

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ЕФИМУШКИН НИКОЛАЙ АНДРЕЕВИЧ

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ
РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ТЕХНИЧЕСКИМ
ОБСЛУЖИВАНИЕМ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ ЖЕЛЕЗНОЙ
ДОРОГИ**

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Д.т.н., профессор
Орлов Сергей Павлович

Самара – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|------------|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| 1 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ | 11 |
| 1.1 Управление работами по содержанию железнодорожного пути | 11 |
| 1.2 Формальное описание организационной структуры ТО железнодорожного пути | 17 |
| 1.3 Анализ основных характеристик дефектов рельсового пути..... | 19 |
| 1.4 Процедуры проведения ремонтных работ по устранению неисправностей рельсового пути | 25 |
| 1.5 Аналитический обзор существующих решений ключевых проблем по техническому обслуживанию железнодорожного пути | 32 |
| 1.5.1 Обзор подходов по совершенствованию планирования ремонтных работ с целью повышения их экономической эффективности | 33 |
| 1.5.2 Аналитический обзор существующих методов диагностики состояния элементов рельсового пути | 49 |
| 1.5.3 Онтологическое проектирование как ключевой подход к формированию знаний о процессе технического обслуживания | 53 |
| 1.6 Выводы по первой главе | 60 |
| 2 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПУТЕВЫМИ РАБОТАМИ | 62 |
| 2.1 Построение онтологии технического обслуживания рельсового пути..... | 62 |
| 2.1.1 Основные понятия онтологии ТОиР железной дороги..... | 63 |
| 2.1.2 Свойства данных в онтологии ТОиР железной дороги | 70 |
| 2.2 Получение новых знаний по ТОиР ВСП с использованием средств Protégé Reasoner | 73 |
| 2.2.1 Определение аксиом для онтологии ТОиР рельсового пути | 73 |
| 2.2.2 Поиск знаний о выделении технологических окон на перегоны..... | 77 |
| 2.3 Проектирование СППР для планирования ремонта рельсового пути..... | 79 |
| 2.4 Выводы по второй главе | 81 |
| 3 РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КЛАССИФИКАТОРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ | 82 |
| 3.1 Методика сбора данных о качестве инфраструктуры верхнего строения пути..... | 82 |
| 3.2 Формирование наборов данных для моделей ИНС | 85 |
| 3.2.1 Подготовка изображений с элементами ВСП..... | 85 |
| 3.2.2 Разметка изображений с элементами ВСП | 89 |
| 3.2.3 Очистка и корректировка датасетов | 93 |
| 3.3 Обучение моделей ИНС распознаванию элементов рельсового пути | 95 |
| 3.3.1 Выбор архитектуры нейронной сети с средств обучения | 95 |
| 3.3.2 Обучение основной модели OBJ..... | 97 |
| 3.3.3 Обучение дополнительной модели JLV | 105 |
| 3.3.4 Обучение дополнительной модели BLT | 110 |
| 3.4 Выводы по третьей главе | 116 |
| 4 ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПУТЕВЫХ БРИГАД НА УСТРАНЕНИЕ ДЕФЕКТОВ НА ЛИНЕЙНОМ УЧАСТКЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ | 117 |
| 4.1 Модель обслуживающей инфраструктуры линейного участка железной дороги | 117 |
| 4.2 Постановка задачи оптимального назначения рабочих бригад на устранение дефектов | 119 |
| 4.3 Пример решения задачи оптимального назначения ремонтов пути | 122 |
| 1.6 Выводы по четвёртой главе | 126 |

| | |
|--|-----|
| 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ | 127 |
| 5.1 Распознавание дефектов на участке Куйбышевской железной дороги с помощью установленной на ДКИ искусственной нейронной сети | 127 |
| 5.2 Решение задачи назначений | 131 |
| 5.3. Применение искусственной нейронной сети для контроля состояния инфраструктуры контактной сети | 140 |
| 5.4 Выводы по пятой главе | 143 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 145 |
| ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ | 147 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 148 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А ФРАГМЕНТЫ ОНТОЛОГИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ | 165 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б ОПИСАНИЕ НАБОРОВ ДАННЫХ МОДЕЛЕЙ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ | 169 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАБОТЫ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ПО МЕТРИКЕ F1 | 172 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г ТЕКСТ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ МАТРИЦЫ ОШИБОК | 175 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ | 181 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Е СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИНЦИДЕНТОВ ВСП | 184 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Активное развитие высокоскоростных железных дорог связано с обеспечением повышенной надежности инфраструктуры железнодорожного пути. Важнейшим компонентом железной дороги является рельсовый путь, образование дефектов на котором может привести к критическим и аварийным ситуациям. Наибольшие проблемы возникают в области интенсивного энергетического взаимодействия колесных пар транспортных средств и рельсового пути. Это обуславливает необходимость постоянного мониторинга и оперативного обнаружения неисправностей различных элементов рельсового пути: рельсовых скреплений, стыков, шпал, соединительных элементов.

Техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) рельсового пути является важнейшим производственным процессом, обеспечивающим надежность и рентабельность функционирования железной дороги. Повышение скорости прохождения поездов, интенсификация движения ставят ряд новых задач управления обслуживанием и ремонтными работами на рельсовом пути, решение которых предусмотрено в Комплексной программе инновационного развития холдинга «РЖД». Контроль верхнего строения пути (ВСП) в настоящее время производится с использованием видеосъемки при проходе вагона-путеизмерителя. Проблема состоит в том, что получение большого числа кадров рельсового пути и их ручная обработка операторами для выявления дефектов приводит к большим временным задержкам при назначении бригад на ремонт пути. Это снижает оперативность ТОиР и может приводить к аварийным ситуациям.

Актуальность проблемы оперативного выявления дефектов рельсового пути и принятия решений по управлению рабочими бригадами определила цель и задачи диссертации.

Степень разработанности темы исследования

Теоретическую основу выполненных в диссертации исследований составили основополагающие труды по теории сложных систем и системному анализу таких ученых, как В.Н. Бурков, В.Л. Бурковский, С.Н. Васильев, М.В. Губко,

А.А. Емельянов, Б.Г. Ильясов, В.А. Ириков, В.В. Кульба, В.В. Липаев, Н.Н. Моисеев, Д.А. Новиков, Г.С. Поспелов, И.В. Прангишвили, С.В. Смирнов, А.В. Цветков, А.Д. Цвиркун, В.Д. Шапиро, Э.А. Трахтенгерц [1-31], и зарубежных исследователей К. Jensen, К. Heldman, Н. Kerzner, G.J. Klir, L. Kristensen, Y. Shoham, К. Leyton-Brown, М. Mesarovic, Y. Takahara [1, 32-38].

Решением задач обеспечения надежности и оптимального использования ресурсов при управлении техническим обслуживанием в киберфизических системах занимались А.А. Большаков, Н.О. Дородных, С.П. Орлов, В.М. Помогаев, М.В. Щербаков, А.Ю. Юрин, J. Andrews, В. Le, J. Sheng, D. Prescott [39-59].

Исследованиями в области управления процессами обслуживания железнодорожного пути активно занимаются ученые И.Н. Розенберг, В.И. Уманский, С.А. Быкадоров, Н.В. Дилигенский, В.О. Певзнер, В.Я. Шульга, О.Ф. Мирошниченко [60-67].

Целью диссертационной работы является повышение оперативности и снижение затрат при устранении дефектов рельсового пути железной дороги на основе системы поддержки принятия решений, использующей средства искусственного интеллекта и оптимизацию распределения ресурсов.

Для достижения поставленной цели поставлены и решены **следующие основные задачи:**

- 1) системный анализ процессов управления при техническом обслуживании и ремонте рельсового пути;
- 2) построение онтологии процесса диагностики и технического обслуживания рельсового пути и формирование на её основе базы знаний;
- 3) разработка способа диагностики состояния элементов верхнего строения пути и оперативной классификации дефектов с использованием технологий искусственного интеллекта;
- 4) постановка и решение задачи оптимизации времени проведения ремонтных работ и распределения ресурсов;

5) разработка системы поддержки принятия решений для управления процессом технического обслуживания и ремонта и назначения рабочих бригад на устранение выявленных неисправностей рельсового пути.

Объектом исследований являются производственная структура и процессы управления производственными задачами по техническому обслуживанию железнодорожного пути.

