему ТПП до уровня, соответствующего современным требованиям промышленности и транспорта, обеспечивая информативность ТП, точность и экономическую эффективность ремонтных процессов. Полученные результаты внедрены в ряде локомотивных депо и предприятий, что подтверждает их практическую значимость и востребованность.

Отмечено, что метод с меньшей энтропией будет более информативным, так как он предоставляет более точные и надежные данные. Информативность комбинированного метода контроля определяется объёмом и значимостью данных, получаемых в результате контроля, и включает: 1. Полнота выявления дефектов: способность метода обнаруживать все дефекты, существующие в контролируемом объекте. 2. Детализация данных: предоставление полной информации о типе, размере и местоположении дефекта. 3. Интерпретируемость данных: удобство восприятия и анализа информации операторами и специалистами.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АМ – антенные матрицы

АПЛ – автоматизированные производственные линии

АР – антенные решётки

АС КТПП – автоматизированная система конструкторско-технологической подготовки производства

АСУ – автоматизированная система управления

АСУНТ – автоматизированная система управления надёжностью локомотивов

АСТД – автоматизированная система технического диагностирования

АТ – аддитивные технологии

BIM – информационная модель здания

CAE – система инженерного анализа

ГИП – график инвестиционной программы

ЕИП – единое информационное пространство

ЕС ТПП – Единая система технологической подготовки предприятия

ЕСТД – Единая система технологической документации

ИКТ – информационно-коммуникационные технологии

ИПС – информационно-производственное пространство

ИС – информационная среда

ИР – индикатриса рассеяния

ЖЦ – жизненный цикл

КД – конструкторская документация

КИМ – координатно-измерительная машина

КР – капитальный ремонт

КТПП – комплексная технологическая подготовка производства

ЛС – лазерное сканирование

МСУ – микропроцессорная система управления локомотивов

НК – неразрушающий контроль

ННСС – назначение нового срока службы

НПТ – новые производственные технологии

НТД – нормативно-техническая документация

НТПС – нетяговый подвижной состав

ПС – подвижной состав

ПСС – продление срока службы

РД – руководящий документ

САПР – система автоматизированного проектирования

САПР КТП – система автоматизированного конструкторско-технологического проектирования

САПР СТО – система автоматизации средств технологического оснащения

САПР ТП – система автоматизированного технологического проектирования

СЛД – сервисные локомотивные депо

СР – средний ремонт

ССП – система структурированного подсвета

ТИ – технологическая инструкция

ТД – техническое диагностирование

ТЗ – техническое задание

ТК – технологическая карта

ТМЦ – товарно-материальные ценности

ТО – технологическая операция

ТОиР – техническое обслуживание и ремонт

ТП – технологический процесс

ТПП – технологическая подготовка производства

ТПС – тяговый подвижной состав

УЗК – ультразвуковой контроль

ФАР – фазированные антенные решётки

ФГМ – фотограмметрия

ЦД – цифровой двойник

ЧПУ – числовое программное обеспечение

EPD – система, поддерживающая концепцию полного электронного описания объекта

ЭВМ – электронная вычислительная машина

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смирнов, В. А.** Повышение эффективности технологических систем ремонтного производства и технического обслуживания подвижного состава : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.02.22 / Смирнов Виктор Александрович; [Место защиты: Российский университет транспорта РУТ (МИИТ)]. – Москва, 2020. – 344 с. – Текст : непосредственный.

2. Вагонное хозяйство: учебник для вузов ж.-д. транспорта / П. А. Устич, И. И. Хаба, В. А. Ивашов [и др.]; под ред. П. А. Устича. – Москва: Маршрут, 2003. – 560 с. – Текст: непосредственный.

3. **Аболмасов, А. А.** Управление техническим состоянием тягового подвижного состава в условиях сервисного обслуживания: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Аболмасов Алексей Александрович. – Москва: МИИТ, 2017. – 180 с. – Текст: непосредственный.

4. **Лакин, И. И.** Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых аппаратно-программных комплексов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лакин И. И. – Москва : МИИТ, 2016. – 195 с. – Текст : непосредственный.

5. ГОСТ 27.004–85. Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения. – Москва: Издательство стандартов, 1986, 20 с. – Текст : непосредственный.

6. **Петров, Д. В.** История железнодорожного транспорта в России. – Издательство «Транспорт», 2010. – 312 с. – Текст : непосредственный.

7. **Ващенко, А. И.** Советский транспорт: История и развитие. – Издательство «Экономика», 2015. – 256 с. – Текст : непосредственный.

8. **Галицкий, В. П.** Советская железнодорожная техника: достижения и регламентация. – Журнал железнодорожного транспорта, 2018. – № 4. – С. 25 – 32. – Текст : непосредственный.

9. **Соловьёв, И. А.** Российский железнодорожный транспорт в постсоветский период: проблемы и перспективы развития. – М.: Институт транспортной экономики, 2016. – 240 с. – Текст : непосредственный.

10. **Мингулов, Г. А.** Проблемы и перспективы развития высокоскоростного железнодорожного транспорта в России / Г. А.Мингулов, А. В.Хиневич // Транспорт России, 2020. – № 3. – С. 45 – 50. – Текст : непосредственный.

11. **Мингулов, Г. А.** Высокоскоростной железнодорожный транспорт: состояние и перспективы / Г. А. Мингулов, А. В. Хиневич. – Москва: Издательство транспортного университета, 2019. – 180 с.

12. **Тихонов, С. В.** Высокоскоростные железнодорожные пути в России: проект Москва – Казань и его перспективы. – М.: Издательство «Транспортная наука», 2020. – 320 с.

13. **Дьяков, А. Н.** Высокоскоростные железные дороги в Европе: опыт Германии, Франции, Италии и Испании. – СПб.: Издательство «Научный мир», 2021. – 278 с.

14. **Лобанов, Е. П.** Высокоскоростные железные дороги в Азии: японские «Синкансэн» и китайские CRH. – М.: Издательство «Транспорт», 2022. – 350 с.

15. **Сидоров, А. В.** Железнодорожный транспорт США: грузовые перевозки и пассажирские маршруты Amtrak. – Н. Новгород: Издательство «Транспортная инфраструктура», 2023. – 320 с.

16. Постановление Правительства Российской Федерации от 18 мая 2001 г. № 384. Об утверждении Правил перевозок грузов железнодорожным транспортом в России. – М.: Правительство РФ, 2001. – 9 с.

17. **Рафиков, Р. Х**. Техническая подготовка производства при освоении ремонта локомотивов // Транспортное машиностроение, 2022. – №. 8. – С. 33– 43. DOI: https://doi.org/10.30987/2782-5957-2022-8-33-43 (дата обращения: 11.05.2024). – Текст : непосредственный.

18. ГОСТ Р 56046–2014. Системы управления движением поездов на железнодорожном транспорте. Общие требования и рекомендации. – М.: Росстандарт, 2014. – 8 с.

19. **Липа, К. В.** Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых микропроцессорных систем управления / К. В. Липа, В. И. Гриненко, С. Л. Лянгасов [и др.] – Москва : ООО «ТМХ-Сервис», 2013. – 156 с. – Текст : непосредственный.

20. **Липа, К. В**. Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов. Теория и практика / К. В. Липа, А. А. Белинский, В. Н. Пустовой [и др.].– Москва : ООО «Локомотивные технологии», 2015. – 212 с. – Текст : непосредственный.

21. **Липа, К. В**. Автоматизированная система управления надежностью локомотивов (АСУНТ). Концепция ТМХ-Сервис [Текст] / К. В. Липа, В. И. Гриненко, С. Л. Лянгасов [и др.]. – Москва : ООО «ТМХ-Сервис», 2012. – 160 с. – Текст : непосредственный.

22. 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: 27.04.2023).

23. **Пехтерев, Ф. С.** С учетом прогнозов социально-экономического развития страны // Железнодорожный транспорт, 2016. – С. 15–19. – Текст : непосредственный.

24. **Рафиков, Р. Х.** Изготовление деталей и узлов тягового подвижного состава с применением технологий 3D-печати в условиях сервисных и локомотиворемонтных предприятий / Р. Х. Рафиков, Е. И. Елисейкин, В. А. Изотов [и др.] // Транспорт : проблемы, идеи, перспективы : сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции. – СПб. : ПГУПС, 2021. – С. 38–42.

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

26. **Рафиков, Р. Х**. Совершенствование ультразвукового контроля. Разработка методики определения шага сканирования при ультразвуковом контроле / Р. Х. Рафиков, Н. Н. Коновалов, И. К. Лакин // Сборник трудов XXII Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике, Москва, 3–5 марта 2020 г. – Москва : Издательский дом «Спектр», 2020. – С. 73–75. – ISBN 978-4442-0150-3. – Тпекст : непосредственный.

27. **Рафиков, Р. Х**. Оценка возможности замены на ультразвуковой радиационного контроля сварных соединений, деталей и узлов тягового подвижного состава / Р. Х Рафиков, Н. Н. Коновалов, И. К. Лакин [и др.] // Сборник трудов XXII Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике, Москва, 3–5 марта 2020 г. – Москва : Издательский дом «Спектр», 2020. – С. 70–73. – ISBN 978-4442-0150-3. – Текст : непосредственный.

28. **Рафиков, Р. Х.** Мобильный колёсотокарный станок с ЧПУ для последовательной обточки колесных пар локомотивов / Р. Х. Рафиков, А. М. Шапошников, Е. И. Елисейкин, М. Ю. Куликовский // Сборник материалов 74-й Всероссийской научно-технической конференции, Ярославль, 21 апреля 2021 г. : Ярославль : Изд-во ЯГТУ, 2021. – Часть 2. – С. 48–52. – Текст : непосредственный.

29. Регламент № 240ЛТ-П от 05.05.2021 Подготовка производства (22545401 v6).

30. **Копачев, С. В.** Совершенствование технологической подготовки ремонта подвижного состава // Наука и техника транспорта, 2012. – № 3. – С. 68–74. – Текст : непосредственный.

31. Фейгенбаум, А. В. Управление качеством: теория и практика. – М.: Альпина Паблишер, 2007. – 224 с.

32. Деминг, У. Э. Выход из кризиса: экономика, организация и качество. – М.: Издательство «Питер», 2005. – 288 с.

33. Кроуфорд, Л. Бережливое производство: как получить больше с меньшими затратами. – СПб.: Питер, 2010. – 256 с.

34. Окпер, П. Система «точно в срок»: от Японии к миру. – М.: ИНФРА-М, 2008. – 192 с.

35. Хантер, С. Шесть сигм: простое руководство по управлению качеством. – М.: Альпина Паблишер, 2009. – 192 с.

36. Каплан, Р. С., Нортон, Д. П. Система сбалансированных показателей: стратегия как система управления. – М.: ИНФРА-М, 2006. – 320 с.

37. Харрингтон, Х. Дж. Шесть сигм: как достичь безошибочного качества в бизнесе. – М.: Бинар, 2004. – 256 с.

38. Каплан, Р. С., Стратегии для создания системы сбалансированных показателей / под общ. ред. Р. С. Каплан, Д. П.Нортон. – М.: Эксмо, 2010. – 280 с.

39. Лайкер, Д. Дао Toyota: 14 принципов менеджмента ведущей компании мира / Джефри Лайкер. – Москва : Альпина Бизнес Букс, 2005. – 402 с. – Текст : непосредственный.

40. ПР НК В.-2012 «Правила по неразрушающему контролю вагонов, их деталей и составных частей при ремонте. Общие положения», Приложение А «Положение об аттестации лабораторий неразрушающего контроля» (утверждены Советом по железнодорожному транспорту государств– участников Содружества, протокол от 16–17 октября 2012г. № 57, приняты к руководству и исполнению приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 31 октября 2012 г. № 391). – URL: https://base.garant.ru/71286746/ (дата обращения: 17.10.2023).

41. Положение об аттестации лабораторий неразрушающего контроля предприятий, осуществляющих ремонт локомотивов и мотор-вагонного подвижного состава : утверждено Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества, протокол от 04– 05 ноября 2015 г. № 63, принято к руководству и исполнению приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 01 декабря 2015 г. № 346).

42. Временный порядок организации работ по аттестации лабораторий неразрушающего контроля предприятий, выполняющих работы по изготовлению, ремонту и техническому обслуживанию железнодорожного подвижного состава,

утвержден от 21 апреля 2017 г. – URL: https://base.garant.ru/71927922/ (дата обращения 16.10.2023).

43. Система неразрушающего контроля в АО «ФПК». Контроль неразрушающий деталей пассажирских вагонов. Общие положения: СТО ФПК 1.11.004-2020. – М.: «ФПК», 2020. – 54 с.

44. Типовое положение по организации работ по неразрушающему контролю на заводах Дирекции «Желдорреммаш». РД ЖДРМ-01005 от 29.08.2005. – Москва : Желдорреммаш, 2005. – 32 с.

45. ИСО/МЭК 17020:2012:Международная организация по стандартизации / Международная Электротехническая Комиссия. ИСО/МЭК 17020:2012. Общие требования к органам, осуществляющим инспекцию. Женева: Международная организация по стандартизации, 2012. – 28 с.

46. ИСО/МЭК 17025:2017:Международная организация по стандартизации / Международная Электротехническая Комиссия. ИСО/МЭК 17025:2017. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. Женева: Международная организация по стандартизации, 2017. – 30 с.

47. Рафиков, Р. Х. Разработка технологий и средств ультразвукового контроля с идентификацией дефектов сварных соединений на основе анализа их индикатрис рассеяния : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.11.13 / Рафиков Рафик Хайдарович; [Место защиты: Науч.-исслед. ин-т интроскопии МНПО «Спектр»]. – Москва, 2019. – 24 с. – Текст : непосредственный.

48. ГОСТ 3.1102–2018. Система разработки и поставки изделий. Формы и методы представления информации о изделиях; утверждён 26 декабря 2018 года. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 16 с.

49. ГОСТ 1.2–2018. Система стандартов. Правила разработки и оформления стандартов. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 23 с.

50. ГОСТ 3.1105–2018. Система разработки и поставки изделий. Общие требования к документам, определяющим характеристики изделий; утверждён 26 декабря 2018 года. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 24 с.

51. ГОСТ 3.1502–2019. Продукция сельского хозяйства. Методология и критерии оценки состояния и качества; утверждён 7 марта 2019 года. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 34 с.

52. EN 473–2008. Non-destructive testing. Qualification and certification of personnel. – Brussels: European Committee for Standardization, 2008. – 40 p.