Предметом исследований являются методы и модели обработки данных о состоянии рельсового пути и средства поддержки принятия решений по распределению трудовых и материальных ресурсов для устранения дефектов рельсового пути.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы системного и математического анализа, методы интеллектуального анализа данных, исследования операций и математического программирования, а также формализованного представления данных для принятия решений.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

1. Разработана онтология процесса технического обслуживания и ремонта верхнего строения пути, *основанная на построении базы знаний, аксиом и правил вывода, характерных для рассматриваемой предметной области, с целью получения новых знаний о состоянии рельсового пути на линейном участке с перегонами, что обеспечивает выбор подходящих технологических окон для перегонов с целью устранения выявленных неисправностей (п. 2 паспорта специальности 2.3.1).*

2. Предложен интеллектуальный классификатор дефектов верхнего строения пути, *отличительной чертой которого является комплексное использование трёх глубоких нейронных сетей: основной модели для распознавания всех объектов ВСП и двух дополнительных моделей для более точного распознавания объектов в рельсовых стыках и на рельсовых накладках соответственно, построенных на базе архитектуры SSD с классификатором в виде многослойной нейронной сети Mobilenet, и обучаемых на сформированных датасетах визуального контроля рельсового пути, что обеспечивает повышение скорости и достоверности распознавания и классификации дефектов (п. 4 паспорта специальности 2.3.1).*

3. Поставлена и решена задача оптимального назначения рабочих бригад для устранения дефектов рельсового пути на основе целочисленного линейного программирования с булевыми переменными, в которой, *в отличие от известных решений*, использован критерий минимума времени ремонтных работ и введены ограничения на длительность технологических окон, на расположение неотложных и укрупненных бригад в зависимости от классов и степени выявленных дефектов рельсового пути, что позволяет сократить общее время проведения ремонтных работ на железнодорожном пути (п. 2 паспорта специальности 2.3.1).

4. Предложена структура системы поддержки принятия решений при техническом обслуживании рельсового пути, *отличающаяся* использованием глубокой сверточной нейронной сети для оперативного формирования базы знаний по выявленным дефектам и решением целочисленной задачи оптимизации для формирования правил назначения рабочих бригад (п. 10 паспорта специальности 2.3.1).

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Онтология процесса технического обслуживания и ремонта верхнего строения пути и построение базы знаний, аксиом и правил вывода для получения новых знаний о состоянии рельсового пути на линейном участке с перегонами.

2. Интеллектуальный классификатор дефектов в виде комплекса трёх глубоких искусственных нейронных сетей: основной модели для распознавания всех объектов ВСП и двух дополнительных моделей для более точного распознавания объектов в рельсовых стыках и на рельсовых накладках соответственно, построенных на базе архитектуры SSD с классификатором в виде многослойной нейронной сети Mobilenet и обучаемых на сформированных датасетах визуального контроля рельсового пути.

3. Результаты решения задачи оптимального по минимуму времени ремонта назначения рабочих бригад на производственные работы по устранению дефектов рельсового пути на основе целочисленного линейного программирования с булевыми переменными с учетом ограничений на длительность технологических

окон, а также расположение рабочих бригад в зависимости от классов и степеней выявленных дефектов рельсового пути.

4. Структура системы поддержки принятия решений при техническом обслуживании рельсового пути, использующая сверточную нейронную сеть для оперативного формирования базы знаний по выявленным дефектам и решение целочисленной задачи оптимизации для формирования правил назначения рабочих бригад на устранение дефектов.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории интеллектуальных средств управления техническим обслуживанием железнодорожного пути на основе формального описания и формирования знаний о производственных процессах устранения дефектов рельсового пути и использования интеллектуального анализа данных.

Практическая значимость заключается в применении результатов диссертации для автоматизации обработки визуальных данных о состоянии рельсового пути и принятии решений при работе вагонов-путеизмерителей в реальном времени, что обеспечивает сокращение времени ремонтных работ и повышение эффективности использования ресурсов. Результаты диссертации могут применяться при техническом обслуживании других протяженных технических объектов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов исследования обеспечиваются корректным использованием методов математического программирования, искусственных нейронных сетей, согласованностью численных экспериментов с результатами практического использования методики и моделей на предприятиях.

Внедрение. Результаты научных исследований использованы в программном обеспечении диагностических комплексов инфраструктуры (ДКИ) производства АО НПЦ ИНФОТРАНС, г. Самара, для обработки в реальном времени видеоданных о состоянии элементов верхнего строения рельсового пути и распознавания дефектов (акт внедрения от 28.01.2026 г.).

Результаты диссертационного исследования в виде моделей и алгоритмов используются в учебном процессе Самарского государственного технического

университета при подготовке по образовательным программам по направлениям «Информатика и вычислительная техника» и «Программная инженерия».

Соответствие паспорту научной специальности 2.3.1: пункт 2 – Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; пункт 4 – Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; пункт 10 – Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались на следующих научно-технических конференциях: Международной научно-практической конференции «ХС Международных научных чтений (памяти Н.П. Дубинина)» (г. Москва, 2020 г.); 35-й, 37-й и 38-й Международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологиях» (г. Ярославль, 2022 г.; г. Казань, 2024 г.; г. Самара, 2025 г.); Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии – 2023» (г. Самара, 2023 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах, из них 4 – в рецензируемых научных изданиях, два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ, 6 статей в прочих изданиях.

Личный вклад автора. Все результаты, определяющие научную новизну, получены автором лично. В публикациях, выполненных в соавторстве, лично автору принадлежат следующие результаты: разработка искусственных нейронных сетей для классификации состояний рельсовых стыков [68-71], для распознавания дефектов рельсовых скреплений [72, 73], для распознавания элементов инфраструктуры контактной сети железной дороги [74, 75], постановка и решение задачи оптимального назначения рабочих бригад на ремонт рельсового пути [76, 77].

Структура и объем диссертации

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 132 наименований, изложена на 184 страницах текста, содержит 82 рисунка, 26 таблиц и 6 приложений.

1 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

1.1 Управление работами по содержанию железнодорожного пути

Одной из главных задач по обеспечению работоспособности и безопасности железной дороги является своевременно предупреждение и выявление возникающих неисправностей путём непрерывного контроля состояния рельсового пути. Важно вовремя обнаружить и устранить возникающий дефект или его развитие. Для этого на железной дороге проводятся два вида работ: техническое обслуживание или содержание пути и ремонт пути. Первый тип состоит в проведении периодических плановых проверок состояния путей и фиксации их результатов. Второй вид работ определяет перечень необходимых ремонтных работ по результатам технического обслуживания.

Анализ состояния железной дороги часто осуществляется при помощи изучения её работы с использованием подвижной нагрузки, лазерного сканирование участков путей, различных механических и оптических приборов или визуального осмотра. Диагностика состояния путей может производиться при помощи вагонов-путеизмерителей с автоматическим контролем под нагрузкой при скорости движения до 160 км/ч, с записью на лентах и автоматической расшифровкой результатов измерений геометрических параметров; вагонов-дефектоскопов и вагонов-лабораторий [78]. Плановые осмотры проводятся круглогодично, а их виды зависят от времени года. Особенностью проведения работ является их распределение по участкам железной дороги в небольшом объёме. При этом отсутствует взаимосвязь проводимых мероприятий. Плановые работы стараются проводить так, чтобы минимизировать их влияние на расписание движения поездов. Ремонт пути проводится в так называемые «технологические окна», когда проезд подвижных составов по участку пути ограничивается. Продолжительность работ обычно занимает от 1 до 6 часов. В результате проведения проверок составляются отчёты о состоянии пути.

Сеть железных дорог представляет собой протяжённую и комплексную систему. Она включает в себя множество сложных конструкций, таких как верхнее строение пути (ВСП), контактная сеть, элементы фиксации и компенсации, искусственные сооружения. В пределах системы необходимо отслеживать качественное, исправное состояние ключевых объектов инфраструктуры, таких как рельсы, шпалы, стрелочные переводы, фиксаторы контактной сети, грузокомпенсаторы опор контактной сети.

Для упрощения контроля над состоянием железных дорог выполняется их разбиение на зоны ответственности. Они носят название дистанций пути. Также такие выделенные зоны часто называют путевыми частями (ПЧ). Дистанции пути чётко выделяются в пределах определённой страны. В России насчитывается около 300 ПЧ, все они представляют собой структурные подразделения, входящие в состав филиалов РЖД. Например, Дальневосточная железная дорога включает в себя 27 дистанций пути [79], а в состав Куйбышевской железной дороги входит 18 дистанций пути [80].

Путевые части объединяются в более крупные подразделения - дирекции инфраструктуры (ДИ).

Техническое обслуживание и ремонт железнодорожной инфраструктуры осуществляется отдельно по каждой ПЧ в пределах зоны её ответственности. Каждая дистанция пути делится на эксплуатационные участки пути [81, 82]. Их длина обычно составляет 50-100 км. Эксплуатационные участки подразделяются на более мелкие линейные участки, иногда называемые околотками. Их число зависит от грузонапряжённости и величины эксплуатационного участка. Обычно число околотков не превышает 4. Длина линейного участка составляет от 20 до 60 км [81, 82]. В состав околотков входят одно или несколько рабочих отделений.

На рисунке 1.1 приведена структурная схема железнодорожной сети с точки зрения содержания и ремонта путей. Пунктир на схеме между соседними горизонтальными блоками одного уровня показывает, что данных элементов может присутствовать или реально присутствует больше, чем показано на изображении.