53. ГОСТ 30489–2011. Методы неразрушающего контроля. Общие требования к квалификации и аттестации персонала. – Москва: Стандартинформ, 2011. – 24 с.

54. ISO 9712–2012. Non-destructive testing. Qualification and certification of personnel. – Geneva: International Organization for Standardization, 2012. – 62 p.

55. ГОСТ 2789–73. Порошковая металлургия. Методы испытаний механических свойств. – Москва: Издательство стандартов, 1973. – 26 с.

56. ГОСТ 12.2.003–91. Системы стандартов безопасности труда. Общие требования к специальной одежде. – Москва: Издательство стандартов, 1991. – 24 с.

57. ГОСТ 12.1.003–83. Системы стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – Москва: Издательство стандартов, 1983. – 38 с.

58. ГОСТ 12.2.049–80. Системы стандартов безопасности труда. Общие требования к средствам индивидуальной защиты рук. – Москва: Издательство стандартов, 1980. – 32 с.

59. ГОСТ 12.1.019–79. Системы стандартов безопасности труда. Производственный контроль за состоянием охраны труда. – Москва: Издательство стандартов, 1979. – 17 с.

60. ГОСТ 12.1.004–91. Системы стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – Москва: Издательство стандартов, 1991. – 36 с.

61. Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года. [Электронный ресурс] – URL: http://government.ru/docs/19759/ (дата обращения: 20.09.2021).

62. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации». – Текст электронный // Правительство Российской Федерации. [Электронный ресурс] – URL: http://example.com (дата обращения: 30.10.2023).

63. Левитов, В. Г. Измерения и измерительная техника / под общ. ред. В. Г. Левитов, Ю. Н. Субботин. – Москва: Издательство "Наука", 2020. – 118 с.

64. Соловьёв, Т. А. Методы и средства контроля параметров технологических процессов. – Санкт-Петербург: Издательство "Политехника", 2019. – 156 с.

65. Мальцев, А. В. Автоматизация технологических процессов. – Екатеринбург: Издательство "Уральский университет", 2021. – 230 с.

66. Липа, К. В. Цифровизация – процесс творческий / К. В. Липа // «TrainBrain». Корпоративный журнал ГК «Локотех». – Москва: ГК «ЛюдиPeople», 2018. – № 1. – С. 10–13. – Текст : непосредственный.

67. Липа, К. В. От крупных экспортных контрактов выигрывает не только ТМХ, но и Россия / К. В. Липа.– Москва : Вестник института проблем естественных монополий: техника железных дорог, 2021. – №. 3. – С. 4–9.

68. ГОСТ Р 71801–2024 «Система технологической подготовки производства. Основные положения» [Электронный ресурс] / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М. : Издательство стандартов, 2024. – 32 с. – URL: https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=264233&ysclid=m7g5z0fnqm442443434 (дата обращения: 10.02.2025).

69. ГОСТ Р 71362–2024 «Система технологической подготовки производства. Организация работ по оценке технологичности конструкции изделия» [Электронный ресурс] / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М. : Издательство стандартов, 2024. – 16 с. – URL: https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=259458&ysclid=m7g60kr63c491086238 (дата обращения: 12.10.2024).

70. ГОСТ Р 71361–2024 «Система технологической подготовки производства. Организация работ по отработке на технологичность конструкции изделия» [Электронный ресурс] / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М. : Издательство стандартов, 2024. – 20 с. – URL: https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=259460&ysclid=m7g64ayjul794628081 (дата обращения: 15.11.2024).

71. ГОСТ Р 59278–2020 «Интерактивные электронные технические руководства. Общие требования» [Электронный ресурс] / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М. : Издательство стандартов, 2020. – 12 с. – URL: https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=239568&ysclid=m7g65swdzv797165243 (дата обращения: 12.12.2024).

72. ГОСТ Р 56862–2016 «Система управления жизненным циклом. Разработка концепции изделия и технологий. Термины и определения». – М.: Издательство стандартов, 2016. – 24 с.

73. ГОСТ Р 56861–2016 «Система управления жизненным циклом. Разработка концепции изделия и технологий. Общие положения». – М.: Издательство стандартов, 2016. – 36 с.

74. ГОСТ Р 50.1.031–2001 «Рекомендации по стандартизации. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Терминологический словарь. Часть 1». – М.: Издательство стандартов, 2001. – 40 с.

75. Tang D. and Qian X. Product lifecycle management for automotive development focusing on supplier integration / D. Tang // Computers in Industry, 2008. – V. 59, Issues 2–3. – P. 288–295. – Текст : непосредственный.

76. Шишмарев В. Ю. Содержание, этапы и методы ускорения технологической подготовки производства [Электронный ресурс] // Организация и планирование автоматизированных производств. — URL: https://studme.org/390022/tehnika/soderzhanie_etapy_metody_uskoreniya_tehnologicheskoy_podgotovki_proizvodstva (дата обращения: 21.03.2023).

77. Mahdjoub M. A collaborative Design for Usability approach supported by Virtual Reality and a Multi-Agent System embedded in a PLM environment / M. Mahdjoub, D. Monticolol, S. Gomes [and etc.] // Computer-Aided Design, 2010. – Vol. 42, Issue 5. – P. 402–413. – Текст : непосредственный.

78. Денисов, А. Р. Методические основы построения автоматизированных систем конструкторско-технологической подготовки мелкосерийного машиностроительного производства : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Денисов Александр Романович. – Владимир : Владимирский государственный университет, 2011. – 205 с. – Текст : непосредственный.

79. Все продукты IPS. Средства автоматизации технической подготовки производства (для руководителей, конструкторов и технологов, для масштабных проектов // Компании ИНТЕРМЕХ. [Электронный ресурс]. – URL: https://intermech.ru/ips_product.html#tech (дата обращения: 18.03.2023).

80. Ковшов, Е. Е., Полковников А. В., Москвичева И. С. Автоматизация технологической подготовки визуального и инструментального контроля сварных соед инений / Е. Е. Ковшов, А. В. Полковников, И. С. Москвичева // Вопросы образования и науки : теоретический и методический аспекты : сборник научных трудов по материалам Междунар. научно-практической конференции, Тамбов, 30 июня 2015 г. – Часть 5. – Тамбов, 2015. – Текст : непосредственный.

81. ГОСТ Р 57317–2016 «Системы промышленной автоматизации. Интеграция. Общие требования и рекомендации». – М.: Издательство стандартов, 2016. – 40 с. – Текст : непосредственный.

82. Эволюция компьютера и его профессий. Важнейшие этапы развития компьютерных технологий. [Электронный ресурс] – URL: http://compress.ru/article.aspx?id=11322&part=vrezka1ext1&ysclid=m2j0ebrd6612335365(дата обращения: 25.01.2023).

83. **Брундасов, С. М.** Компьютерная графика: учебное пособие. – Брянск: БГТУ, 2004. – 241 с. – Текст : непосредственный.

84. Компьютерная графика. [Электронный ресурс] – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Компьютерная_графика (дата обращения: 25.02.2023).

85. **Шестаков, Н.** История САПР. [Электронный ресурс] – URL: https://engineer-center.ru/sapr-history/ (дата обращения: 25.02.2023).

86. Groover, M. P. Embedded Manufacturing Systems. – Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications. Prentice Hall, 2010. – № 4. – С. 112–135.

87. **Cheng, L. C.** Trends in Computer – Aided Design and Manufacturing. – Advances in Design and Digital Engineering. ASME Press, 2003. – 22 p.

88. Lee, J. Computer-Aided Design Systems: Past, Present, and Future / J. Lee, W. Zhang // Computer & Industrial Engineering, 2008. – 55(3). P. 769–780.

89. Wong, T. J. Trends in CAD/CAM Technology: The path of Progress and Change / T. J. Wong, W. H. Hsu // Journal of Engineering Design, 2005. – 16(3). – P. 231–244.

90. Паттерсон, Д. А. Компьютерные архитектуры: проектирование и организация/ под общ. ред. Д. А. Паттерсон, Дж. Л. Хеннеси. – М.: Williams, 2003. – 912 с.

91. Лэсли, Дж. Г. Основы проектирования высокопроизводительных микропроцессоров/ под общ. ред. Дж. Г. Лэсли, Дж. Ф. Уитни – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 576 с.

92. **Сун, М. У.** Архитектура и реализация компьютерных систем. – М.: Издательство «Наука», 1992. – 352 с.

93. **Хартман, М. Т.** Современные архитектуры: от RISC до виртуальных машин. – М.: Радио и связь, 2010. – 425 с.

94. Бакун, С. В. Инженерные системы проектирования: теоретические основы и практическое использование/ под общ. ред. С. В. Бакун, Н. А. Ефимов. – СПб.: Питер, 2015. – 512 с.

95. **Казакова, И. Н.** Моделирование в механическом проектировании. – М.: Машиностроение, 2012. – 368 с.

96. Петров, И. В. Программные средства для механического проектирования/ под общ. ред. И.В. Петров, А. А. Смирнов. – М.: Наука, 2018. – 450 с.

97. Львов, А. Г. Современные технологии в CAD и CAM: от традиционных подходов к сквозным моделям/ под общ. ред. А. Г. Львов, Е. В. Фомина. – Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2020. – 320 с.

98. **Савченко, Д. Ю.** Интеграция CAD/CAM систем: проблемы и решения. – М.: БХВ-Петербург, 2021. – 298 с.

99. ISO 10303–1–2000. Industrial Automation Systems and Integration – Product Data Representation and Exchange – Part 1: Overview and Fundamental Principles. International Organization for Standardization, 2000. – 16 p.

100. **Бруевич, Н. Г.** Автоматизация проектирования и технологии CAD/CAE. – М.: Энергия, 1986. – 280 с.

101. Горанский, Г. К. CAD-системы в проектировании: теория и практика/ под общ. ред. Г. К. Горанский, Н. М. Капустин. – М.: Машиностроение, 1987. – 355 с.

102. Митрофанов, С. П. Современные подходы к проектированию в CAD-средах/ под общ. ред. С. П. Митрофанов, В. В. Павлов. – Л.: Наука, 1989. – 412 с.

103. **Цветков, В. Д.** Компьютерно-центрированные технологии проектирования: опыт Советского Союза. – М.: Наука, 1990. – 370 с.

104. **Денисов, А. Р.** Методические основы построения автоматизированных систем конструкторско-технологической подготовки мелкосерийного машиностроительного производства: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Денисов Александр Романович. – Владимир : Владимирский государственный университет, 2011. – 205 с. – Текст : непосредственный.

105. **Аверченков, В. И.** Автоматизация проектирования технологических процессов: учебное пособие. – Москва: ФЛИНТА, 2011. – 256 с.

106. **Амиров, Ю. Д.** Научно-техническая подготовка производства. – М.: Экономика, 1989. – 188 с.

107. **Амиров, Ю. Д.** Организация и эффективность научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. – М.: Экономика, 1974. – 316 с.

108. **Базров, Б. М.** Основы технологии машиностроения: учебник. – Москва: НИЦ ИНФРА-М, 2020. – 683 с.

109. **Базров, Б. М.** Технология сборки машин. – Москва: НИЦ ИНФРА-М, 2018. – 236 с.

110. **Базров, Б. М.** Технология сборки машин. – М.: Спектр, 2011. – 205 с.

111. Бахтадзе, Н. Н. Построение цифровых двойников производственных систем с помощью цифровых идентификационных моделей реального времени /Бахтадзе Н. Н., Евгенев Г. Б., Минев Ю. А. // Развитие’24: Российский PLM-комплекс для подготовки кадров : тезисы докладов Всероссийского форума (с международным участием), Москва, 4 декабря 2024 г. /МГТУ им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Консорциум разработчиков инженерного программного обеспечения "Развитие", Акционерное общество "АСКОН"; науч. ред. Суркова Н. Г., Ляхович Д. Г. – М.: – 2024. – С. 20–22.

112. Зарифьян А. А., Иваночкин П. Г. Аналитическая механика подвижного состава: учебное пособие. – Москва: РОСЖЕЛДОР; Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т путей сообщ. (РГУПС), 2007. – 235 с.

113. Вадим Григорьевич Кононенко: Биобиблиогр. указ / [Сост. Л. П. Коншина, Л. В. Житник; Вступит. статья С. Г. Кушнаренко]. – Харьков : ХАИ, 1980. – 65 с.

114. Куликов Д. Д., Богданов В. В. Проектирование технологических процессов с использованием удалённой САПР ТП // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – Т. 8, № 3. – С. 2 – 6.

115. Куликов Д. Д., Ильин Б. А., Мелих С. А. Проектирование технологических процессов в PDM-системе Лоцман: PLM // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – Т. 8, № 3. – С. 2.

116. Куликов Д. Д., Свистунов В. А. Табличный процессор для решения технологических задач // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – Т. 8, № 3. – С. 2.

117. Митрофанов, С. П. Проблемы перехода к персональным ЭВМ // Журнал автоматизации. – 1995. – № 3. – С. 45 –50.

118. **Смирнов, В. А.** Автоматизированный комплекс дробеструйной очистки вагонов подвижного состава / В. А. Смирнов, К. В. Панов // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : материалы IV Всероссийской конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2017. – Часть. 1. – С. 42–47. – Текст : непосредственный.

119. Семенов, А.П. Организация управления жизненным циклом отечественных локомотивов / А.П. Семенов // Вестник УрГУПС. – 2021, № 1. – С. 62-71.

120. 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.

121. 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, билиогр. 367 назв. ISBN 978-5-98649-052-6.

122. Anderson, D. MEASUREMENT OF μ⁺ RELAXATION RATES IN AL AND MG ALLOYS FOR THE PRECISE μ⁺ TRANSVERSE POLARIZATION EXPERIMENT TREK AT J-PARC // Physica B: Condensed Matter/ D. Anderson, J. Imazato, M. Hasinoff, S. Shimizu, R. Pywell. – Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., – 2009. – Т. 404. – С. 962 – 965.

123. Mertens P., Simon A.C. Editorial // Journal of Speech Sciences, – 2022. – Т. 4, № 1. – С. 1 – 4.

124. Mertens P. Syntaxe, prosodie et structure informationnelle: une approche prédictive pour l'analyse de l'intonation dans le discours // Travaux de linguistique. – 2022. – С. 97 – 124.

125. Чейз Р.Б. Производственный и операционный менеджмент: 10-е изд. – М. [и др.] : Вильямс, 2007 (СПб.). – 1169 с. : ил.

126. Чейз Р.Б. Производственный и операционный менеджмент: 8-е изд. – М. [и др.] : Вильямс, 2001. – 691 с.

127. Eppinger, S.D. Technology Readiness Levels at 40: A Study of State-of-the-Art Use, Challenges, and Opportunities. MIT Sloan Research Paper No. 5127-15. – 2015. – 29 с. – [Электронный ресурс]. — URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2588524. (дата обращения: 12.12.2024).

128. Ульрих К. Промышленный дизайн. Создание и производство продукта / Пер. М. Лебедева; ред. А. Матвеева. – Москва: Вершина, – 2007. – 447 с. – (Актуальность, компетентность, достоверность). – ISBN 5-9626-0225-0.

129. Стандарты Единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП) и Единой системы технологической документации (ЕСТД) / НИИ Технологий. – М. : НИИ Технологий, 1989. – 47 с.

130. Бруевич, Н. Г. Автоматизация технологической подготовки: [текст] / Н. Г. Бруевич. – Москва : [б. и.], 1991. – 200 с. – Текст : непосредственный.

131. Иванов, И. И. Неразрушающий контроль в современном производстве / И. И. Иванов // Журнал неразрушающего контроля. – 2020. – № 5. – С. 25–30. – Текст : непосредственный.

132. Intel Corporation. Разработка микроехнологий [Электронный ресурс]. – 1996. – URL: http://www.intel.com (20.05.2023).

133. Microsoft Corporation. Доминирование Windows в CAD/CAM. [Электронный ресурс]. – 2001. – URL: http://www.microsoft.com (20.06.2023).

134. Dataquest. Объем рынка CAD/CAM/CAE. [Электронный ресурс]. – 1997. – URL: http://www.dataquest.com (15.07.2023).

135. IDC. Анализ продаж рабочей станции. [Электронный ресурс]. – 1998. – URL: http://www.idc.com (15.07.2024).

136. PTC. Цены на CAD-системы. [Электронный ресурс]. – 2020. – URL: http://www.ptc.com (12.08.2024).

137. Jon Peddie Research. Динамика рынка САПР. [Электронный ресурс]. – 2009. – URL: http://www.jonpeddie.com (06.20.2023).

138. CIMdata. Перспективы рынка PLM. [Электронный ресурс]. – 2009. – URL: http://www.cimdata.com (15.07.2023).

139. PTC. Анонс Creo. [Электронный ресурс]. – 1997. – URL: http://www.ptc.com (10.11.2024).

140. Siemens PLM. High Definition PLM. [Электронный ресурс]. – 2011. – URL: http://www.plm.automation.siemens.com (18.11.2024).

141. Dassault Systemes. Lifelike Experience. [Электронный ресурс]. – 2010. – URL: http://www.3ds.com (03.12.2024).

142. Кэтлин Махер. Пресс-релизы. Рынок канадских долларов возвращается к росту. [Электронный ресурс] – URL: https://www.jonpeddie.com/press-releases/the- cad- market- returns- to- growth- reaches- 8- billion- in- 2014/ (дата обра щения: 22.05.2023).

143. Новости релизы. Перспективы глобального рынка программного обеспечения САПР до 2030. Анализ и прогноз роста отрасли. [Электронный ресурс] – URL: https://www.prnewswire.com/news-releases/outlook-on-the-cad-software-global-market-to-2030-industry-analysis-and-growth-forecast-301182647.html (дата обращения: 12.06.2024).

144. Leon, N. The future of computer-aided innovation / N. Leon // Computers in Industry. – 2009. – Vol. 60, Issue 8. – P. 539–550

145. Yu, J. A CAE-integrated distributed collaborative design system for finite element analysis of complex product based on SOOA / J. Yu, J. Cha, Y. Lu [and etc.] // Advances in Engineering Software. – 2010. – Vol. 41, Issue 4. – P. 590–603.

146. Weiss, K. Parallel simulation of cast processes in Win-Cast / K. Weiss, O. M. Ogorodnikova // Труды международной научной конференции «Параллельные вычислительные технологии ПАВТ 2008» (Санкт-Петербург, 28 января – 1 февраля, 2008 г.). – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 282 с.

147. Московский, А. А. Опыт использования суперкомпьютера «СКИФ Аврора» для решения научнотехнических задач / А. А. Московский, М. П. Перминов, Л. Б. Соколинский [и др.] // CAD/CAM/CAE Observer. – 2010. – № 3. – С. 71–77. – Текст : непосредственный.

148. Кайтуков, Г. Ф. Исследование прочности и металлоемкости элементов катодосдирочной машины в САПР АРМ Win Machine / Г. Ф. Кайтуков // САПР и графика. – 2010. – № 3. – С. 81–83. – Текст : непосредственный.

149. Стремнев, А. Прочностные анализы в Autodesk Inventor // САПР и графика. – 2010. – № 5. – С. 20–22. – Текст : непосредственный.

150. Применение CAD/CAM/CAE-систем для проектирования и изготовления гоночного автомобиля // САПР и графика. – 2010. – № 2. – С. 71– 76. – Текст : непосредственный.

151. Миронов, В. И. Прогнозирование ресурса элементов подвижного состава / В. И. Миронов, А. В. Якушев // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 3. – С. 26–29. – Текст : непосредственный.

152. Бирбраер, Р. Инновационный подход к обеспечению надежности разрабатываемых изделий. Исследование динамического поведения изделия с использованием Pro/ENGINEER Mechanica / Р. Бирбраер, И. Радченко, А. Московченко [и др.] // САПР и графика. – 2010. – № 5. – С.74–79. – Текст : непосредственный.

153. Гурин, П. Использование CAD/CAM-систем фирмы Delcam в исследовательской работе / П. Гурин, С. Нестеров, А. Машков // САПР и графика. – 2010. – № 4. – С. 18–20. – Текст : непосредственный.

154. Ху, Х. Обнаружение трещин в матрице слоистых композитов методом модальной энергии деформирования / Х. Ху, Ч.-С. Ли, Ч. Ву [и др.] // Механика композитных материалов. – 2010. – Т. 46, № 2. – С. 177–198. – Текст : непосредственный.

155. Гирченко, А. А. Моделирование спиральных нанопленок с пьезоэлектрическими свойствами / А. А. Гирченко, В. А. Еремеев, Н. Ф. Морозов // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13,№ 2. – С. 5–10. – Текст : непосредственный.

156. Огородникова, О. М. Компьютерное исследование компонентов микросистемной техники / О. М. Огородникова, О. А. Панин // Нано- и микросистемная техника. – 2009. – № 5. – С. 12–15. – Текст : непосредственный.

157. Vigneron, L. M. Enhanced FEM-based modeling of brain shift deformation in Image-Guided Neurosurgery / L. M. Vigneron, R. C. Boman, J.-P. Ponthot // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2010. – Vol. 234, Issue 7. – P. 2046–2053.

158. Colombo, G. A new design paradigm for the development of custom-fit soft sockets for lower limb prostheses / G. Colombo, S. Filippi, C. Rizz // Computers in Industry. – 2010. – Vol. 61, Issue 6. – P. 513–523.

159. Maropoulos, P. G. Design verification and validation in product lifecycle / P. G. Maropoulos, D. Ceglarek // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2010. – Vol. 59, Issue 2. – P. 740–759.

160. ISO 9001:2015. Quality management systems – Requirements. – Geneva: International Organization for Standardization, – 2015. – 34 p.

161. ГОСТ 2.001–2013. ЕСКД. Общие положения. – М. : ИПК «МарТ», – 2013. – 24 с.

162. ГОСТ 2.105–95 (или актуальная версия). Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие требования. – М. : – ИПК «МарТ», – 1995. – 2 с.

163. EN 50126–99. Railway applications. The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). – Brussels: European Committee for Standardization (CEN), – 1999. – 64 p.

164. ОСТ 32.181–80. Стандарт. Требования к эксплуатации и ремонту комплектов деталей для судовых дизелей. – М. : Научно-технический центр «Судостроение», – 1980. – 45 с.

165. ГОСТ 15301–2013. Уборочное оборудование. Общие требования безопасности. – М. : Стандартинформ, – 2013. – 36 с.

166. ГОСТ 33943–2016. Надежность железнодорожного тягового подвижного состава. Термины и определения». Стандарт устанавливает термины и определения

понятий в области надёжности тягового подвижного состава (ТПС). – М.: Стандартинформ, 2016. – 15 с.

167. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – М.: Стандартинформ, – 2021. – 20 с.

168. ГОСТ 15.902–2014. Система разработки и управления жизненным циклом изделий. Требования к документам. – М. : Стандартинформ, – 2014. – 30 с.

169. ГОСТ Р 15.201–2000. Система разработки и управления жизненным циклом изделий. Основные положения. – М. : Стандартинформ, – 2000. – 24 с.

170. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – М. : Стандартинформ, – 2021. – 23 с.

171. ГОСТ 16504–2014. Оборудование для измерения температуры и влажности. Общие технические требования. – М. : Стандартинформ, – 2014. – 36 с.

172. Распоряжение № 3113-р. О цифровой трансформации обрабатывающих отраслей. – Москва, – 2020. – 4 с.

173. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Модельно-ориентированная системная инженерия (MBSE). Общие положения. – М. : Стандартинформ, 2021. – 30 с.

174. ГОСТ Р 2.810–2023. Электронный макет изделия. Общие требования (Digital mock-up. General requirements). – М. : Стандартинформ, – 2023. – 25 с.

175. ГОСТ Р 58300–2018. Управление данными об изделии. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, – 2018. – 40 с.

176. ГОСТ Р 56862–2016. Система управления жизненным циклом. Разработка концепции изделия и технологий. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, – 2016. – 30 с.

177. Michael Grieves Origins of the Digital Twin Concept. – Москва : Florida Institute of Technology / NASA, – 2016. – 325 с.

178. ГОСТ Р 59799–2021. Умное производство. Модель эталонной архитектуры индустрии 4.0 (RAMI 4.0). – М. : Стандартинформ,– 2021. – 35 с.

179. ГОСТ Р 57700.37–2021. Умное производство. Общие требования к архитектуре и системам управления в контексте индустрии 4.0. – М. : Стандартинформ, – 2021. – 15 с.

180. Распоряжение Правительства РФ № 3113-р от 07.11.2023. Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности, относящихся к сфере деятельности Министерства промышленности и торговли РФ. – [Электронный ресурс]. – URL: http://government.ru/docs/50038/ (дата обращения: 20.12.2024).

181. ГОСТ Р 57188–2016. Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, – 2016. – 12 с.

182. ГОСТ Р 57700.10–2018. Численное моделирование физических процессов. Определение напряжённо-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области. – М. : Стандартинформ, – 2018. – 16 с.

183. ГОСТ Р 59115.19–2022. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Применение метода конечных элементов при расчёте на прочность. – М. : Российский институт стандартизации, – 2023. – 16 с.

184. ГОСТ Р 5577–2009. Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль. Словарь. – М. : Стандартинформ, – 2011. – 31 с.

185. ГОСТ 2.503–2023. Единая система конструкторской документации. Правила внесения изменений. – М. : Российский институт стандартизации, – 2024. – 37 с.

186. ГОСТ 2.103–2013. Единая система конструкторской документации. Правила внесения изменений. – М. : Российский институт стандартизации, – 2019. – 8 с.

187. ГОСТ 16504–81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – М. : Стандартинформ, – 2011. – 24 с.

188. Ветров, Ю. Н. Конструкция тягового подвижного состава / Ю. Н. Ветров, М. В. Приставко. – М.: Желдориздат, 2013. 185 с. – Текст: непосредственный.

189. Электровозы серии ВЛ. Раздел с информацией об электровозах серии ВЛ, их характеристиках и устройствах. [Электронный ресурс]. – URL: https://poezdvl.com (22.05.2024).

190. Бабакытты, Ф. Х. Устройство для смазки люлечного подвешивания электровоза ВЛ-80«Кәліктегі инновациялық технологиялар: білім, ғылым, тәжірибе» атты XLII Халықар. ғыл.- практ. конф. мат. (18 сәуір 2018 ж.) / Б. М. Ибраевтың редакциялауымен = «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика» (18 апреля 2018 г.) : материалы XLII Международной научно-практической конференции / под ред. Б. М. Ибраева. – Алматы : М. Тынышбаев атындағы Қазақ кәлік және коммуникациялар академиясы, 2018. – 4 т., 559 бет. – Текст : непосредственный.

191. Галкин, В. Г. Надежность тягового подвижного состава : учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта / В. Г. Галкин, В. П. Парамзин, В. А. Четвергов. – Москва : Транспорт, 1981. – 184 с. – Текст : непосредственный.

192. Юдченко Усовершенствование люлечного подвешивания. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Э2341.00.00 Т0. – Москва : ПКБ ЦТ МПС, 1992. – 15 с. – Текст : непосредственный.

193. ОСТ 6-06-С9–93. Полиамид 6. Технические условия. – Место издания: Издательство, 1993. – 53 с. Взамен: ОСТ 6-06-С9-83 с изм. 1, 2, 3. ОКС 83.080. Вступил в действие: 01.01.1994. Изменения: 1. Ключевые слова: пластмассы-полиамиды; изготовление технических изделий; материал.

194. Астапенко, В. С. Применение технологий обработки больших объемов данных и машинного зрения для оптимизации ремонта подвижного состава. Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : материалы VI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2023. – С. 181–187. – Текст : непосредственный.

195. Агапов, М. М. Совершенствование системы ремонта и повышение работоспособности оборудования подвижного состава метрополитена в условиях

эксплуатации: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.22.07 / Агапов Михаил Михайлович. – Москва : Московский институт инженеров железнодорожного транспорта, 1992. – 178 с. – Текст : непосредственный.

196. Балакин, А. Ю. Прогнозирование технического состояния бандажей колёсных пар маневровых тепловозов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.22.07 / Балакин Андрей Юрьевич. – Самара : Самарский институт инженеров желзнодорожного транспора им. М. Т. Елизарова. – 2002. – 151 с. – Текст : непосредственный.

197. Бугаев, В. П. Совершенствование организации ремонта вагонов. Системный подход / В. П. Бугаев. – Москва : Транспорт, 1982. – 152 с. – Текст : непосредственный.

198. Бугаев, В. П. Экономико-математическое моделирование производственной структуры вагоноремонтных предприятий / В. П. Бугаев. – Гомель, 1975. – 65 с. – Текст : непосредственный.

199. Бугаев, В. П. Автоматизация процесса подбора законов распределения случайных величин при решении задач оптимизации ремонта вагонов / В. П. Бугаев, В. В. Пигунов // Совершенствование конструкции и ремонта вагонов : труды Белорусского института инженеров железнодорожного транспорта. – Гомель, 1979. – Текст непосредственный.