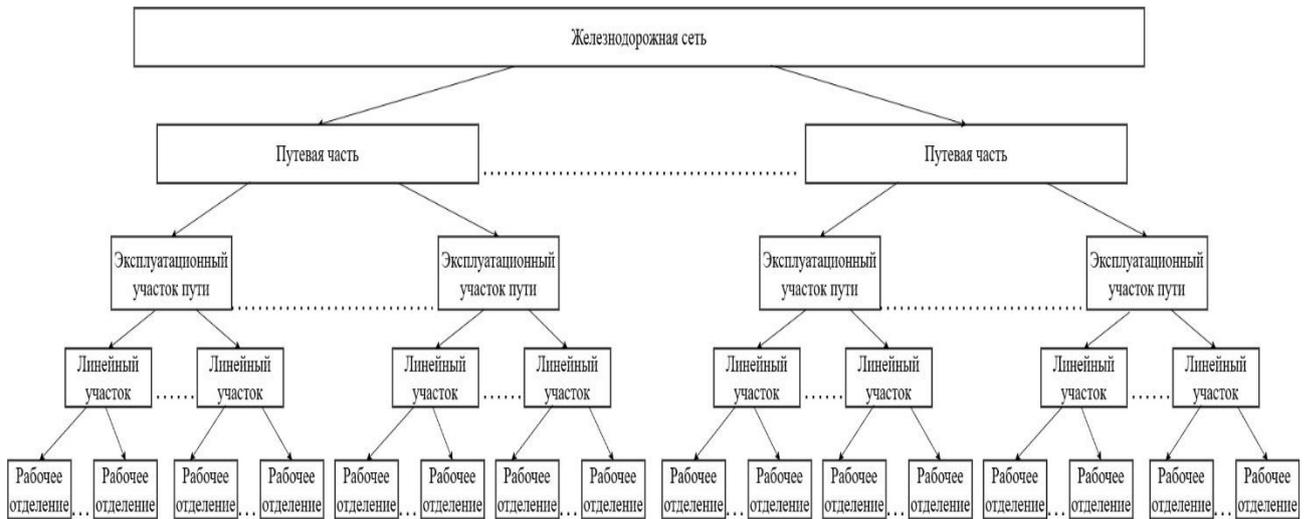


Рисунок 1.1 - Структурная схема железнодорожной сети

На рисунке 1.2 приведена структура управления ПЧ с обозначением главных должностных лиц рабочего персонала. Пунктир на схеме между соседними по горизонтали блоками показывает, что данных элементов может присутствовать больше, чем изображено.

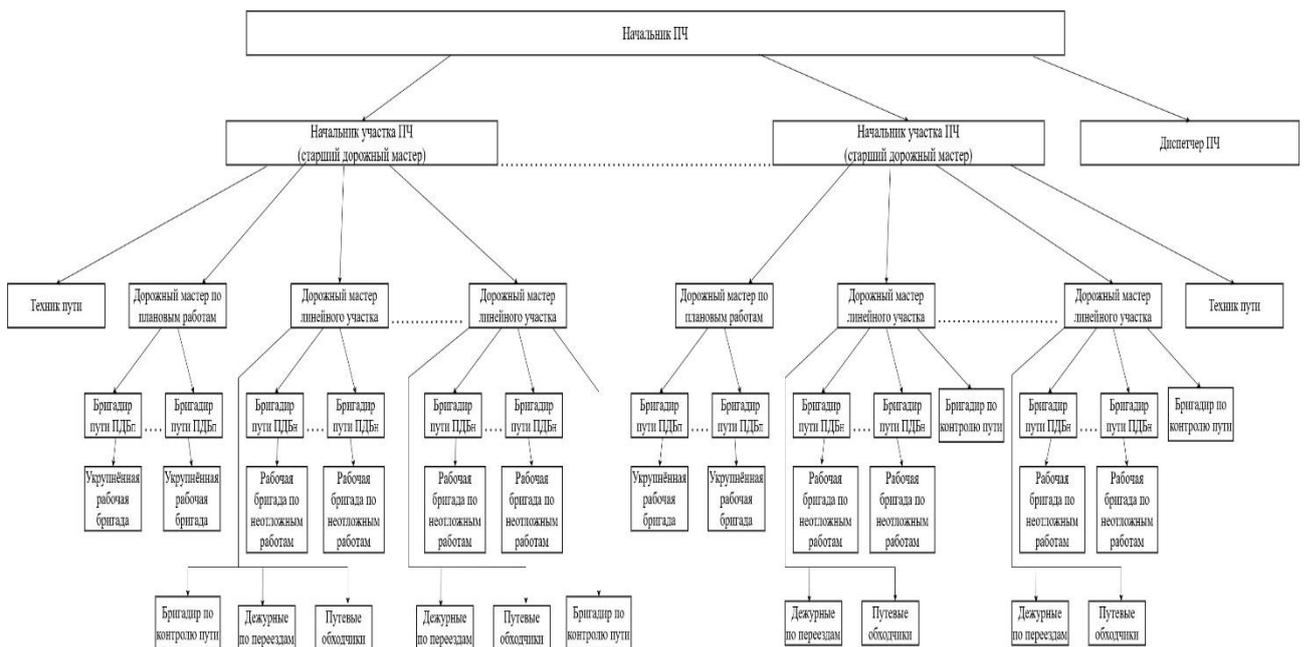


Рисунок 1.2 – Структурная схема управления обслуживанием путевой части

Во главе дистанции пути стоит начальник пути. Он несёт полную ответственность за обслуживание и исправность отведённой ему ПЧ. Начальник дистанции пути отвечает за организацию и координацию работ всех структурных

подразделений ПЧ, отвечает за безопасность использования ПЧ, контролирует работу обслуживающего персонала, оценивает качество проводимых работ, составляет отчёты для высшего руководства [81]. Также он участвует в планировании процессов обслуживания и модернизации пути, занимается наймом рабочих.

Начальник участка пути (ПЧУ) управляет процессами обслуживания и ремонта рельсового пути в пределах выделенного ему эксплуатационного участка. Также его часто называют старшим дорожным мастером. Начальник участка пути осуществляет планирование работ по обслуживанию и ремонту элементов железнодорожной инфраструктуры, составляет графики проводимых на дороге мероприятий и контролирует процесс их выполнения. Старший дорожный мастер подчиняется непосредственно начальнику ПЧ. Он отвечает за безопасность выделенного ему участка пути, сообщает о возникших неисправностях, отчитывается за проводимые работы по обслуживанию и ремонту перед начальником дистанции пути. В случае обнаружения неисправностей старший дорожный мастер принимает необходимые меры по устранению дефекта и докладывает о проблеме и действиях начальнику ПЧ.

Дорожный мастер линейного участка (ПД) подчиняется начальнику участка пути. Он несёт ответственность за состояние элементов железнодорожной инфраструктуры в пределах околотка. Под контролем дорожного мастера находятся земельное полотно, полоса отвода, вернее строение пути, искусственные сооружения, путевые и сигнальные знаки, поворотные брусья, железнодорожные переезды и прочие объекты.

Дорожный мастер вместе с бригадиром по контролю за состоянием пути раз в пол месяца осуществляет осмотр элементов инфраструктуры. В периоды дождей, метелей, пропуска весенних и ливневых вод он устраивает дополнительные проверки состояния железной дороги. Не реже двух раз в месяц мастер обязан проводить проверку пути путём проезда на площадке вагона или локомотиве [81].

Дорожный мастер проверяет качество выполняемых работ по содержанию и ремонту элементов железной дороги. Он обучает бригадиров пути, путевых

рабочих и обходчиков правильным приёмам обслуживания и проверки пути, проводит инструктажи по технике безопасности, стремится к повышению производительности труда, принимает меры к наиболее экономному использованию рабочей силы, оборудования и материалов. Дорожный мастер лично руководит частью работ по устранённым неисправностям – разгонкой зазоров, сплошной заменой балласта [82]. После проведения обслуживающих или ремонтных работ он составляет отчёт о задействованных ресурсах околотка.

Рабочие отделения линейных участков располагаются в пределах железнодорожных станций. В рабочем отделении базируется персонал, выполняющий контроль и ремонт элементов железной дороги. Одним из самых важных представителей такого отделения является бригадир пути по неотложным работам (ПДБ_н), который подчиняется непосредственно ПД. Обычно в пределах околотка работает 1-2 бригады по выполнению неотложных работ под руководством ПДБ_н каждая.

Бригадир по контролю за состоянием пути (ПДБ_к) проводит осмотры пути и переездов на линейном участке пути в установленные нормативами сроки, сопровождает дефектоскопные тележки и мотрисы, выполняет проверку шпал, измерение износа рельсов и металлических частей стрелочных переводов. Он ведёт учёт всех выявленных на участке неисправностей, контролирует устранение дефектов при последующих проверках пути и вносит соответствующие отметки.

Бригадир по планово-предупредительным работам (ПДБ_п) руководит укрупнённой рабочей бригадой, выполняющей профилактические работы в пределах всего эксплуатационного участка. Осуществляет свою деятельность под руководством ПД_п. В редких случаях при большой протяжённости и сложности эксплуатационного участка могут использоваться две укрупнённые рабочие бригады под руководством ПДБ_п каждая.

Для ТО на линейном участке формируется два типа рабочих бригад: укрупнённая и неотложная. Первая занимается выполнением планово-профилактических работ под руководством с ПД_п и ПДБ_п согласно установленному графику. Укрупнённая бригада не имеет привязки к

определённому рабочему отделению и перемещается между станциями в процессе осуществления своей деятельности. Она занимается плановым устранением дефектов, а также выполняет крупные по объёму первоочерёдные работы по исправлению проблем. Обычно укрупнённая бригада состоит из 25-30 человек. При проведении плановых работ она может быть разделена на части и под руководством бригадира выполнять работы распределённо.

Неотложные рабочие бригады базируются в рабочих отделениях. Каждая из них находится под управлением ПДБ_н. В состав рабочей бригады обычно входит 8-15 человек. Она выполняет работ по неотложному ремонту в пределах зоны ответственности дорожного мастера линейного участка. Также бригада по неотложным работам занимается небольшими по объёму первоочередными работами по устранению неисправностей. Она осуществляет деятельность по содержанию пути в соответствии с установленным графиком. План работ как неотложных рабочих бригад, так и укрупнённых может меняться несколько раз за день в зависимости от текущей обстановки на железной дороге, выявленных неисправностей.

Для достижения точки, в которой необходимо выполнить ремонт бригада по неотложным работам чаще всего пользуется служебными автомобилями. Иногда им предоставляется служебный вагон для транспортировки. При необходимости ремонта надземных конструкций, таких как элементы контактной сети, могут использоваться специальные подъемные устройства или платформы. Укрупнённая бригада эксплуатационного участка обычно осуществляет перемещение на служебном вагоне [82].

Диспетчер ПЧ (дежурный ПЧ) также является важным связующим звеном в работе дистанции пути. Он координирует работу рабочих бригад, осуществляет передачу важной информации между сотрудниками ПЧ и начальством. Диспетчер контролирует исполнение планов работ и отчитывается о их выполнении. Он подчиняется начальнику ПЧ. Диспетчер регулирует процесс проведения работ и осуществляет контроль за соблюдением техники безопасности. Также он

осуществляет передачу сообщений и запросов в другие структурные подразделения, не связанных с дистанциями пути, и другие путевые части.

Помимо работников ПЧ стоит обозначить сотрудников других подразделений, с которыми у ПЧ часто производится взаимодействие. Среди такого персонала можно выделить поездного диспетчера и дежурного по железнодорожной станции. Они занимаются координацией движения поездов. Поездной диспетчер (ДНЦ) руководит перемещением подвижных составов на своём участке - диспетчерском круге, - который никак не связан с эксплуатационными участками пути [83]. Он обеспечивает безопасность и бесперебойность движения поездов в пределах выделенной ему зоны ответственности. Поездной диспетчер контролирует графики и расписания железнодорожных перевозок, принимает решения о внесении корректировок и изменений в планы курсирования подвижных составов, стремится минимизировать возникающие задержки. Он должен оперативно реагировать на возникающие чрезвычайные ситуации и аварии. Поездной диспетчер взаимодействует напрямую с машинистами поездов.

Дежурный по станции (ДСП) координирует движение поездов в пределах железнодорожных станций. Он распоряжается приёмом, отправлением и пропуском подвижных составов. Дежурный по станции также стремится выполнить установленный график перевозок, минимизировать задержки. Он отвечает за безопасность движения поездов в пределах станции. Дежурный занимается своевременной подачей вагонов и правильным формированием подвижных составов. Он подчиняется поездному диспетчеру и должен выполнять его распоряжения. Дежурный по станции также взаимодействует с машинистами поездов.

1.2 Формальное описание организационной структуры ТО железнодорожного пути

На основе составленного описания можно ввести ряд формальных обозначений, соответствующих структуре ПЧ.

Организационная структура рассматривается, начиная с уровня эксплуатационного участка пути, который обозначается как OS :

- OS – эксплуатационный участок, руководитель - начальник CH .
- $LP = \{lp_i\}$, $i = \overline{1, I}$ – множество линейных участков OS ,
 $RM = \{rm_i\}$ – дорожные мастера линейных участков.

- $WD = \{wd_{ij}\}$, $j = \overline{1, J}$ – множество рабочих отделений на i -м линейном участке.

- $WB = \{wb_{ijn}\}$, $n = \overline{1, N}$ – множество неотложных бригад j -го рабочего отделения на i -м линейном участке, $BW = \{bw_{ijn}\}$ – бригадиры неотложных бригад.

- $MB = \{mb_{ijnk}\}$, $k = \overline{1, K_{ijn}}$ – множество монтеров в составе n -ой неотложной рабочей бригады в j -ом рабочем отделении на i -ом линейном участке.

- $WU = \{wu_p\}$, $p = \overline{1, P}$ – множество укрупнённых бригад под руководством бригадиров $BU = \{bu_p\}$ и дорожного мастера эксплуатационного участка RU , выполняющие планово-предупредительные и крупные по объёму первоочерёдные работы.

- $MU = \{mu_{pq}\}$, $q = \overline{1, Q_p}$, – множество монтеров пути в составе p -ой укрупнённой бригады.

- Каждый линейный участок lp_i характеризуется длиной LP_i , а эксплуатационный участок – длиной L^{OS} , при этом величина LP_i , не может превышать L^{OS} : $LP_i \leq L^{OS}$.

- В каждой неотложной рабочей бригаде wb_{ijn} количество монтеров пути должно быть не менее K^{min} и не более K^{max} :

$$K^{min} \leq K_{ijn} \leq K^{max} \quad (1.1)$$

- В каждой укрупнённой рабочей бригаде wu_p количество монтеров пути должно быть не менее Q^{min} и не более Q^{max} :

$$Q^{min} \leq Q_p \leq Q^{max} \quad (1.2)$$

- Перемещение рабочих между отделениями не производится:

$$mb_{ijnk} \nrightarrow wd_{il}, l = \overline{1, J}, l \neq j, \forall i, n, k \quad (1.3)$$

• При наличии двух бригад на станции монтеры одной бригады могут быть задействованы в соседней:

$$mb_{ijnk} \rightarrow wb_{ijw}, w = \overline{1, 2}, w \neq n, \forall i, j, k \quad (1.4)$$

• Неотложная рабочая бригада одного отделения может устранять неисправности, находящиеся в зоне ответственности бригад других отделений, на том же линейном участке:

$$wb_{ijn} \rightarrow lp_i, \forall i, j, n \quad (1.5)$$

• При крайней необходимости рабочая бригада одного отделения может устранять неисправности на соседних линейных участках:

$$wb_{ijn} \rightarrow \begin{cases} (lp_{i-1}; lp_{i+1}), & \text{если } i = \overline{2, I-1}; \\ lp_2, & \text{если } i = 1; \\ lp_{i-1}, & \text{если } i = I. \end{cases}, \forall j, n \quad (1.6)$$

1.3 Анализ основных характеристик дефектов рельсового пути

Безопасность и надёжность железной дороги зависят от качества и состояния элементов инфраструктуры пути. Основные компоненты системы должны поддерживаться в исправном состоянии. Потому важно иметь возможность оперативно определить качество и пригодность того или иного элемента пути. С этой целью используются критерии оценки состояния компонентов железной дороги. Они позволяют выявить отклонения от норм содержания пути и задают правила определения неисправностей. Ситуация, при которой текущее состояние элементов железной дороги не соответствует заданным критериям и препятствует её безопасной эксплуатации называется *отступлением*. Появление дефектов, неисправностей и проблем с инфраструктурой пути связано с формированием таких отступлений. Фиксация, отслеживание и устранение выявленных отклонений является ключевой задачей при содержании рельсового пути.

В процессе эксплуатации железной дороги на каждом участке пути предусмотрена установка предельно допустимой скорости движения подвижного состава [84]. Её максимальное значение зависит от ряда факторов, как внутренних, связанных с инфраструктурой пути, так и внешних. Допустимая скорость

движения поезда зависит от типа железной дороги (однопутная или многопутная), типа шпал на железной дороге (деревянные или железобетонные), типа поезда (пассажирский, грузовой, скоростной), наличия искусственных сооружений, текущего состояния элементов инфраструктуры и других условий.

К внешним факторам, влияющим на предельно допустимую скорость движения, можно отнести погодные условия (дождь, снег, туман, сильный ветер и прочее), особенности ландшафта, наличие станций или населённых пунктов. Существуют участки пути, на которых для подвижных составов не устанавливаются описанные ограничения. На них максимальное значение скорости движения определяются техническими возможностями проезжающего поезда.

Все отступления подразделяют на четыре основные категории.

- *Отступления I степени* – находятся в пределах установленных критериев и не требуют ограничений установленной на участке пути скорости движения поездов. Такие отступления не требуют устранения и проведения ремонтных работ. Они не учитываются при оценке состояния пути [85, 86].