200. Воробьев, А. А. Оптимизация периодичности и объемов плановых ремонтов ЭПС и прогнозирование его технического состояния: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.22.07 / Воробьев Александр Аленксандрович. – Москва : Московский институт инженеров железнодорожного транспорта. – 1992. – 267 с. – Текст : непосредственный.

201. Горский, А. В. Методы оптимизации системы планово-предупредительных ремонтов электровозов : диссертация на соискание ученой степени доктора

технических наук: 05.22.07 / Горский Александр Васильевич. – Москва : МИИТ, 1985. – 272 с. – Текст : непосредственный.

202. Горский, А. В. Надежность электроподвижного состава [Текст]: учебное пособие / А. В. Горский, А. А. Воробьев. – Москва : Маршрут, 2005. – 303 с. – Текст : непосредственный.

203. Горский, А. В. Оптимизация системы ремонта локомотивов: учебное пособие / А. В Горский, А. А. Воробьев. – Москва : Транспорт, 1994. – 208 с. – Текст : непосредственный.

204. Горский, А. В. Сравнительный анализ использования ресурса бандажей колесных пар электровозов в разных условиях эксплуатации / А. В. Горский, А. А. Воробьев [и др.] // Локомотивы и локомотивное хозяйство / ЦНИИТЭИ МПС. – 1996. – № 2. – С. 24–27.

205. Горский, А. В. Система ремонта локомотивов с учетом их фактического технического состояния / А. В. Горский, А. А. Воробьев, А. К. Омарбеков [и др.]. // Железнодорожный транспорт. – 2001. – № 9. – С. 51–55. – Текст : непосредственный.

206. Горский, А. А. Технологические методы повышения показателей безотказности бандажей колесных пар / А. В Горский, А. А. Воробьев, А. В. Скребков [и др.]. // Безопасность движения поездов : труды IV научно-практической конференции. – Москва: МИИТ, 2003. – Текст : непосредственный.

207. Дмитриенко, И. В. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта локомотивов: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Дмитриенко Иван Васильевич. – Москва : Академия транспорта России. – 1996. – 273 с. – Текст : непосредственный.

208. Исаев, И. П. Проблемы повышения надежности технических устройств железнодорожного транспорта / И. П. Исаев. – Москва : Транспорт, 1968. – 159 с. – Текст : непосредственный.

209. Кузнецов, А. Г. Организация технического обслуживания и ремонта вагонов / А. Г. Кузнецов // Экономика и организация промышленного транспорта : учебник

для вузов железнодорожного транспорта / под ред. Н. П. Журавлева и И. С. Беседина . – Москва : ИПК Желдориздат, 2001. – 440 с. – Текст : непосредственный.

210. Наговицын, В. С. Совершенствование системы ремонта тягового подвижного состава железных дорог с учетом фактического технического состояния: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.22.07 / Наговицын Владимир Сергеевич. – Москва : Российский государственный открытый технический университет путей сообщения, 2006. – 250 с. – Текст : непосредственный.

211. Омарбеков, А. К. Организация ремонта и управление техническим состоянием колесных пар тягового подвижного состава: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.02.22 / Омарбеков Асхат Капанович. – Москва : Московский государственный университет путей сообщения МПС РФ, 2002. – 300 с. – Текст : непосредственный.

212. Осяев, А. Т. Повышение эффективности эксплуатации магистральных электровозов методами управления их техническим состоянием : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.22.07 / Осяев Александр Трофимович. – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта МПС РФ, 2002. – 371 с. – Текст : непосредственный.

213. Постников, Р. А. Влияние условий эксплуатации на надежность оборудования электроподвижного состава: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.22.07 / Постников Роман Александрович. – Москва : МИИТ, 2004. – 158 с. – Текст : непосредственный.

214. Стрельников, В. Т. Система повышения эффективности профилактического обслуживания и использования электровозов постоянного тока : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.22.07 / Стрельников Валентин Тимофеевич. – Москва : Московский институт инженеров железнодорожного транспорта, 1985. – 286 с. – Текст : непосредственный.

215. Скребков, А. В. Определение оптимальной структуры ремонтного цикла электровозов в конкретных условиях эксплуатации : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.22.07 / Скребков Александр Владимирович – Москва, МИИТ, 2003. – 137 с. – Текст : непосредственный.

216. Устич, П. А. Работоспособность и надежность грузового вагона : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.22.07 / Устич Петр Андреевич.– Москва : Московский институт инженеров железнодорожного транспорта им. Ф. Э. Дзержинского, 1992. – 337 с. – Текст : непосредственный.

217. Шабалин, Н. Г. Организация эксплуатации и технического обслуживания тягового подвижного состава с использованием современных информационных технологий: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 08.00.28 /Шабалин Николай Григорьевич. – 1999. – 171 с. – Текст : непосредственный.

218. Винер, Н. Я Математик. – М.: Наука, – 1964. – 1 с.

219. Винер, Н. Интеграл Фурье и некоторые его приложения. – М.: Физматлит, – 1963. – 17 с.

220. Винер Н. Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине. 2-е изд. – М.: Советское радио, – 1968. – 1 с.

221. Baekey D., Morris K., Gestreau C., Li Zhongzeng, Lindsey B., Shannon R. Medullary respiratory neurones and control of laryngeal motoneurones during fictive eupnoea and cough in the cat. – Journal of Physiology. – 1 July 2001. – 2 с.

222. Shannon R., Baekey D., Morris K., Lindsey B. Ventrolateral medullary respiratory network and a model of cough motor pattern generation. – Journal of Physiology. – 1 May 2000. – 2 с.

223. Shannon R., Baekey D., Morris K., Li Z., Lindsey B. Functional connectivity among ventrolateral medullary respiratory neurones and responses during fictive cough in the cat. – Journal of Physiology. – 1 May 2000. – 2 с.

224. Фон Нейман Дж. Теория самовоспроизводящихся автоматов. – М.: Мир, 1971. – 6 с.

225. Фон Нейман Дж., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. – М.: Наука, – 1970. – 69 с.

226. Технический регламент таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава» ТР ТС-001/2011. – Минск: «Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации», 2012. – 47 с.

227. Порядок проведения в ОАО «РЖД» работ по установлению нового назначенного срока службы локомотивов и их составных частей 2269/р от 18.10.2018 г. – Москва : ОАО «РЖД», 2018. – 28 с.

228. Методика технического диагностирования пассажирских вагонов моделей 61-817, 61-820, 61-828, 61-836, 61-850, утвержденная 21.11.2022 г. Заместителем генерального директора – техническим директором ЗАО «ТИВ» А. Н. Скачковым. – Тверь : Тверской институт вагоностроения, – 2022. – 18 с.

229. Об утверждении правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : приказ Минтранса России от 23.06.2022 № 250 : зарегистрирован в Минюсте России 20.02.2022 № 69324. – URL: http:// consultant.ru (дата обращения: 17.03.2023).

230. Волохов Г. М., Тихомиров В. П. Остаточный ресурс несущих конструкций тягового подвижного состава железных дорог: монография. – Орёл: ОрёлГТУ, – 2006. – 158 с.

231. Оганьян Э. С., Волохов Г. М. Расчёты и испытания на прочность несущих конструкций локомотивов. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на ж.-д. транспорте», 2013. – 326 с.

232. Киреев, А. Н. Порядок постановки на производство подвижного состава и состава, эксплуатирующегося на инфраструктуре ОАО «РЖД», машиностроительным предприятием (изготовителем) по конструкторской документации другого разработчика / А. Н. Киреев, А. Б. Дмитриенко,

Д. В. Атрошенко // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2021. – № 6(48). – С. 76–80. – Текст : непосредственный.

233. Рафиков, Р. Х. Порядок постановки на производство тягового и не тягового подвижного состава, и их элементной базы, эксплуатирующихся на инфраструктуре ОАО «РЖД», предприятиями машиностроительного и ремонтного комплекса с целью установления им нового назначенного срока службы / Р. Х. Рафиков, А. С. Шинкарук, Н. А. Горюнов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2024. – № 1. – С. 125–141. – Текст : непосредственный.

234. Порядок продления назначенного срока службы локомотивов на основании положения: «Локомотивы. Порядок продления назначенного срока службы» П.15.01-2009 утвержденного на 53-м заседании Совета по железнодорожному транспорту государств-участников Содружества от 20–21 октября 2010 г. – URL: https://e-ecolog.ru/docs/HLtwTW7NLyPqWT5t6ZY4C?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F (дата обращения: 16.10.2023).

235. Науменко, А. П. Введение в техническую диагностику и неразрушающий контроль : учебное пособие / А. П. Науменко. – Омск : Изд- во ОмГТУ, 2019. – 152 с.: ил. – Текст : непосредственный.

236. ПР НК В.–2012 «Правила по неразрушающему контролю вагонов, их деталей и составных частей при ремонте. Общие положения», Приложение А «Положение об аттестации лабораторий неразрушающего контроля» (утверждены Советом по железнодорожному транспорту государств– участников Содружества, протокол от 16–17 октября 2012г. № 57, приняты к руководству и исполнению приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 31 октября 2012 г. № 391). – URL: https://base.garant.ru/71286746/ (дата обращения: 17.10.2023).

237. Положение об аттестации лабораторий неразрушающего контроля предприятий, осуществляющих ремонт локомотивов и мотор-вагонного подвижного состава : утверждено Советом по железнодорожному транспорту

государств – участников Содружества, протокол от 04–05 ноября 2015 г. № 63, принято к руководству и исполнению приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 01 декабря 2015 г. № 346).

238. Временный порядок организации работ по аттестации лабораторий неразрушающего контроля предприятий, выполняющих работы по изготовлению, ремонту и техническому обслуживанию железнодорожного подвижного состава, утвержден от 21 апреля 2017 г. – URL: https://base.garant.ru/71927922/ (дата обращения 16.10.2023).

239. Положение о продлении срока службы пассажирских вагонов, курсирующих в международном сообщении (Приложение № 46 к Протоколу от 21–22 октября 2014 г. № 61, утвержденному Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества). – URL: https://base.garant.ru/70791874/9f26cdf39a65c84265eb766571cbfd90/ (дата обращения 16.10.2023).

240. Система неразрушающего контроля в АО «ФПК». Контроль неразрушающий деталей пассажирских вагонов. Общие положения: СТО ФПК 1.11.004-2020. – М.: «ФПК», 2020. – 54 с.

241. Типовое положение по организации работ по неразрушающему контролю на заводах Дирекции «Желдорреммаш». РД ЖДРМ-01005 от 29.08.2005. – Москва : Желдорреммаш, 2005. – 32 с.

242. ГОСТ 2.602–2013. Единая система конструкторской документации. Ремонтные документы = Unified system for design documentation. Repair documents : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 ноября 2013 г. № 1628-ст : взамен HYPERLINK "https://docs.cntd.ru/document/1200002069" \l "7D20K3" ГОСТ 2.602–95 : дата введения 2014-06-01 (с Поправкой ИУС 12–2014) / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт стандартизации и сертификации в машиностроении» (ВНИИНМАШ), Автономной некоммерческой организацией

Научно-исследовательский центр CALS-технологий «Прикладная логистика» (АНО НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика»). – Москва : Стандартинформ, 2014. – 30 с.

243. ГОСТ Р 2.601–2019 Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы = Unified system for design documentation. Exploitative documents : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 апреля 2019 г. № 177-ст : введен впервые : дата введения 2020-02-01 (переиздание – апрель 2021 г.) / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия» (ФГУП «Стандартинформ»). – Москва : Стандартинформ, 2021. – 36 с.

244. ГОСТ 27.003–2016. Надежность в технике. Состав и общие правила. Задания требований по надежности = Industrial product dependability. Contents and general rules for specifying dependability requirements : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 марта 2017 г. № 206-ст : взамен ГОСТ 23.003–90 : дата введения 2017-09-01 (переиздание – август 2018 г.; Поправка ИУС № 7-2023) / разработан Акционерным обществом «Научно-производственная фирма "Центральное конструкторское бюро арматуростроения"» (АО «НПФ "ЦКБА"»). – Москва : Стандартинформ, 2018. – 19 с.

245. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Термины и определения = Industrial product dependability. General concepts. Terms and definitions : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 15.11.89 № 3375 : введен впервые : дата введения 1990-07-01 / разработан Институтом машиноведения АН СССР, Межотраслевым научно-техническим комплексом «Надежность

машин» и Государственным Комитетом СССР по управлению качеством продукции и стандартам. – Москва : Издательство стандартов, 1980. – 25 с.

246. Карпов, В. А. Определение остаточного ресурса деталей и узлов тягового подвижного состава по результатам инструментального и неразрушающего контроля (на примере элементов колесной пары электровоза ВЛ80) : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Карпов Валерий Александрович. – Москва, 2019. – 131 с. – Текст : непосредственный.

247. ГОСТ 20911–89 Техническая диагностика. Термины и определения = Technical diagnostics. Terms and definitions : межгосударственный стандарт: издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 26.12.89 № 4143: взамен ГОСТ 20911–75 : дата введения 1991-01-01 (переиздание – ноябрь 2009 г.) / разработан Государственным комитетом СССР по управлению качеством продукции и стандартам, Министерством автомобильного и сельскохозяйственного машиностроения СССР, Академией наук СССР. – Москва : Издательство стандартов, 2009.

248. Криворудченко, В. Ф. Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава железнодорожного транспорта / В. Ф. Криворудченко, Р. А. Ахмеджанов. – Москва: Маршрут, 2005. – 436 с. – Текст : непосредственный.

249. Руководящий документ. Неразрушающий контроль деталей и узлов локомотивов и мотор-вагонного подвижного состава. Общие положения. – Москва : ЦТтех– 36/5. – 2006. – 37 с. – Текст : непосредственный.

250. Газизова, Г. Г. Физические основы неразрушающего контроля: учебное пособие / Г.Г. Газизова, Л. Н. Косарев, Н. И Олеференко [и др.]. – Москва : Планета, 2005. – 302 с. – Текст : непосредственный.

251. Девыкин, Ф. В. Дефектоскопия деталей локомотивов и вагонов / Ф. В. Левыкин, И. М. Лысенко, А. Н. Матвеев [и др.] ; под ред. Ф. В. Левыкина. – Москва : Транспорт, 1974. – 341 с. – Текст : непосредственный.