- *Отступления II степени* – не требуют ограничения установленной скорости движения поездов, но оказывают влияние на плавность хода подвижного состава и интенсивность расстройств пути. Особо сильное воздействие такие дефекты оказывают при частом повторении в пределах километра. Появление отступлений II степени говорит о необходимости проведения профилактических работ. Такие дефекты служат критерием необходимости выправки рельсового пути. Они устраняются в плановом порядке.

- *Отступления III степени* – не требуют ограничения предельно допустимой скорости движения поездов, но требуют оперативного реагирования и устранения. Их появление говорит о предотказном состоянии железнодорожной инфраструктуры [85, 86]. Если не отремонтировать дефекты, вызванные данными отклонениями, до очередной плановой проверки пути, то они могут привести к значительному ухудшению плавности движения поезда и повысить эффективность накопления деформаций пути. При этом отступления III степени вскоре могут

перерасти в отступления IV степени, что приведёт к необходимости ограничения установленной скорости движения.

- *Отступления IV степени* – требуют незамедлительного устранения. Являются самым серьёзным и опасным видом отклонений от норм. При появлении отступлений IV степени производится ограничение установленной скорости движения поездов, а в некоторых случаях и полная остановка движения [84, 87]. Данные отклонения могут привести к сходу подвижного состава с рельсов и аварии. Скорость движения может ограничиваться последовательно в зависимости от фактического значения параметра отступления.

Помимо описанных выше степеней отступлений отдельно могут выделять сезонные отступления. Такие отклонения контролируются в определённое время года, например, только весной. Также существуют и другие классификации отступлений, учитывающие различных аспекты возникающих дефектов и неисправностей [84, 87].

Отступления могут носить качественный или количественный характер. В первом случае дефект не связан с какими-либо числовыми показателями. Данные неисправности часто связаны с конкретным фактом и такими понятиями, как «отсутствие», «наличие», «обрыв». Качественные дефекты обычно могут быть определены путём визуального осмотра элемента инфраструктуры пути. К описанным неисправностям относят отсутствие клеммы рельсового скрепления, наличие трещины в железобетонной шпале, отсутствие болта в рельсовой накладке, оторванный с одного конца рельсовый соединитель, отсутствие скобы заземления опоры, избыток балласта, обрыв провода контактной сети и другие.

Количественные отклонения связаны с определённым числовым параметром. Отступление фиксируется в случае выхода значения характеристики за установленные пределы, либо превышением заданного порога. Обнаружение таких неисправностей обычно производится при помощи измерительных средств, оборудования, инструментов, путём лазерного анализа. Примерами количественных отступлений являются превышение допустимых значений стыковых зазоров, смещение контрольных сечений рельсовых плетей

бесстыкового пути (угон рельса), образование вертикальных или горизонтальных ступенек в рельсовом стыке, разворот шпалы поперёк пути, превышение предельного значения угла наклона основного фиксатора контактной сети, нарушение допустимого расстояния от грузокompенсатора опоры контактной сети до уровня земли [85].

Отступления можно разделить на простые и комплексные. Первый тип описывает дефекты, которые связаны с одиночными элементами инфраструктуры железной дороги: шпалой, креплением, накладкой, рельсовым соединителем, опорой, фиксатором контактной сети и другими. Неисправности для простых отступлений связаны непосредственно с объектом, на котором они возникли, и только с ним. Примерами таких отклонений служат отсутствие крепления, открученный болт в рельсовой накладке, оторванный рельсовый соединитель, оторванный штепсель, скол на шпале и прочее.

Возникновение комплексных отступлений связано с несколькими элементами инфраструктуры пути. Формирование отклонения происходит под влиянием некоторого числа объектов и может быть связано как с качественными, так и с количественными характеристиками [84]. Яркими примерами таких отступлений служат нарушение эпюры шпал (неправильное расстояние между соседними шпалами), разворот шпалы вокруг продольной оси (наличие отсутствующих креплений или смещение подкладки крепления относительно оси шпалы), угон рельса, нарушение расстояния от зажимов дополнительного фиксатора контактной сети до основного фиксатора и другие.

Для каждого отступления назначаются приоритет и срок устранения. Они находятся в обратной зависимости: чем важнее возникшее отклонение, тем меньше времени даётся на ремонт (быстрее необходимо исправить). Существует общая классификация приоритетов и связанных с ними сроков устранения, приведённая в таблице 1.1. Помимо указанных наименований могут использоваться и другие классификации [88].

Таблица 1.1 — Приоритеты и сроки устранения отступлений

| Приоритет | Срок устранения, дней |
|----------------|-----------------------|
| Неотложный | 1 |
| Первоочерёдный | 2-7 |
| Плановый | до 30 |

Конкретные отступления и критерии их выявления описаны в специальных классификаторах (документах), находящийся в обороте в структурных подразделениях РЖД [84, 87].

Классификаторы содержат всю необходимую информацию об отступлениях и порядке их контроля. В них приводится информация о том, с какой периодичностью необходимо осуществлять проверки в рамках содержания рельсового пути для каждого элемента. По каждому отступлению предоставляется подробная информация: название, изображение дефекта для визуального представления (при наличии), описание, примечание, требования по ограничению скорости, приоритет и сроки устранения. На рисунке 1.3 приведен пример описания отклонения в классификаторе для дефекта «излом рельса», а на рисунке 1.4 приведён пример описания отклонений в системе автоматического торможения поездов (САУТ).

Исходя из полученного описания отступлений можно определить множество дефектов, которые необходимо устранить $D = \{d_r\}$, $r = \overline{1, R}$. Каждая r -ая неисправность характеризуется вектором параметров $(d_r^{pr}; d_r^{elt}; d_r^{deg}; d_r^{time})$, где $d_r^{pr} = \overline{1, 3}$ – приоритет, d_r^{elt} – срок устранения, $d_r^{deg} = \overline{1, 4}$ – степень серьёзности, d_r^{time} – время, необходимое на ремонт.

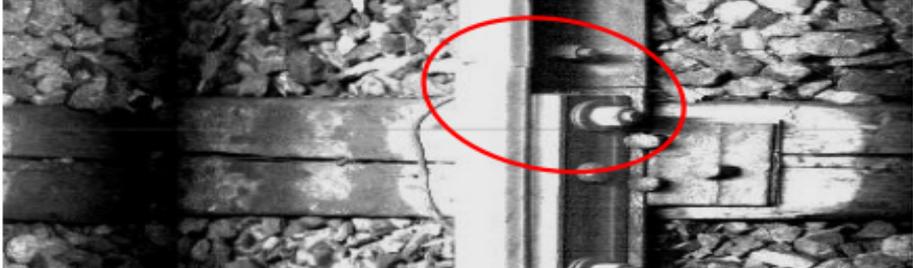
| № п/п | Наименование отступления |
|---------------------|---|
| Излом рельса | |
| 1.8. | <div data-bbox="424 309 1337 577" style="text-align: center;">  </div> <p data-bbox="821 611 948 638" style="text-align: center;">Описание</p> <p data-bbox="424 678 1348 840">Излом рельса – термин используется для определения: 1) факта разрушения рельса по всему сечению или с отделением (выколом) части головки или части головки и шейки рельса; 2) поверхности разрушения полностью разрушенного на два или более кусков рельса.</p> <p data-bbox="691 880 1078 907" style="text-align: center;">Выдача ограничений скорости</p> <p data-bbox="424 947 1348 1008">При изломе рельса для предотвращения схода подвижного состава путь для движения поездов закрывается.</p> <p data-bbox="742 1048 1027 1075" style="text-align: center;">Занесение в ЕК АСУИ</p> <p data-bbox="424 1115 1348 1176">В ЕК АСУИ создаются инциденты с закрытием пути для движения поездов.</p> <p data-bbox="804 1216 965 1243" style="text-align: center;">Примечания</p> <p data-bbox="424 1283 1348 1444">1. Данное отступление выявляется по результатам сплошной расшивки. 2. При подозрении на излом рельса и невозможности однозначной оценки состояния рельса, разрешается до проведения натурного осмотра и ультразвукового контроля ограничивать скорость до 40 км/ч.</p> |

Рисунок 1.3 – Описание дефекта «излом рельса» в классификаторе отступлений

5. Напольное оборудование системы автоматического управления торможением поездов

| № п/п | Показатель | Параметры отступлений от норм содержания | Указания по эксплуатации | Приоритет | Срок устранения (дней) |
|-------|---|--|---|----------------|------------------------|
| 5.1. | Не соответствие расстояния от первой точки подключения шлейфа САУТ-ЦМ до изолирующего стыка | менее 0,5 м более 1,5 м (включительно) | приведение в соответствие с требованиями распоряжения ОАО «РЖД» от 30 декабря 2015 г. № 3168/р (пункт 10.8) | первоочередной | 7 |
| 5.2. | Не соответствие расстояния от первой точки подключения шлейфа САУТ-Ц до изолирующего стыка | менее 0,5 м более 4,0 м (включительно) | приведение в соответствие с требованиями распоряжения ОАО «РЖД» от 30 декабря 2015 г. № 3168/р (пункт 10.8) | первоочередной | 7 |
| 5.3. | Не соответствие нормы укладки перемычек | смещение более 5 см (включительно) от перпендикуляра (точки подключения к рельсу), измеряется на расстоянии 1 метра от рельса | приведение в соответствие с требованиями распоряжения ОАО «РЖД» от 30 декабря 2015 г. № 3168/р (пункт 10.8) | первоочередной | 7 |
| 5.4. | Не соответствие нормы укладки перемычек | наличие петель | приведение в соответствие с требованиями распоряжения ОАО «РЖД» от 30 декабря 2015 г. № 3168/р (пункт 10.8) | первоочередной | 7 |

Рисунок 1.4 – Описание дефектов в САУТ в классификаторе отступлений

1.4 Процедуры проведения ремонтных работ по устранению неисправностей рельсового пути

В результате проведения проверки элементов инфраструктуры железной дороги могут быть определены следующие мероприятия:

- проведение анализа выявленных отступлений с целью определения необходимости и срочности их устранения;
- ограничение допустимой скорости движения подвижного состава на участке пути или, при необходимости, полная остановка движения, для проведения ремонтных работ;
- планирование работ по устранению неисправностей с учётом расписания движения поездов;
- подготовка рабочих бригад, необходимых материалов и инструментов для устранения проблем;
- выполнение ремонтных работ;
- формирование отчёта о предпринятых действиях и проведённых работах.

В случае отсутствия неисправностей участок дороги признаётся безопасным для движения. Также в результате проверки состояния инфраструктуры железной дороги могут быть выявлены отклонения, не требующие ремонта в принципе (I степени) или не требующие срочного устранения (II степени). В первом случае обнаруженные отступления не учитываются при оценке состояния пути. Не требующие срочного устранения дефекты принимаются к сведению и вносятся в отчёт о контроле состояния пути. Они устраняются в рабочем порядке в соответствии с графиком планово-профилактических работ [84, 86].

Для более наглядной демонстрации процесса ремонта неисправности на железной дороге в диссертационной работе разработана диаграмма в нотации IDEF0 с описанием основных процессов и действий, предпринимаемых с момента получения информации о дефекте и до формирования отчёта о выполненных работах по устранению проблемы. Она обладает ясностью и наглядностью, предлагает четкую иерархическую структуру, позволяет выполнить разбиение процессов на подзадачи. На рисунке 1.5 приводится контекстная диаграмма A-0 нотации IDEF0, а рисунке 1.6 – диаграмма декомпозиции уровня A-0.



Рисунок 1.5 – Контекстная диаграмма A-0 нотации IDEF0

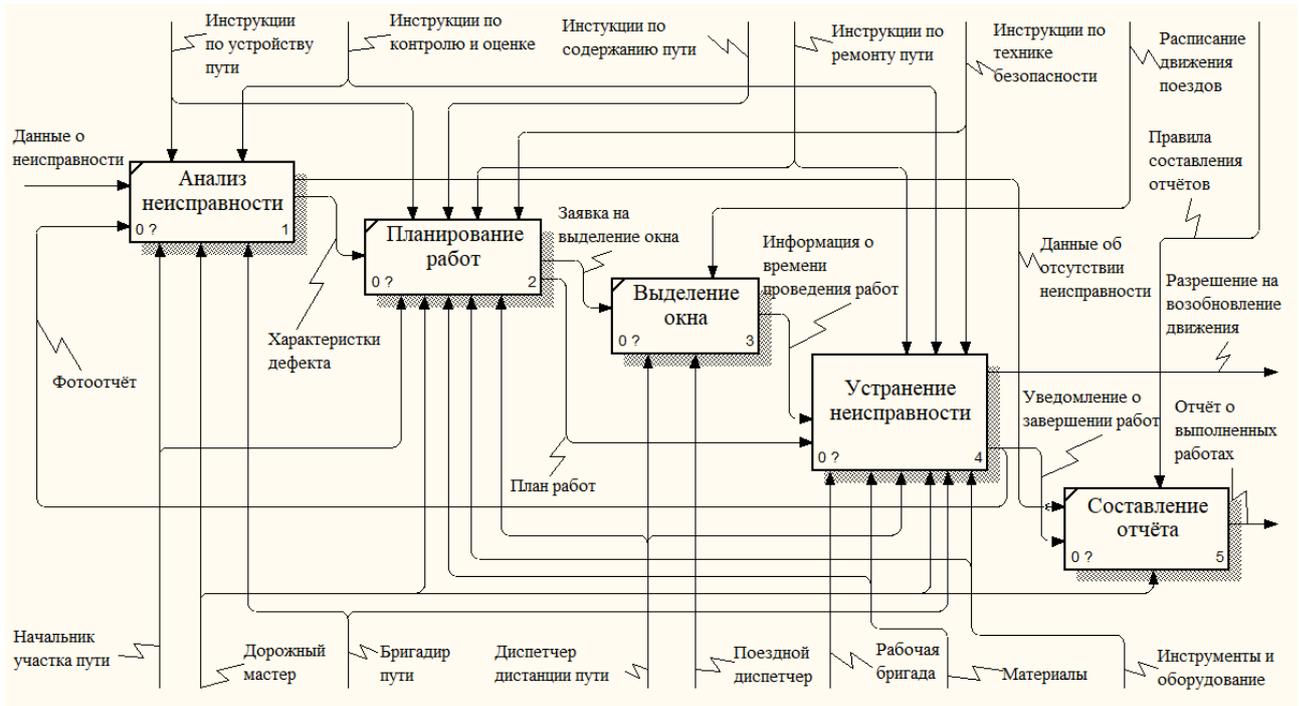


Рисунок 1.6 – Диаграмма декомпозиции A-0 нотации IDEF0

Обнаружение неисправности элементов инфраструктуры пути может быть произведено при различных обстоятельствах: в процессе выполнения плановых проверок и работ, при обнаружении машинистами проблем с движением поезда, при получении данных от автоматизированных систем контроля и других ситуациях [87, 89].

В настоящей работе основное внимание уделено проектированию и анализу автоматизированной системы управления техническим обслуживанием на базе информации, поступающей при прохождении железнодорожного участка вагоном-путеизмерителем или вагоном-лабораторией [78, 90].

Примером такой системы является система видеоконтроля. Она отслеживает состояние элементов инфраструктуры железнодорожного пути при помощи устанавливаемых на вагон-путеизмеритель камер. В работе [68] была предложена система мониторинга технического состояния рельсового пути с использованием классификатора дефектов на базе нейронной сети (рисунок 1.7). Это решение лежит в основе дальнейших исследований, проводимых в данной диссертации.

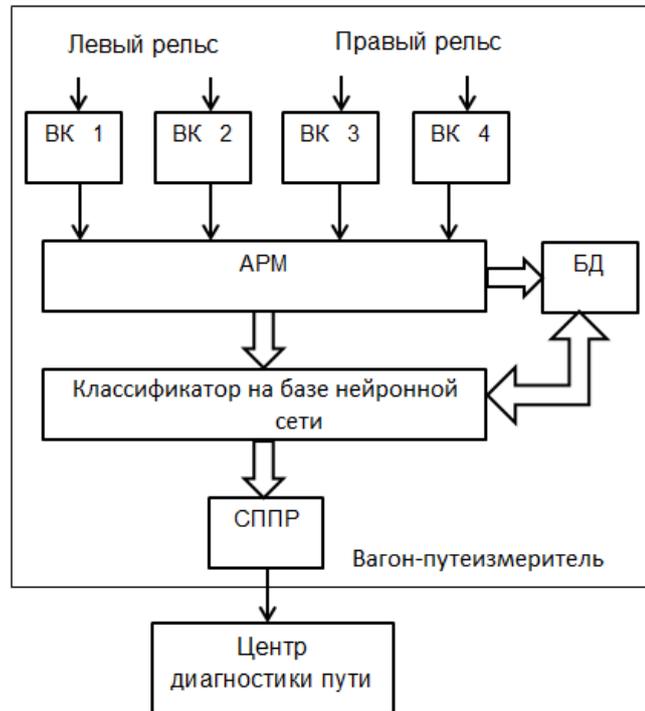


Рисунок 1.7 - Система мониторинга рельсового пути:

ВК 1 – ВК 4 – видеокамеры видимого спектра, АРМ – автоматизированное рабочее место оператора, БД – база данных видеосъемки, СППР – система поддержки принятия решений [68]

В работе [68] предложено использование приведённого на рисунке 1.7 диагностического комплекса для распознавания состояний рельсовых стыков. Формирование изображений со стыками осуществляется при помощи линейных камер в оттенках серого. Скорость движения вагон-путеизмерителя по рельсовому пути может достигать 108 км/ч [68]. Выполняется съёмка каждого рельса с обеих сторон. Полученные изображения помещаются в базу данных видеосъёмки и, затем, в режиме реального времени анализируются при помощи искусственной нейронной сети (ИНС). В зависимости от вида рельсовых стыков выделено 8 классов их состояний [68]. Для распознавания типов стыков была модифицирована и дообучена модель VGG16 [68]. После выполнения классификации оператору поступает информация о выявленных дефектах и рекомендуемых действиях.