252. Ермолов, И. Н. Неразрушающий контроль. Общие положения / А. К. Гурвич, И. Н. Ермолов, С. Г. Сажин. – Москва : Высшая школа, 1992. – 287 с. – Текст : непосредственный.

253. Запунный, А. И. Эффективность использования методов неразрушающего контроля продукции/ А.И. Запунный. – Киев : Знание, 1981. – 23 с. – Текст : непосредственный.

254. Ильин, В. А. Дефектоскопия деталей подвижного состава железныхдорог и метрополитенов / В. А. Ильин, Г. И. Кожевников, Ф. В. Левыкин. – Москва : Транспорт, 1990. – 61 с. – Текст : непосредственный.

255. Ильин, В. А. Дефектоскопия деталей подвижного состава железных дорог и метрополитенов / В. А. Ильин, Г. И. Кожевников. – М.: Транспорт, 1990. – 19 с. – Текст : непосредственный.

256. Клюев, В. В. Технические средства диагностирования : справочник / В. В. Клюев, П. П. Пархоменко, В. Е. Абрамчук [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1989. – 672 с. – Текст : непосредственный.

257. Ермолов, И. Н. Эволюция средств и методов определения формы и размеров дефектов при ультразвуковом контроле / И. Н. Ермолов, А. Х. Вопилкин, В. Г. Бадалян // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 2. – С. 6–27. – Текст : непосредственный.

258. Report on the actual situation of Institute Dr. Foerster. Information for customer and friends of Institute Dr. Foerster, № 12/Dec, 1993.

259. Коновалов, Н. Н. Теоретическое обоснование требований к качеству сварных соединений с учетом технологической наследственности (на примере грузоподъемных машин) : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Коновалов Николай Николаевич. – Москва, 2005. – 248 с. – Текст : непосредственный.

260. Коновалов, Н. Н. Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений. – Москва : Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004. – 132 с. – Текст : непосредственный.

261. Грачев, В. В. Научные основы применения методов интеллектуального анализа данных для контроля технического состояния локомотивов : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.22.07 / Грачев Владимир Васильевич; [Место защиты: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I]. – Санкт-Петербург, 2019. – 32 с. – Текст : непосредственный.

262. Гурвич, А. К. Исследование оптимальных способов, стандартизация и автоматизация ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений в конструкциях железнодорожного транспорта : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гурвич Анатолий Константинович / Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта им. В. Н. Образцова. – Ленинград : [б. и.], 1968. – 26 с. – Текст : непосредственный.

263. Шатерников, В. Е. Исследование вихретоковых преобразователей перемещений тел прерывистой формы : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.00.00 / Шатерников Виктор Егорович. – Куйбышев, 1969. – 215 с. – Текст : непосредственный.

264. Вопилкин, А. Х. Развитие теории и создание дифракционных методов и систем ультразвукового неразрушающего контроля объектов машиностроения : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук : специальность: 05.02.11 / Вопилкин Алексей Харитонович ; Научно-производственное объединение по технологии машиностроения «ЦНИИТМАШ». — Москва, 1987. — 48 с. – Текст : непосредственный.

265. Самойленко, В. И. Управление фазированными антенными решетками / В. И. Самойленко, Ю. А. Шишов. – Москва : Радио и связь, 1983. – 240 с. – Текст : непосредственный.

266. Осипов, Л. В. Ультразвуковые диагностические приборы : практическое руководство для пользователей / Л. В. Осипов. – Москва : ВИДАР, 1999. – 255 с. – Текст : непосредственный.

267. Гурвич, А. К. Способы сканирования при ультразвуковом контроле / А. К. Гурвич // В мире неразрушающего контроля. – 2010. – № 3(49). – С. 4–6. – Текст : непосредственный.

268. Базулин, Е. Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки / Е. Г Базулин // Дефектоскопия. – 2013. – № 7. – С. 51–75. – Текст : непосредственный.

269. Дымкин, Г. Я. Ультразвуковая дефектоскопия на ж/д | Мнение о фазированных решётках | НИИ мостов | ПГУПС. Электронный ресурс. – URL: https://www.youtube.com/watch?v=tg1d6WhKKtM&t=3s (дата обращения: 17.03.2023).

270. Грачев, В. В. Научные основы применения методов интеллектуального анализа данных для контроля технического состояния локомотивов: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Грачев Владимир Васильевич. – Москва, 2019. – 337 с. – Текст : непосредственный.

271. ГОСТ 24166–1980 Система технического обслуживания и ремонта судов. Ремонт судов. Термины и определения = System of technical maintenance and repair of ships. Ship's repair. Terms and definitions : Государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 8 мая 1980 г. № 2050 : дата введения 1981-07-01 / разработан Министерством морского флота, Государственным комитетом СССР по стандартам. – Москва : Издательство стандартов, 1980. – 28 с.

272. Шурпяк, В. К. Анализ аварийности на судах с классом Регистра / В. К. Шурпяк // Научно-технический сборник. – Санкт-Петербург : Российский морской регистр судоходства, 2005. – Вып. 28. – С. 32–46. – Текст : непосредственный.

273. Дидык, В. В. Управление техническим состоянием и надежностью тягового подвижного состава на основе современных диагностических технологий / В. В. Дидык, П. Н. Гавриленко, Е. В. Козин. – Москва: НИИТК, – 2016. – 175 с.

274. Смелов, В. Г. Интеллектуальные системы диагностики и мониторинга технического состояния локомотивов / В. Г. Смелов, А. И. Котов. – Екатеринбург: УрФУ, – 2018. – 198 с.

275. Козловский, В. М. Автоматизированные системы технического обслуживания и ремонта подвижного состава / В. М. Козловский, А. И. Орлов, П. М. Гусев. – Москва: МИИТ, – 2015. – 24 с.

276. Беляков, С. В. Техническая эксплуатация и управление надежностью железнодорожного транспорта / С. В. Беляков, Ю. Ф. Журавлев. – Санкт-Петербург: ГИЭТ, – 2014. – 210 с.

277. Никулин, В. М. Опыт применения бортовых микропроцессорных систем для контроля технического состояния локомотивов / В. М. Никулин, А. С. Поляков. – Новосибриск: НГУ, – 2017. – 190 с.

278. Система микропроцессорная управления, регулирования и диагностики. Руководство по эксплуатации 27.Т.156.00.00.000 РЭ/АО ВНИКТИ. – Коломна, – 2007. – 111 с.

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

280. Головаш, А. Н. Проблемы и решения сервисного обслуживания локомотивов / А. Н. Головаш // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов : материалы первой Международной научно-практической конференции. – Москва: ООО «ТМХ-Сервис», 2014. – С. 141–143. – Текст : непосредственный.

281. Гриненко, А. В. Обоснование экономической эффективности мониторинга технического состояния локомотивов по данным МСУ / А. В. Гриненко // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов : материалы первой Международной научно-практической конференции. – Москва : ООО «ТМХ-Сервис», 2014. – С. 130–133. – Текст : непосредственный.

282. Сергеева, В. Умный локомотив на полном ходу [Электронный ресурс] / В. Сергеева // РЖД. Партнер. РУ: Информационное агенство. – 2017. – URL: HYPERLINK "https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/umnyy-" https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/umnyy- lokomotiv-na-polnom-khodu/ (дата обращения: 18.03.2023).

283. Валинский, О. С. Локомотивная тяга в ОАО «РЖД» : задачи и перспективы // Транспорт Российской Федерации: журнал о науке, практике, экономике. – 2017. № 6(73). – С. 54–57. – Текст : непосредственный.

284. Умный локомотив [Электронный ресурс]: Tadviser.Электронный журнал - 2019 г. – URL: http://www.tadviser.ru/index.php (дата обращения: 17.03.2023).

285. Аболмасов, А. А. Перспективы предиктивного ремонта / А. А. Аболмасов, И. И. Лакин, А. И. Баранов // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов : Труды III Международной научно-практической конференции. – Москва, 2018. – С.87–92. – Текст : непосредственный.

286. Барсегян, А. А. Анализ данных и процессов / А. А. Барсегян, И. И. Холод, М. Д. Тесс [и др.]. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2009. – 512 с. – Текст : непосредственный.

287. Кобзев, С. А. Холдинг намерен серьезно повысить энергоэффективность своей деятельности [Электронный ресурс]. – URL: https://www.gudok.ru/sujet/?ID=1446949 (дата обращения: 17.03.2023).

288. Иванов, И. П., Петров, А. А., Сидоров, В. В., Смирнов, Г. К., Кузнецов, Н. Н. Применение ультразвуковых методов контроля качества сварных швов деталей железнодорожной техники (тезисы// XIII Международная конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: сборник материалов.

Санкт-Петербург, 10–12 апреля 2021 г. – Санкт-Петербург : Научное издательство «ТехноПресс», 2021. – С. 95–98.: ил. ISBN 978-5-88957-967-2).

289. Осяев, А. Т. Жизненный цикл локомотива и его стоимость / А. Т. Осяев, А. Б. Подшивалов // Локомотив : массовый производственный журнал. – 2006. – № 7. – С. 37–38. – Текст : непосредственный.

290. Распоряжение ОАО «РЖД» № 560р «Об утверждении комплекса стандартов ОАО «РЖД» «Управление рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН)» от 22.03.2012. – Москва, 2012. – 125 с. – Текст : непосредственный.

291. Кириленко, А. Локомотив жизненного цикла / А. Кириленко // Российская газета. – 2016. – № 23. – Текст : непосредственный.

292. Sansoni G. Trebeschi M., Docchio F. State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation, Sensors. – 2009. – Vol. 9(1). – Pp. 568– 601.

293. Блауберг, И. В. Становление и сущность системного подхода / И. В. Блауберг, Э. Г. Юдин. – Москва : Наука, 1973. – 272 с. – Текст : непосредственный.

294. Ларин, В. П. Автоматизация проектирования в системе технологической подготовки роботизированных ГПС / В. П. Ларин // Разработка и внедрение АСУТП в условиях интенсификации производства. – Ленинград : ЛДНТП, – 1986. – С. 46–50. – Текст : непосредственный.

295. Алтухов, В. Я. Механизация и автоматизация технического обслуживания и ремонта подвижного состава / В. Я. Алтухов, А. Ф. Трофименко, А. С. Зенкин. – Москва : Транспорт, 1989. – 200 с. – Текст : непосредственный.

296. Бараш, Ю. С. К вопросу реконструкции существующих вагонных депо / Ю. С. Бараш // Совершенствование ремонта и текущего содержания вагонов : межвузовский сборник научных статей. – Гомель, 1979. – С. 58–65. – Текст : непосредственный.

297. Барбарич, С. С. Требования к грузовым вагонам нового поколения / С. С. Барбарич, В. Н. Цюренко // Железнодорожный транспорт. – 2001. – № 8. – С. 35–46.– Текст : непосредственный.

298. Бервинов, В. И. Техническое диагностирование локомотивов : учебное пособие / В. И. Бервинов : / УМК МПС России. – Москва, 1998. – 190 с. – Текст : непосредственный.

299. Болотин, М. М. Математические модели инженерного анализа вагонных депо / М. М. Болотин // Мир транспорта. – 2005. – № 3. – С. 4–15. – Текст : непосредственный.

300. Болотин, М. М. Прогнозирование и оптимизация мощности депо по ремонту грузовых вагонов / М. М. Болотин, Т. В. Второва, А. В. Гоголев // Труды Московского института инженеров железнодорожного транспорта.– 1981, вып. 679. – С. 8–14. – Текст : непосредственный.

301. Бородюк, В. П. Статистическое описание промышленных объектов / В. П. Бородюк, Э. К. Лецкий. – Москва : Энергия, 1971. – 112 с. – Текст : непосредственный.

302. Бурнышев, К. В. Стратегии инновационного поведения предприятий / К. В. Бурнышев // Сибирский социологический вестник. – 2004. – № 2. – С. 92–106. – Текст : непосредственный.

303. Пономарёв, А. В. Основы вагонного хозяйства / А. В. Пономарёв, Ю. А. Матвеев, А. В. Антипов. – Москва: МИИТа, 2010. – 420 с. – Текст : непосредственный.

304. Володин, А. И. Научные основы и пути повышения качества технического обслуживания и ремонтов тепловозов : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Володин Александр Иванович. Омск, 1990. – 40 с. – Текст : непосредственный.

305. Галиев, И. И. Динамические качества полувагонов в порожняковых поездах / И.И. Галлиев, В.А. Нехаев, В.А. Николаев [и др.] // Труды Международной

конференции «Экспериментальное кольцо ВНИИЖТ-70», Щербинка, Россия, 25–26.09.2002. – Москва, 2002. – С. 7. – Текст : непосредственный.

306. Галиев, И. И. Проблема безопасности движения поезда и динамика грузового вагона / И. И. Галлиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев [и др.] // Безопасность движения поездов : труды третьей научно-технической конференции / Московский государственный университет путей сообщения. – Москва, 2002. – С. 11–29. – Текст : непосредственный.

307. Галиев, И. И. Параметры тележки грузового вагона и безопасность движения / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев [и др.]. // Железнодорожный транспорт. – 2003. – № 3. – С. 36–41. – Текст : непосредственный.

308. Галиев, И. И. Повышение уровня безопасности движения железнодорожных экипажей совершенствованием динамических качеств рессорного подвешивания / И. И. Галиев, В. А. Николаев // Безопасность движения поездов : труды третьей научно-технической конференции / Московский государственный университет путей сообщения. – Москва, 2002. – С. 11–23. – Текст : непосредственный.

309. Галиев, И. И. Повышение эффективности эксплуатации магистральных грузовых электровозов совершенствованием их рессорного подвешивания / И. И. Галиев, В. А. Нехаев, В. А. Николаев // Транссибирская магистраль на рубеже XX–XXI веков. Пути повышения эффективности использования перевозочного потенциала : материалы Международной научно-практической конференции / Московский государственный университет путей сообщения. – Москва, 2003. – С. 14, 15. – Текст : непосредственный.

310. Евсеев, Д. Г. Повышение долговечности и надежности подвижного состава технологическими методами / Д. Г. Евсеев // Межвузовский сборник. – Москва, 1979. – Текст : непосредственный.

311. Комплексная механизация и автоматизация ремонта подвижного состава / Д. Я. Перельман. – Москва : Транспорт, 1969. – 312 с. – Текст : непосредственный.

312. Лакин, И. К. и др. Автоматизированная система управления локомотивным хозяйством. АСУТ – Москва: ОЦВ, 2002. – 514 с. – Текст : непосредственный.

313. Лукин, В. В. Вагоны. Общий курс. – Москва : Маршрут, 2004. – 424 с. – Текст : непосредственный.

314. Мямлин, В. В. Использование метода статистического моделирования при проектировании поточных линий для ремонта вагонов / В. В. Мямлин // Вопросы оптимизации деталей тележек и организации обслуживания вагонов : сборник. научных трудов. –Днепропетровск, 1985. – С. 64–69. – Текст : непосредственный.

315. Мямлин, В. В. Прогнозирование значений производительности труда в проектируемых вагоносборочных цехах при помощи регрессионных моделей / В. В. Мямлин // Вопросы оптимизации деталей тележек и организации обслуживания вагонов : сборник научных трудов – Днепропетровск, 1985. – Текст : непосредственный.

316. Мямлин, В.В. Ретроспективный анализ методов организации ремонта грузовых вагонов в депо и пути его дальнейшего развития / В. В. Мямлин // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 34. – С. 51–60.

317. Наговицын, В. С. Неразрушающий контроль и направления его развития / В. С. Наговицын // Железнодорожный транспорт. – 2002. – № 3. – С. 20 – 23. – Текст : непосредственный.

318. Осяев, А. Т. Обеспечение эксплуатационной надежности локомотивов на этапах жизненного цикла / А. Т. Осяев, А. Б. Подшивалов. – Москва, 2006. – 159 с. – Текст : непосредственный.

319. Осяев, А. Т. Система ремонта локомотивов с учетом их фактического состояния на основе технической диагностики / А. Т. Осяев, И. П. Исаев, А. В. Горский // Вестник ВНИИЖТ. – 1991. – № 6. – С. 17. – Текст : непосредственный.

320. Пигунов, В. В. Изучение времени использования оборудования способом моментных наблюдений на вагоноремонтных предприятиях железнодорожного транспорта / Белорусский НИИ НТИ и ТЭИ Госплана БССР // Наука и технический

прогресс в машиностроении : тезисы докладов. – Минск, 1974. – Текст : непосредственный.

321. Райков, Г. В. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта пассажирских вагонов // Г. В. Райков, А. М. Краснобаев, С. В. Федяинова // Сборник трудов ученых ОАО ВНИИЖТ. Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта; редактор: Б. М. Лапидус, Г. В. Гогричиани. Москва. – 2012. – С. 126–132. – Текст : непосредственный.

322. Савоськин, А.Н. Автоматизация ЭПС / А. Н. Савоськин, А. В. Плакс, В. П. Феоктистов [и др.]. – Москва : Транспорт, 1990. – 310 с. – Текст : непосредственный.

323. Сенько, В. И. Обоснование долгосрочных тенденций функционирования и развития базы для деповского ремонта грузовых вагонов // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. – Гомель. 1985. – С. 357–358. – Текст : непосредственный.

324. Сенько, В. И. Актуальные проблемы совершенствования системы технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов на железнодорожном транспорте СССР / В. И. Сенько, Ю. С. Бараш // Железнодорожный траспорт: ВИНИТИ. – [б.г.] – № 3. – Текст : непосредственный.

325. Сенько, В. И. Поточные линии ремонта грузовых вагонов с гибким маневрированием / В. И. Сенько, Ю. С. Бараш [и др.]. // Динамика и прочность грузовых вагонов : межвузовский сборник научных трудов – Москва, 1986. – С. 152–159. – Текст : непосредственный.

326. Сергеев, К.А. Снижение энергозатрат железнодорожного транспорта за счет повышения качества ремонта и технического обслуживания вагонов / К. А. Сергеев, В. В. Готаулин // Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте : сборник научных статей. – Москва : РГОТУПС, 2002. – Текст : непосредственный.

327. Сергеев, К. А. Проектирование вагонных депо и ремонтных заводов : учебное пособие / К. А. Сергеев В. Н. Жданов, О. Ю. Кривич.– Москва : РГОТУПС, 2002. – 143 с. – Текст : непосредственный.

328. Сергеев, К. А. Резервы повышения уровня механизации работ на пункте технического обслуживания (ПТО) / К. А. Сергеев // Межвузовский сборник научных трудов. – Москва : ВЗИИТ, 1984. – № 122. – Текст : непосредственный.

329. Сергеев, К. А. Сокращение расходов на технологическую подготовку производства вагоноремонтных предприятий / К. А. Сергеев // Транспорт. наука, техника, управление : сборник ВИНИТИ. – 2002. – № 8. – С. 51–53. – Текст : непосредственный.

330. Сергеев, К. А. Совершенствование работы вагонного депо / К. А. Сергеев, А. В. Васильев, В. М. Кисляков [и др.]. // Труды ВЗИИТа. – Москва, 1990. – С. 68–71. – Текст : непосредственный.

331. Сергеев, К. А. Автоматизация проектирования вагонных депо / К. А. Сергеев, А. В. Васильев, А. С. Якушев // Труды ВЗИИТа. – Москва, 1990. – С. 72–74. – Текст : непосредственный.

332. Сергеев, К. А. Технологическую подготовку производства в вагонных депо на современный уровень / К. А. Сергеев, С. Ф Ващенко, А. В. Кучеренко // Труды ВЗИИТа. – Москва, 1990. – С. 65–67. – Текст : непосредственный.

333. Сергеев, К. А. Ультразвуковой контроль колесных пар и безопасность движения поездов / К. А. Сергеев, В. В. Готаулин // Безопасность движения на железнодорожном транспорте : сборник научных статей. – Москва : РГОТУПС, 2002. – С. 49–51. – Текст : непосредственный.

334. Сергеев, К. А. Оценка затрат ресурсов в технологических процессах ремонта вагонов / К. А. Сергеев, О. Ю. Кривич, Т. Г. Чернова // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте : сборник научных статей. – Самара : СамГУПС. 2003. – Текст : непосредственный.

335. Сергеев, К. А. Пути поиска энергосберегающих технологий при техническом осмотре и ремонте вагонов / К. А. Сергеев, Ф. Ф. Насибулин // Энергосберегающие

технологии на железнодорожном транспорте : сборник научных статей. – Москва : РГОТУПС, 2002. – Текст : непосредственный.

336. Скиба, И. Ф. Экономическая эффективность новой техники, организации и технологии ремонта вагонов / И. Ф. Скиба. – Москва : Транспорт, 1964. – 243 с. – Текст : непосредственный.

337. Скиба, И. Ф. Комплексно-механизированные поточные линии в вагоноремонтном производстве / И. Ф. Скиба, В. А. Ежиков. – Москва : Транспорт, 1982. – 136 с. – Текст : непосредственный.

338. Скиба, И. Ф. Анализ путей повышения экономической эффективности вагоноремонтных заводов / И. Ф. Скиба, К. В. Мотовилов // Вопросы совершенствования технологии, организации и ремонта вагонов : межвузовский сборник научных трудов. – Москва, 1984. – С. 35–43. – Текст : непосредственный.

339. Стратегия развития транспортного машиностроения Российской Федерации в 2007–2010 годах и на период до 2015 года. – Москва, 2007. – 69 с. – Текст : непосредственный.

340. Теория организации / под ред. В. Г. Алиева. – Москва : Луч, 1999. – 416 с. – Текст : непосредственный.

341. Транспортно-накопительные системы для ГПС / В. А. Егоров, В. Д. Лузанов, С. М. Щербаков. – Ленинград : Машиностроение, 1989. – 293 с. – Текст : непосредственный.

342. Финаев В. И. Аналитические и имитационные модели : учебное пособие / В. И. Финаев, Е. Н. Павленко, Е. В. Заргарян. – Таганрог : Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007. – 310 с. – Текст : непосредственный.

343. Форсайт, Р. Экспертные системы. Принципы работы и примеры: пер. с англ. – Москва : Радио и связь, 1987. – 224 с. – Текст : непосредственный.

344. Харин, Ю. С. Основы имитационного и статистического моделирования : учебное пособие / Ю. С. Харин, В. И. Малюгин, В. П. Кирилица [и др.]. – Минск : Дизайн ПРО, 1997. – 288 с. – Текст : непосредственный.

345. Харламов, В. В. Повышение качества изготовления и ремонта коллекторов тяговых электродвигателей подвижного состава / В. В. Харламов, С. Г. Шантаренко, Ю. Я. Безбородов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения : научно-технический журнал / Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2005. – № 2 – С. 22–29. – Текст : непосредственный.

346. Хилл П. Наука и искусство проектирования : пер. с англ. / П. Хилл. – Москва : Мир, 1973. – 259 с. – Текст : непосредственный.

347. Хокс Б. Автоматизированное проектирование и производство : пер. с англ. / Б. Хокс. – Москва : Мир, 1991. – 296 с. – Текст : непосредственный.

348. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы. Структуры и алгоритмы : схемотехническое проектирование / М. П. Цапенко. – Москва : Энергоиздат, 1985. – 429 с. – Текст : непосредственный.

349. Цвиркун А.Д. Имитационное моделирование в задачах синтеза структуры сложных систем / А. Д. Цвиркун, В. К. Акинфиев, В. Д. Филиппов. – Москва: Наука, 1985. – 173 с. – Текст : непосредственный.

350. Цыгичко А.Н. Повышение эффективности производства / А. Н. Цыгичко. – Москва : Экономика, 1982. – 159 с. – Текст : непосредственный.

351. Черноусов В. А. Разработка и внедрение системы обеспечения качества соединений трубопроводов на монтаже, выполненных ручной дуговой сваркой : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 08.00.20 / Черноусов Владимир Александрович. – Москва, 1980. – 132 с.

352. Шантаренко, С. Г. Задачи рациональной организации процессов технического обслуживания и ремонта локомотивов / С. Г. Шантаренко // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта : тезисы 65-й Международной научно-практической конференции / Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта. – Днепропетровск, 2005. – С. 51. – Текст : непосредственный.

353. Шантаренко, С. Г. Новые технологии ремонта для электровозов ЭП1 / С. Г. Шантаренко // Локомотив. – 2005. – № 9. – С. 34–36. – Текст : непосредственный.

354. Шантаренко, С. Г. Обеспечить качество ремонта локомотивов в условиях депо / С. Г. Шантаренко // Локомотив. – 2005. – № 5. – С. 34–35. – Текст : непосредственный.

355. Мотовилов, К. В. Выбор рациональных путей повышения производственной мощности вагоноремонтных предприятий / К. В. Мотовилов // Вопросы совершенствования технологии, организации и ремонта вагонов : межвузовский сборник научных трудов : – Москва, 1984. – С. 3–10. – Текст : непосредственный.

356. Ножевников, А. М. Поточно-конвейерные линии ремонта вагонов / А. М. Ножевников. – Москва : Транспорт, 1980. – 137 с. – Текст : непосредственный.

357. Ответчиков, Н. В. и др. Сетевое планирование и управление в отрасли вагоностроения // Труды ВНИИВ. – Вып. 9. – Москва, 1969. – Текст : непосредственный.

358. Кирилюк, А. В. АСУ в вагоноремонтном производстве / А. В. Кирилюк. – Москва : Транспорт, 1978. – 174 с. – Текст : непосредственный.

359. ВСН 56–78 «Инструкция по проектированию станций и узлов на железных дорогах Союза ССР». – 1978. – 130 с.

360. Пигунов, В. В. Методика и результаты проведения на ЭВМ имитационных экспериментов с моделями управления запасами вагоноремонтных предприятий / Белорусский институт инженеров железнодорожного транспорта // Тезисы докладов. – Гомель, 1977. – С. 39–40. – Текст : непосредственный.

361. Подшивалов, Ю. С. Передвижные машины для безотцепочного ремонта вагонов / Ю. С. Подшивалов, Л. И. Сидоренко. – Москва : Транспорт, 1986. – 145 с. – Текст : непосредственный.

362. Райков, Г. В. Алгоритм расчета оптимальной последовательности выполнения операций при ремонте вагонов / Г. В. Райков // Вестник ВНИИЖТ. – 1976. – № 5. – Текст : непосредственный.

363. Сычев, Е. И. Теоретические основы совершенствования планирования оптимального развития вагоноремонтной базы в крупных железнодорожных узлах / Е. И. Сычев. – Деп. ЦНИИТИ МПС, 1981. – Текст : непосредственный.

364. ГОСТ 14.004–83. Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий = Technological preparation of production. Terms and definitions of basic concepts : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 09.02.83 № 714 : взамен HYPERLINK "https://docs.cntd.ru/document/1200123429" ГОСТ 14.004–74 : дата введения 1983-07-01 (переиздание – февраль 2009 г.) / разработан Государственным комитетом СССР по стандартам. – Москва : Издательство стандартов, 2009. – 8 с.

365. ГОСТ Р 56046–2014. Показатели использования локомотивов. Термины и определения = Indicators in use of locomotive. Terms and definitions : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 июня 2014 г. № 661-ст : введен впервые : дата введения 2014-09-01 (внесена поправка, опубликованная в ИУС № 2-2016) / разработан Проектно-конструкторским бюро локомотивного хозяйства – филиалом ОАО «РЖД». – Москва : Издательство стандартов, 2016. – 31 с.

366. Методика проведения энергетических обследований потребляющих устройств, обеспечивающих тягу поездов и ремонтное производство на железнодорожном транспорте: Инструктивно-методические указания комплексной системы энергетического обследования / под общ. ред. В. Т. Черемисина / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2004. – 429 с.

367. Мазурова, И. И. Анализ эффективности деятельности предприятия: учебное пособие / И. И. Мазурова, Н. П. Белозерова, Т. М. Леонова [и др.]. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГУЭФ, 2010. – 113 с. – Текст : непосредственный.

368. Лэсдон, Л. С. Оптимизация больших систем : пер. с англ. / Л. С. Лэсдон ; под ред. Н. А. Первозванного. – Москва : Наука, 1975. – 432 с. – Текст : непосредственный.

369. Кельтон, В. Имитационное моделирование / В. Кельтон, А. Лоу. – Санкт-Петербург : Питер ; Киев : Издательская группа BHV, 2004. – 847 с. – Текст : непосредственный.

370. Федосов, Е. А. Автоматизация проектирования сложных технических систем / Е. А. Федосов // Вестник АН СССР. – 1986. – № 10. – С. 40–49. – Текст : непосредственный.

371. Ожерельева, Т. А. Об отношении понятий информационное пространство, информационное поле, информационная среда и семантическое окружение / Т. А. Ожерельева // International journal of applied and fundamental research. – 2014. – № 10. – С. 21–24. – Текст : непосредственный.