В процессе составления плана устранения дефекта определяется время его выполнения. При планировании ремонта учитывает не только время, требуемое

для устранения неисправности, но и время, необходимое на подготовку рабочей бригады, достижение ей места дефекта, ограждение зоны ремонта и контроль устранения проблемы. Соответствующие рамки определяются при составлении детального плана действий по ликвидации угрозы. Для замены деревянной шпалы потребуется 1-1,5 часа рабочего времени, железобетонной — 2-3 часа. Подтягивание крепёжных элементов на скреплении или накладке займёт 20-30 минут [91]. На корректировку положения стержневого металлического фиксатора контактной сети уйдёт 1-1,5 часа. Приварка рельсового соединителя занимает около 1 часа. Но есть и более объёмные работы. Замена рельсового скрепления займёт 1,5-2 часа, а замена рельсов может занять 4-6 часов [92]. Устранение излома рельса или накладки может потребовать до 6 часов, а в некоторых случаях – 1-2 дня.

При организации планирования устранения неисправностей производится определения порядка их устранения. Прежде всего, рассматриваются неотложные проблемы, потом требующие решения в ближайшее время (первоочерёдные). В последнюю очередь планируется устранение неисправностей, которые могут быть отремонтированы в ходе профилактических и предупредительных работ. В случае появления более приоритетной проблемы по ходу следования уже принятому графику работ происходят изменения в плане. Прежде всего, он составляется для важных дефектов.

После составления плана работ производится определение времени их проведения. Дорожный мастер согласует разработанный план с начальником эксплуатационного участка. ПЧУ через диспетчера ПЧ отправляет поезвному диспетчеру запрос на предоставление технологического окна для проведения мероприятий по устранению угроз. В этот период движение по ремонтируемому участку пути производиться не будет. Запрос на технологическое окно должен быть отправлен не позднее 3-4 суток до начала запланированных работ [93]. Поездной диспетчер в соответствии с графиком движения поездов и задачей минимизации задержки перевозок предоставляет необходимый интервал времени. Через дежурного ПЧ он сообщает ПЧУ о предоставленном окне для проведения

работ. Начальник участка информирует дорожного мастера. Бригада рабочих готовится к выполнению работ в обозначенное время.

Предоставляемая продолжительность окна зависит от вида работ. При сплошной замене элементов рельсового пути (капитальный ремонт) выделяют 4-6 часов, при замене некоторых элементов (средний ремонт) — до 3 часов, при планово-профилактических работах — 1,5 - 2,5 часа. При этом отведённого на проведение мероприятий времени может не хватить. Недостаток времени на ремонт явление нередкое, особенно если речь идёт о планово-профилактических работах, например, выправке рельсовой колеи. В подобных сценариях мероприятия по устранению угроз производятся в несколько этапов. Технологические окна для работ предоставляются два или более раза в течении нескольких дней [87, 93]. Подобный порядок проведения работ отражается в плане. Продолжительность технологического окна обычно не превышает 8 часов. Крупные работы часто производятся в ночное время суток [93].

На основе проведённого анализа можно выделить множество запланированных работ A_i на линейном участке , где будет выполняться задача по устранению угроз. При этом

$$A_i = A^{PL} + A^{PR} + A^{EM}, \quad (1.7)$$

где $A^{PL} = \{a_{iu}^{PL}\}$, $u = \overline{1, U_i}$ задаёт множество плановых работ по устранению дефектов, $A^{PR} = \{a_{iv}^{PR}\}$, $v = \overline{1, V_i}$ – множество первоочерёдных работ, $A^{EM} = \{a_{ie}^{EM}\}$, $e = \overline{1, E_i}$ – множество неотложных работ. Под индексом i подразумевается номер линейного участка, где будет выполняться задача по устранению угрозы.

Цель проведения любой из работ a_{iu}^{PL} , a_{iv}^{PR} , a_{ie}^{EM} на участке i состоит в ликвидации дефекта d_r из множества неисправностей D . На отнесение дефекта к определённому множеству ремонтных работ A^{PL} , A^{PR} , A^{EM} влияют его приоритет d_r^{pr} и степень d_r^{deg} :

$$d_r \rightarrow \begin{cases} a_{iu}^{PL}, \text{ если } d_r^{pr} = 1, d_r^{deg} = 2; \\ a_{iv}^{PR}, \text{ если } d_r^{pr} = 2, d_r^{deg} = 3; \forall d_r \in D_i, \\ a_{ie}^{EM}, \text{ если } d_r^{pr} = 3, d_r^{deg} = 4. \end{cases} \quad (1.8)$$

где $D_i \in D$ – подмножество неисправностей, выявленных на участке i .

Для выполнения работы выделяются ресурсы в виде рабочих бригад, материалов, инструментов и оборудования. На выполнение задачи из A^{PL} может быть назначена только бригада из множества WU :

$$a_{iu}^{PL} \rightarrow wu_p, \forall i, u, p \quad (1.9)$$

Для выполнения работы A^{EM} назначается только неотложная бригада из множества WB , относящаяся к участку, на котором выявлена неисправность:

$$a_{ie}^{EM} \rightarrow wb_{ijn}, \forall i, j, e, n \quad (1.10)$$

На выполнение задачи из A^{PR} может быть назначена как бригада из WU , так и бригада из WB с соответствующего lp_i :

$$a_{iv}^{PR} \rightarrow wu_p, \forall i, v, p \quad (1.11)$$

$$a_{iv}^{PR} \rightarrow wb_{ijn}, \forall i, j, v, n \quad (1.12)$$

Для выполнения ремонта пути определяется минимальное число монтеров пути, которое необходимо задействовать в работах:

$$a_{iu}^{PL} \rightarrow Q_u^{min}, a_{ie}^{EM} \rightarrow K_e^{min}, a_{iv}^{PR} \rightarrow Q_v^{min}, a_{iv}^{PR} \rightarrow K_v^{min}, \forall i, u, v, e \quad (1.13)$$

Любую запланированную на i -ом линейном участке работу из множества A можно обозначить как a_{ig}^{JB} :

$$a_{ig}^{JB} \in A, g = \overline{1, G_i}, \quad (1.14)$$

где G_i - число работ на i -ом участке.

Для выполнения ремонтных работ по устранению дефекта d_r необходимо выделение технологического окна продолжительностью T_r^O . Оно должно быть не меньше времени, необходимого на устранение дефекта:

$$T_r^O \geq d_r^{time} \quad (1.15)$$

При этом одного окна может оказаться недостаточно для устранения дефекта d_r . В таком случае потребуется определение z , $z = \overline{1, Z_r}$ окон для устранения неисправности в несколько этапов:

$$\sum_{z=1}^{Z_r} T_{rz}^O \geq d_r^{time} \quad (1.16)$$

Выделение нескольких технологических окон обычно требуется для проведения работ A^{PL} , а для ремонтов из множеств A^{PR} и A^{EM} обычно достаточно одного окна сроком T_r^O .

Для выполнения работы a_{ig}^{JB} потребуется время T_{ig}^{JB} . В него входят время на подготовку бригады к ремонту T_{ig}^{PR} , на перемещение к месту выявления дефекта $T_{ijn}^{WB} (T_{pg}^{WU})$, на устранение дефекта d_r^{time} , на контроль устранения дефекта T_r^K и на возвращение бригады в отделение $T_{ijn}^{WB} (T_{pg}^{WU})$:

$$T_{ig}^{JB} = T_{ig}^{PR} + 2 * T_{ijn}^{WB} (T_{pg}^{WU}) + d_r^{time} + T_r^K, \forall i, j, n, p, r \rightarrow g, \quad (1.17)$$

где g -ая работа направлена на устранение r -того дефекта.

Если дефект не получится устранить за отведённое время окна T_r^O , то он ремонтируется за Z_r окон, и время работ составляет:

$$T_{ig}^{JBF} = Z_r * T_{ig}^{JB}, \forall i, g, r, \quad (1.18)$$

где T_{ig}^{JBF} – время выполнения ремонтных работ с учётом числа выделенных окон.

1.5 Аналитический обзор существующих решений ключевых проблем по техническому обслуживанию железнодорожного пути

Вопросы повышения безопасности железных дорог и качества работ по содержанию пути были рассмотрены во многих исследовательских работах. В наиболее значимых из них решаются такие задачи, как уменьшение затрат ресурсов на проведение ремонта, оптимизация продолжительности технологических окон, предупреждение и прогнозирование возникновения неисправностей, управление железнодорожными перевозками и ремонтными мероприятиями, повышение их экономической эффективности, проектирование онтологии технического обслуживания для составления базы знаний.