372. ГОСТ Р ИСО 5725-1–2002. Методология определения и проверки точности и достоверности измерений. Часть 1. Общее положение. – Москва: Стандартинформ, – 2002. – 36 с.

373. Патент № 2581083 Российская Федерация. Способ определения формы индикатрисы рассеяния дефекта при ультразвуковом контроле и устройство для его осуществления : № 2581083 : заявл. 10.04.2016: опубл. Бюл. № 10 / Рафиков Р. Х., Коновалов Н. Н., Преображенский М. Н. – Текст : непосредственный.

374. Рафиков, Р. Х. Влияние глубины залегания угловых отражателей на угол максимума их индикатрис рассеяния // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 11. – С. 34– 41. – Текст : непосредственный.

375. Интеграция COMSOL Multiphysics® в Цифровую платформу по разработке и применению цифровых двойников CML-Bench®. [Электронный ресурс] – URL: https://sapr.ru/news/20231218-

comsol- multiphysics- cml- bench?ysclid=m6ibty1slb362458866 (дата обращения: 27.11.2024).

376. Алехин, С. А. Вопросы оптимизации технологических процессов и оборудования ремонтного производства, повышение долговечности подвижного состава / С. А. Алехин // Сборник статей. ЛИИЖТ, Ленинград. 1981. – Текст : непосредственный.

377. Вагонное хозяйство : учебник для вузов ж.-.д. транспорта / А. А. Хренов, С. В. Шилов, П. С. Баринов и др. ; под ред. А. А. Хренова. – Москва : Транспорт, 1985. – 480 с.

378. Богданов, А. А. Тектология (Всеобщая организационная наука) : в 2 кн. – Москва : Экономика, 1989. – Текст : непосредственный.

379. Берталанфи, Л. Общая теория систем. Критический обзор. Исследования по общей теории систем / под общ. ред. В. Н. Садовского, Э. Г. Юдина. – Москва : Прогресс, 1969. – С. 23–82. – Текст : непосредственный.

380. Гурвич, А. К. Справочные диаграммы направленности искателей ультразвуковых дефектоскопов / А. К. Гурвич, Л. И. Кузьмина. – Киев : Техніка, 1980. – 103 с. — Текст : непосредственный.

381. Рафиков, Р. Х. Построение диаграммы направленности пьезоэлектрических преобразователей эхо-сигналов от ненаправленных отражателей / Академия ГПС МЧС России (Номер лиценз. ЭЛ № ФС 77-31239 от 08.02.2008, рег. номер № 6/6 19.02.2010 г. ВАК) / Р. Х. Рафиков, Н. Н. Коновалов, М. Н. Преображенский [и др.] // Технологии техносферной безопасности. – 2015. – Вып. 4(62). – С.1–5. – Текст непосредственный. – URL: http://agps-2006.narod.ru/ttb/2015-4/44-04-15.ttb.pdf. – Текст : непосредственный.

382. Гурвич, А. К. Индикатрисы рассеяния как источник дополнительной информации о выявленных дефектах / А. К. Гурвич, Л. И. Кузьмина // Дефектоскопия. – 1970. – № 6. – С. 47–56. – Текст : непосредственный.

383. Патент № 2581083 Российская Федерация. Способ определения формы индикатрисы рассеяния дефекта при ультразвуковом контроле и устройство для его

осуществления : № 2581083 : заявл. 10.04.2016: опубл. Бюл. № 10 / Рафиков Р. Х., Коновалов Н. Н., Преображенский М. Н. – Текст : непосредственный.

384. Гурвич, А. К. Способы сканирования при ультразвуковом контроле / А. К. Гурвич // В мире НК. – 2010. – № 3(49). – С. 4–6. – Текст : непосредственный.

385. Гурвич, А. К. Ультразвуковая дефектоскопия стыковых сварных швов / А. К. Гурвич. – Ленинград : ЛДНТП, 1955. – 15 с. – Текст : непосредственный.

386. Гурвич, А. К. Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений. – Киев: Государственное издательствово технической литературы УССР, 1963. – 228 с.

387. Коновалов, Н. Н. Диаграммы направленности наклонных пьезопреобразователей в дополнительной плоскости / Н. Н. Коновалов, Р. Х. Рафиков, М. Н. Преображенский // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 5. – С. 26–30. – Текст : непосредственный.

388. Коновалов, Н. Н. Построение диаграмм направленности наклонных пьезопреобразователей в дополнительной плоскости / Н. Н. Коновалов, Р. Х. Рафиков, М. Н. Преображенский [и др.]. // Труды сессии РАН и деловой программы форума «Территория NDT 2016» : сборник научных трудов. – Москва : Издательский дом «Спектр», 2016. – 308 с. ил. – Текст : непосредственный.

389. Рафиков, Р. Х. Новые методы построения диаграмм направленности в основной и дополнительной плоскостях // Тезисы докладов специалистов на семинаре «К вопросу о применении ультразвуковой томографии и голографии на машиностроительных заводах, нефтехимических комбинатах и других смежных производствах». – Москва : АО «НИИхиммаш», 19–21 апреля 2016. – Текст : непосредственный.

.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПРИЛОЖЕНИЕ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ, ПРИМЕНЯЕМОЙ КОМПАНИЯМИ (В ТОМ ЧИСЛЕ ОАО «РЖД», АО «СИНАРА ТРАНСПОРТНЫЕ МАШИНЫ, АО «ТРАНСМАШХОЛДИНГ») ДЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕМОНТА (ВЫПУСКА) НОВОЙ ПРОДУКЦИИ И ВЫПУСКА НОВОЙ ТЕХНИКИ

Введение

На всей продолжительности своей деятельности, промышленные компании сталкивается с задачей по выпуску нового продукта для обеспечения своей конкурентоспособности иди улучшения существующей линейки продукции. Данная процедура четко регламентирована требованиями действующего в Российской Федерации национального стандарта ГОСТ 15.301 «Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство». Правила и этапность постановки продукции на производство, установленные ГОСТ 15.301 не могут изменяться производственными компаниями и обязательны к выполнению при выпуске новой продукции.

Основными этапами постановки продукции на производство по ГОСТ 15.301 являются:

- разработка технического задания (технических требований) на выпускаемый продукт;

- проведение опытных конструкторских работ, для подготовки конструкторской, эксплуатационной документации и изготовления опытных экспериментальных образцов;

- доработка конструкторской документации по результатам проведенных испытаний опытных образцов;

- производство установочной серии и постановка продукции на серийное производство путем проведения квалификационных испытаний.

Понимая важность и финансово-экономические риски от нарушения данных этапов, компании в рамках управления качеством выпускаемой продукции, применяя процессный подход, регламентируют данную деятельность внутренними стандартами, которые описывают концептуальный подход к процессу постановки нового продукта на производство от идеи до его серийного выпуска и при его реализации применяют современные инструменты менеджмента.

1. Концепция управления выпуском новой продукции компании АО «Синара – Транспортные Машины» (АО «СТМ»)

АО «СТМ» выполняет управление по созданию новых продуктов на основании внутренних Методических указаний «Управление проектами по созданию новых продуктов» МУ-СТМ.И-О2-02. Данный документ определяет концепцию создания нового продукта путем проектного менеджмента. Для создания продукта формируется проектный офис и определяется проектная команда с назначением Руководителя проектов и Куратора проекта из числа Руководства компании. Определяются менеджеры проекта с определением функций и полномочий в рамках проекта. Для старта проекта по созданию продукта необходимо решение коллегиальных органов компании.

Создание продукта при проектном управлении рассматривается, как жизненный цикл проекта начиная с идеи продукта и заканчивая его серийным производством. На этапе жизненного цикла проекта определяются контрольные точки, которые позволяют определять достижимость целей на промежуточных этапах проекта и оценить степень создания продукта.

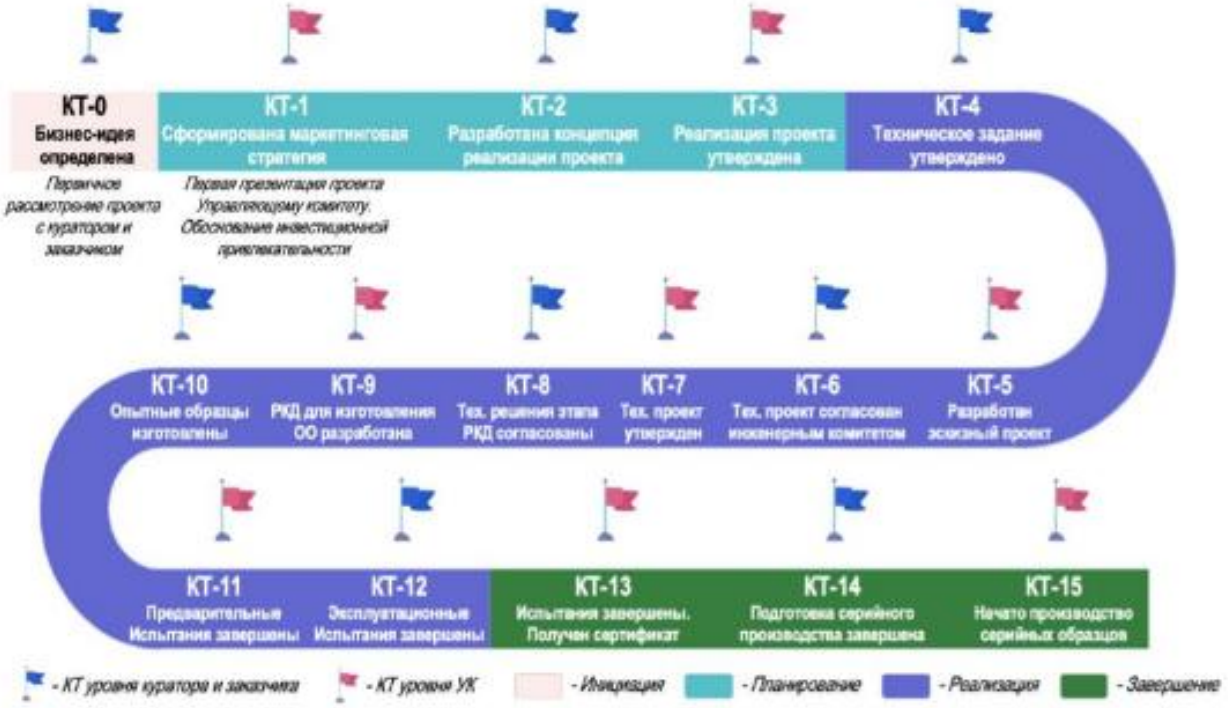


Рисунок 1 Жизненный цикл проекта

При формировании проекта по созданию нового продукта определяются цели, которые в рамках реализации проекта предполагается достичь, и требования при планировании и реализации проекта, при этом процесс управления

требованиями должен основываться на поставленных целях и состоит из этапов:

1 этап - определение перечня заинтересованных сторон проекта (стейкхолдеров), формирование интересов и требований стейкхолдеров, разработка планов по снижению их потенциальных негативных влияний;

Команда проекта должна выявить заинтересованные стороны проекта, определить их требования и ожидания и, насколько это возможно, управлять их влиянием в отношении требований, чтобы обеспечить успешное завершение проекта. По результатам данного этапа должен быть сформулирован Перечень внешних и внутренних заинтересованных сторон с указанием их интересов и планов по снижению их потенциальных негативных влияний.

2 этап - классификация требований, определение критичных параметров и требований стейкхолдеров по уровням разработки (системном, функциональном, логическом и физическом);

На данном этапе должны быть классифицированы требования стейкхолдеров по уровням разработки (системном, функциональном, логическом и физическом) и определены критичные параметры для реализации в проекте.

Системный уровень разработки требований, который отвечает на вопрос «Что требуется?». На данном уровне определяются требования верхнего уровня– бизнес требования, которые формулируются руководством компании - заказчика на стадии разработки проектного решения для выбранной системы. Данные требования включают определение укрупненных функциональных модулей, которые должны поддерживать ведение основных бизнес-процессов. Соответственно, этап анализа бизнес требований закладывает фундамент для проектирования и реализации системы.

Функциональный уровень разработки требований отвечает на вопрос «Какие функции должно выполнять?». На данном уровне определяют действия, которые система должна быть способной выполнить – основные функции продукта.

Логический уровень разработки требований отвечает на вопрос «Как это должно работать?». На данном уровне определяют действия, которые система должна быть способной выполнить – основные функции продукта.

На данном этапе необходимо сконструировать логическую модель проектируемого продукта, независимую от последующей физической реализации, которая должна отражать требования Заказчика. Эта модель используется для выработки совокупности требований к продукту.

Средством логического моделирования является структурный системный анализ, позволяющий подробно описывать схемы потоков данных, которые будут существовать при функционировании системы (продукта).

Физический уровень разработки требований отвечает на вопрос «Как должно быть реализовано?». На данном этапе определяются требования по практической реализации обозначенных требований на уровнях выше и графически отражены взаимосвязи.
Требования задают к изделию в целом и его составным частям (системам, агрегатам, узлам, деталям, программам, в т. ч. встроенному ПО), к документам (информационным наборам, базам данных и т. п.), материалам, интерфейсам, объектам, связанным с процессами жизненного цикла.
По результатам данного этапа должен быть сформулирован документ по классификации требований стейкхолдеров по уровням разработки и критичные параметры для реализации и согласован с руководителями соответствующей зоны ответственности (Анализ заинтересованных сторон и их требований).

3 этап - разработка модели и сценариев использования требований, внедрения данных моделей и сценариев;

На данном этапе разрабатываются модели и определяются сценарии использования требований и планы по внедрению данных сценариев, включая контрольные рубежи, на которых проверяют, согласовывают и утверждают требования к объекту и соответствие объекта требованиям (верификацию и валидацию требований).

Требования (каждое требование в отдельности и спецификация требований в целом) имеют свой жизненный цикл, в котором выделяют стадии и события, связанные с изменением статуса готовности требований. Стадии жизненного цикла требований, применяемые статусы готовности требований и события, приводящие к изменению статуса готовности, устанавливают в программе управления требованиями.

По окончании разработки спецификацию требований к объекту проверяют, согласовывают и утверждают. Утверждение отдельных требований выполняют только при внесении изменений в утвержденную спецификацию. Порядок проверки, согласования и утверждения требований устанавливают в нормативных документах организации. При проверке требований выполняют их валидацию и верификацию. По результатам верификации или валидации объекта требованиям присваивают статус, указывающий статус выполнений (требование выполнено; требование выполнено с учетом разрешения на отклонение; требование не выполнено (или отсутствует необходимый подтверждающий документ).
При валидации требований проверяют:

– полноту покрытия спецификацией требований всех потребностей заинтересованных сторон, исходных требований и/или принятых технических решений;
– правильность выражения требованием потребности заинтересованной стороны, отражения принятого технического решения и/или декомпозиции родительского требования;
– наличие и правильность связи с потребностью заинтересованной стороны, родительским требованием или принятым техническим решением;
– непротиворечивость требований в спецификации.

При валидации требований используют результаты компьютерного моделирования, испытаний, опыта эксплуатации аналогов и другие методы.

При верификации требований проверяют:
– отнесение всех требований в спецификации к одному объекту;
– соответствие формулировки каждого требования критериям качества, установленным в документах по стандартизации организации;

– соответствие спецификации требований в целом критериям качества, установленным в документах по стандартизации организации;

– правильность заполнения атрибутов требований, установленных в документах по стандартизации организации;
– правильность классификации требований и установления связей между требованиями;
– наличие и правильность оформления сведений для верификации и валидации объекта.

Полный перечень проверок требований устанавливают в нормативных документах организации, на которых делают ссылки в Программе управления требованиями.

4 этап - контроль выполнения планов по снижению потенциального негативных влияний стейкхолдеров;

В проекте по созданию новой техники необходимо обеспечить обратную связь со стейкхолдерами для гарантии правильного понимания устанавливаемых требований. Руководитель проекта, совместно с Куратором проекта разрабатывают требование по периодичности контроля выполнения планов по снижению потенциальных негативных влияний стейкхолдеров и разрабатывают/организуют разработку планов корректирующих мероприятий.

5 этап - управление изменениями требований (версионализирование, установление связей с другими требованиями и артефактами, уточнение требований)

Всем изменениям утвержденных требований присваивают класс изменения. Под изменением требований понимают:
- изменение версии требований в утвержденной спецификации требований;
- удаление требования(й) из утвержденной спецификации требований (с заменой или без замены);
- добавление новых требований в утвержденную спецификацию требований.

В зависимости от класса изменения определяется порядок действий либо по повторному выполнению проверки конфигураций объекта выполнения требования, либо отсутствия необходимости в повторных проверках.

6 этап - анализ выполнения требований.

Завершающим этапом по работе с требованиями является анализ выполнения требований и разработка планов корректирующих мероприятий для улучшения всей системы управления. По результатам данного этапа Менеджером по требованиям формируется отчет по анализу выполнения требований.

Вся информация по проектам, после прохождения первой контрольной точки заносится в информационную систему управления проектами (ИСУП) на базе 1С:ДО .

В рамках проекта применяются современные методы проектного управления, в которые входят – система управления рисками, документирование процедур, формирование матрицы ответственности и др.

Применение системы управлением требованиями, позволяет создавать продукт, удовлетворяющий требованиям всех заинтересованных сторон. Вовлеченность в создании продукта всех необходимых структур компании с определением их функций, ответственности и полномочий позволяет быстро и эффективно выполнять реализацию проекта. Рассмотрение процесса выпуска новой продукции в качестве жизненного цикла проекта от идеи до серийного выпуска продукта с промежуточными контрольными точками, позволяет эффективно оценивать степень реализации проекта (создания продукта).

1.1 Применение цифровых двойников и обратного инжиниринга для оптимизации процесса управления созданием нового продукта АО «СТМ»

АО «СТМ» при создания нового продукта большое значение уделяется этапу формирования требований к создаваемому продукту со стороны Заказчика и иных заинтересованных сторон. Эти требования связаны с назначением и функционированием продукта, процессом его изготовления, испытаний, эксплуатации, ремонта и утилизации и определяют конструкционный состав

нового изделия. Чем больше требований предъявляется новому изделию, тем сложнее создать соответствующую модель нового изделия. Вторым немаловажным аспектом является риски в проектировании будущего продукта, что требует процесса многократных испытаний, в том числе разрушающих для экспериментального подтверждения свойств нового изделия. Данный подход к созданию продукта сопряжен с длительностью процедуры опытной конструкторской разработки и производства опытного образца.

Проблему решает применение «умного» инжиниринга. В него входят обратный реинжиниринг, который позволяет на основе прототипов и импортных аналогов выполнять разработку новых изделий с высокой или полной степенью локализации на предприятии и создание «Цифрового двойника» - цифровая модель, являющаяся копией физического прототипа изделия.

Требования к свойствам проектируемого изделия, зафиксированные в техническом задании на его разработку и изготовление, при использовании технологии Цифрового двойника, преобразуются в систему взаимосвязанных требований, целевых показателей и ресурсных ограничений. В отличии от начальных требований, которые приведены в техническом задании и как правило исчисляются единицами значений, производственные целевые показатели могут исчисляться десятками или тысячами. Их количество определяет степень детализации свойств проектируемого изделия и уровень контроля над обликом перспективного продукта. Проектирование сложных высокотехнологичных продуктов с применением цифровых платформ, подразумевает балансировку системы взаимосвязанных целевых показателей, при том, что работа с тысячами показателей находится за гранью осознания и интуиции даже самых лучших инженеров. Требования, полученные в результате цифровых (виртуальных) испытаний, требуемым интервалом значений создает возможность комплексного мониторинга и анализ влияния показателей друг на друга. В результате можно получить множество вариантов конструкции, различающихся экономикой, технологией изготовления и материалами, открывающие возможность формирования гибкой стратегии вывода на рынок разрабатываемого высокотехнологичного изделия.

Интегрирование «умного» инжиниринга в процесс управления созданием новой продукции АО «СТМ» позволит обеспечить:

- получение характеристик создаваемого продукта, отвечающего ожиданиям всех заинтересованных сторон;

- сократить время выводу новой продукции на рынок;

- сократить необходимость приобретения сложного испытательного оборудования;

- улучшить технико-экономические результаты проекта.

2. Концепция управления выпуском новой продукции компании АО «Трансмашхолдинг (АО «ТМХ»)

Процесс создания новой техники в АО «ТМХ» также основан на создании проектного офиса в соответствии с Регламентом «Порядки ввода в эксплуатацию новой техники предприятий, входящих в группу лиц АО «Трансмашхолдинг»» утвержденного Приказом АО «Трансмашхолдинг» №271 от 17.12.2020 г. В связи с применением «дивизионной» структуры управления, когда отдельным профильным направлением деятельности занимается обособленное структурное подразделение, проектная команда формируется на основе профильного дивизиона. Руководителем проекта назначается – Руководитель дивизиона.

Проектная команда при создании и вводу в эксплуатацию новой техники, формирует планы, включая:

- план формирования анализа данных по продукту;

На основании документации, разработанной в соответствии с «Положением о порядке выполнения исследований, опытно конструкторских работ и постановки изделий железнодорожной техники на производство» и опыта эксплуатации аналогичной продукции, «ТМХ Инжиниринг» совместно с структурными подразделениями ГК ТМХ формируют комплект документов, включая: комплект конструкторской и эксплуатационной документаций; перечни необходимого оборудования и оснастки; ресурсные спецификации для обслуживания и ремонта, учебные пособия. Также формируется перечень отсутствующей (недостающей) документации.

Команда управления проектом совместно со службами Заказчика подвижного состава уточняют условия эксплуатации, если результатам проекта является создание ТПС или электропоезда – организацию движения поездов на участке эксплуатации и весовые нормы.

- план обучения персонала сервисных и эксплуатационных депо;

По результатам проведенного аудита по утвержденному план-графику осуществляется обучение участвующего обслуживающего, ремонтного, эксплуатационного персонала в депо, на заводах, в специализированных учебных центрах. Организовываются учебно-практические занятия.

- план формирования ЗИП и переходного комплекта узлов для замены в период гарантийного пробега;

На основании опыта эксплуатации продуктов-аналогов, особенностей работы полигона и планов по годовому пробегу техники, формируются гарантийные требования, включающие параметры гарантийного склада, его местонахождение и оснащенность.

- план аудита предприятий;

Команда проекта оценивает: готовность сервисных базовых депо для подтверждения готовности и наличия необходимого персонала и производственных мощностей; наличие требуемого оборудования, инструмента, материалов; соответствие критериям складских помещений.

- план формирования склада товарно-материальных ценностей (далее ТМЦ), ЗИП, переходного комплекта деталей и узлов для обслуживания и ремонта;

Структурные подразделения ГК ТМХ на основании утвержденного бюджета и заявки организуют обеспечение ТМЦ, ЗИП и переходным комплектов узлов. ТМЦ и переходной запас в объеме месячной потребности формируется не позднее чем за 5 календарных дней до поставки техники в депо.

- план обеспечения депо технологическим оборудованием, специальным инструментом;

- план формирования проектной команды на уровне депо;

По результатам проведенного аудита формируется рабочая группа депо, которая формирует перечень необходимого технологического оборудования, специального инструмента и приспособлений, а также перечень строительно-монтажных работ, необходимых для переоборудования сервисного депо и доведения до необходимого состояния эксплуатационного депо.

- план финансирования проекта.

По результатам проработки всех этапов реализации проектов Руководитель команды управления вводом новой техники в эксплуатацию формирует сводный бюджет и график финансирования, которые согласовываются с Производственным предприятием ГК ТМХ, сервисным предприятием ГК ТМХ, Дирекцией по экономике и финансам «Трансмашхолдинг»

После поступления новой техники команда управления выполняет мониторинг её эксплуатации и фиксирует все выявленные нарушения. По результатам подконтрольной эксплуатации делаются выводы:

- о соответствии условий эксплуатации параметрам, заложенным в ТУ на изделие;

- о качестве работы сервисных групп;

- о достаточности обучающих материалов для качественной подготовки персонала;

- о соответствии ЗИП и переходного комплекта реальной потребности;

- о соответствии текущих затрат на ремонт и обслуживание с расчетными;

- о соответствии производственных площадей, складских помещений и уровня квалификации персонала требованиям;

- о соответствии параметров надежности изделия параметрам указанным в ТУ;

- о соответствии эксплуатационных показателей новой техники, параметрам указанным в ТУ.

При выявлении отклонений по показателям, команда управления вводом новой техники в эксплуатацию совместно с проектной командой депо разрабатывают корректирующие мероприятия к Плану ввода в эксплуатацию.

Решение о завершении ввода изделия в эксплуатацию выносится на рассмотрение после 3 месяцев стабильного подтверждения нормативных значений показателей эксплуатации изделия и при согласовании с руководством сервисного и эксплуатационного депо, утверждается Руководителем профильного дивизиона. После подписания приказа о завершении ввода в эксплуатацию изделия, команда управления вводом в эксплуатацию новой техники прекращает свою деятельность.

2.1 Применение цифровых двойников и обратного инжиниринга для оптимизации процесса управления вводом новой техники в эксплуатацию АО «ТМХ»

Концепция создания и ввода в новой продукции АО «ТМХ» принципиально не отличается от ранее описанного процесса управления созданием нового продукта АО «СТМ». Поэтому умный «инжиниринг» с применением обратного инжиниринга при создании комплекта конструкторской документации и применения «цифровых двойников» для определения требуемых параметров новой продукции на этапе её проектирования так же помогают в ускорении процесса вывода продукта на рынок в соответствии с п.1.1 настоящего доклада.

Следует отметить, что особенностью внутренней документации по вводу новой техники в эксплуатацию, является необходимость подготовки не

только конструкторской документации, но и документации для ремонта. В данном процессе готовится ремонтная документация по ЕСКД ГОСТ 2.602-2013 в которую входит комплект ремонтных чертежей в том числе на технологическую оснастку. Как правило разработка новой оснастки выполняется на основе прототипа изделия, на который зачастую отсутствуют чертежи и в подобных случаях обратный инжиниринг позволяет быстро сформировать эскизный набросок или рабочий чертеж, по которому дорабатывается КД.

Технология «Цифровых двойников» помимо создания цифровой модели для детализации свойств проектируемого изделия и уровень контроля над обликом перспективного сложного высокотехнологического продукта, к которым непосредственно относится техника (локомотив, путевая машина и др. продукты АО «ТМХ»), ускорения процесса постановки на производство, представляет интерес для анализа Производственной системы предприятий при получении и вводе новой техники в эксплуатацию.

Главная задача Цифрового двойника связана с построением и эксплуатацией оптимизированной Производственной системы, в которой конфигурация производственных ресурсов сбалансирована с алгоритмами управления и параметрами потока отказов новой техники. Цифровые двойники позволяют использовать виртуальную Производственную систему для выполнения такой оптимизации и выполнять виртуальное управляющее воздействие в ходе имитации функционирования Производственной системы. Это позволяет выполнить модернизацию и диверсификацию производства для обслуживания, ремонта и эксплуатации новой техники, что в свою очередь определяет время выполнения производственных заказов и формирует цену продукции.

К примерам цифровых двойников производственных систем можно отнести проекты «Цифровой завод», «Цифровое депо», реализованных на отдельных предприятиях компаний АО «Желдорреммаш», ООО «ЛокоТех».

Заключение

В ходе анализа концепции управления выпуском новой продукции, корпорации АО «СТМ» и АО «ТМХ» придерживаются сходных принципов, которые основаны на управление процессами создания и постановки на серийное производство продукции в рамках реализации проекта с формирован ем проектной команды и применения современных методов проектного управления. В ходе создания нового продукта, компании создают систему управления процессом создания нового продукта, в которую входят управление требованиями к продукту и к производственной системе для

создания, обслуживания, эксплуатации, испытаний и утилизации продукта, управление рисками. Система управления позволяет достигать целей по созданию нового продукта и определять по контрольным точкам статус реализации проекта (степень готовности нового продукта).

В ходе анализа сделан вывод о возможной оптимизации процессов управления выпуском новой продукции АО «СТМ» и АО «ТМХ» за счет применения умного инжиниринга, который включает обратный инжиниринг для создания конструкторской документации на основе снятия размеров с физического прототипа с применением 3D сканеров и применения технологии «Цифровых двойников», которая основана на цифровых платформах и цифровых испытательных полигонах.

Применение умного инжиниринга позволяет создавать сложные технологические продукты в короткие сроки и получать продукт, удовлетворяющий требованиям широкому спектру потребителей. Цифровые технологии позволяют также создать виртуальную модель производственной системы для обслуживания, ремонта и эксплуатации новой продукции. При моделировании производственной системы достигается определение решений для выполнения модернизации и диверсификации производства.

Результатом внедрения в производство цифровых двойников и реверс-инжиниринга является повышение финансово-экономических результатов от проектов по выпуску новой продукции.