1.5.1 Обзор подходов по совершенствованию планирования ремонтных работ с целью повышения их экономической эффективности

В работе Иванчиной О.В. [60] рассматривается вопрос оптимизации продолжительности технологических окон для проведения запланированных мероприятий по капитальному и среднему ремонту. Автор провел анализ возникающих задержек в движении поездов и предлагает собственный метод подсчёта возникающих издержек при вынужденной мерах по ограничению перемещения подвижных составов. В работе выполняется вычисление затрат, возникающих как в связи с изменениями в организации движения и простоя поездов, так и в связи с необходимостью проведения ремонта. Производится учёт вида и продолжительности мероприятий по устранению неисправностей. Для вычисления издержек, связанных с ремонтом пути, автор предлагает использовать следующую формулу:

$$E_{\Pi} = E_{\text{пр}} + E_{\text{пн}} + E_{\text{пм}} + E_{\text{пи}} + E_{\text{пб}}, \quad (1.19)$$

где E_{Π} – расходы по организации ремонтных работ, тыс. руб./окно [60];

$E_{\text{пр}}$ – расходы на содержание монтёров пути, тыс. руб.;

$E_{\text{пн}}$ – расходы на доставку монтёров к месту работы и обратно, тыс. руб.;

$E_{\text{пм}}$ – расходы по эксплуатации комплекта путевых машин, тыс. руб.;

$E_{\text{пи}}$ – расходы, связанные с использованием подвижного состава, тыс. руб.;

$E_{\text{пб}}$ – расходы по перевозке балласта, тыс. руб.

Автор подробно расписывает принципы вычисления слагаемых в формуле (1.19) и приходит к выводу, что задержки в движении поездов и затраты на ремонт пути находятся в прямой зависимости от продолжительности технологического окна. Первый случай описывается они описываются линейной функцией (рисунок 1.8), во втором – схожа с квадратичной (рисунок 1.9).

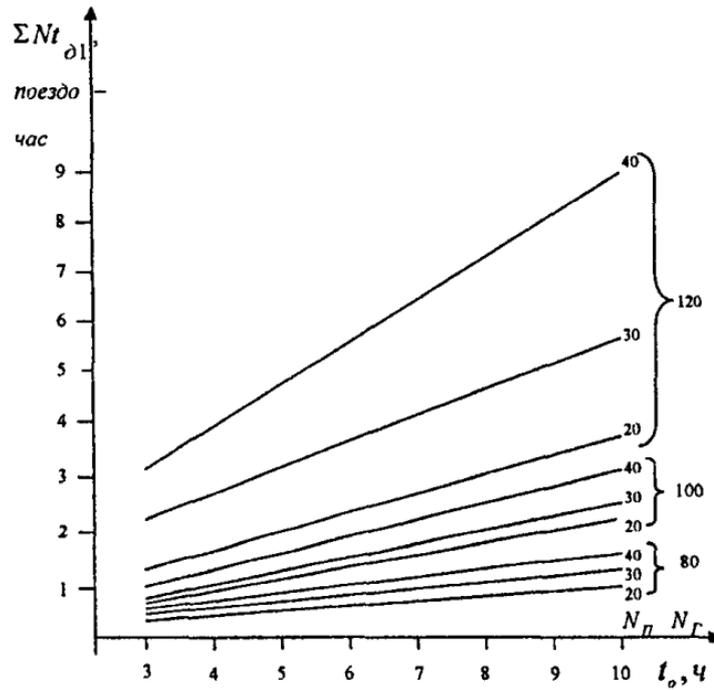


Рисунок 1.8 – График зависимости простоя поездов от продолжительности окна [60]

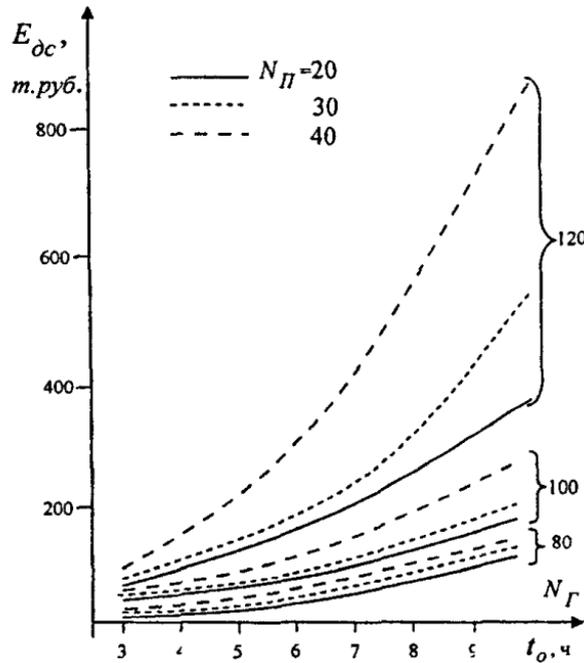


Рисунок 1.9 – График зависимости расходов по простоям поездов от времени окна [60]

Автор предлагает методику, позволяющую определить продолжительность окна таким образом, чтобы минимизировать описанные затраты. Выполняется

оценка влияния длительности окна на расходы по задержкам поездов и ремонтных работам. Для определения общих денежных потерь предложена следующая функция:

$$E_{\Gamma} = \frac{L_{\Gamma}}{f(t_o - t_p)} (E_{\partial} + E_{\Pi}), \quad (1.20)$$

где E_{Γ} – общие издержки за весь сезон работ, тыс. руб. [60];

t_o – продолжительность окна, час.;

t_p – время разворота и свёртывания основных работ, час.;

E_{∂} – затраты по издержкам от простоя поездов, тыс. руб.;

E_{Π} – затраты на ремонт пути, тыс. руб.

С целью получения оптимальной продолжительности окна автор минимизирует функцию (1.20). Для получения результатов задействуются подходы математической статистики и теории вероятностей. В работе обеспечивается экономическая эффективности при планировании работ по технического обслуживанию пути. Проведя эксперименты, Иванчина О.В. сделала вывод, что оптимальная длительность окна уменьшается с увеличением массы поезда и размеров движения [60]. Однако при этом растут затраты от простоя.

Панормов В.В. в работе [61] рассматривал вопросы эффективности функционирования производственно-транспортных систем (ПТС), вырабатывает мероприятия по совершенствованию и оптимизации их деятельности. Автор активно использует методы системного анализа, математического моделирования и статистики, теории экспериментов. Основное внимание уделяется особенностям поставок материалов и сырья, получения готовой продукции, спросу на ресурсы и электроэнергию. Осуществляется построение математических моделей ПТС на основе методологии системной динамики Дж. Форрестера. Автор производит декомпозицию системы, рассматривая отдельно процессы производства и транспортировки. Затем изучается взаимодействие выделенных подсистем. Автор формирует структурные модели системной динамики, как для сбалансированной, так и для несбалансированной ПТС. Основная задача - оценка затрат на сырьё, материалы, продукцию и минимизация расходов этих ресурсы в процессе

производства. Автор оценивает экономическую эффективность разработанной системы по шести показателям: объёму потребительских заказов, себестоимости единицы продукции, степени обеспеченности спроса, загрузке производственных мощностей, запасам сырья и готовой продукции и трудозатратам [61].

Особый интерес в работе [61] представляет четвёртая глава. В ней автор в качестве транспортной подсистемы рассматривает железнодорожные перевозки. Он подчёркивает, что рост грузооборота усиливает износ рельсового пути. В связи с этим происходит рост затрат на ремонтно-восстановительные работы. Автор поднимает вопрос о необходимости эффективного управления процессами железнодорожных перевозок. Он проводит анализ участка Куйбышевской железной дороги размером 400 км [61].

С целью минимизации совместных затрат на содержание рельсового пути и перевозку в работе [61] выполняется постановка задачи оптимизации длительности технологических окон. Автор решает её для участка Куйбышевской дороги. Рассматриваются расходы на следующие виды затрат: задержку поездов, использование других путей, технологию проведения ремонта, путевые машины, длину участка [61]. Автор подчёркивает важность оптимизации времени окон для формирования рациональных стратегий управления производственной деятельностью.

В работе [62] предложено использование спутниковых технологий для выполнения высокоточного спутникового позиционирования подвижных составов на железной дороге. Автор стремится повысить качество планирования процесса перевозок и эффективность управления им, ускорить технико-экономический эффект, а также повысить безопасность движения [62]. Исследования базируются на использовании теории автоматического управления, математической статистики, теории вероятностей, а также теории надёжности.

Уманский В.И. предлагает использовать бесплатформенную инерциальную навигационную систему (БИНС) для обеспечения высокоточного позиционирования поездов и решение по её интеграции со спутниковой навигационной системой (СНС). На рисунке 1.10 приводится предложенное

автором решение по внедрению спутниковых технологий в процесс отслеживания подвижных составов. В качестве исследуемой СНС для реализации спутникового позиционирования используется система ГЛОНАСС [62]. Автор уточняет, что применяемый подход также может быть использован при использовании GPS.

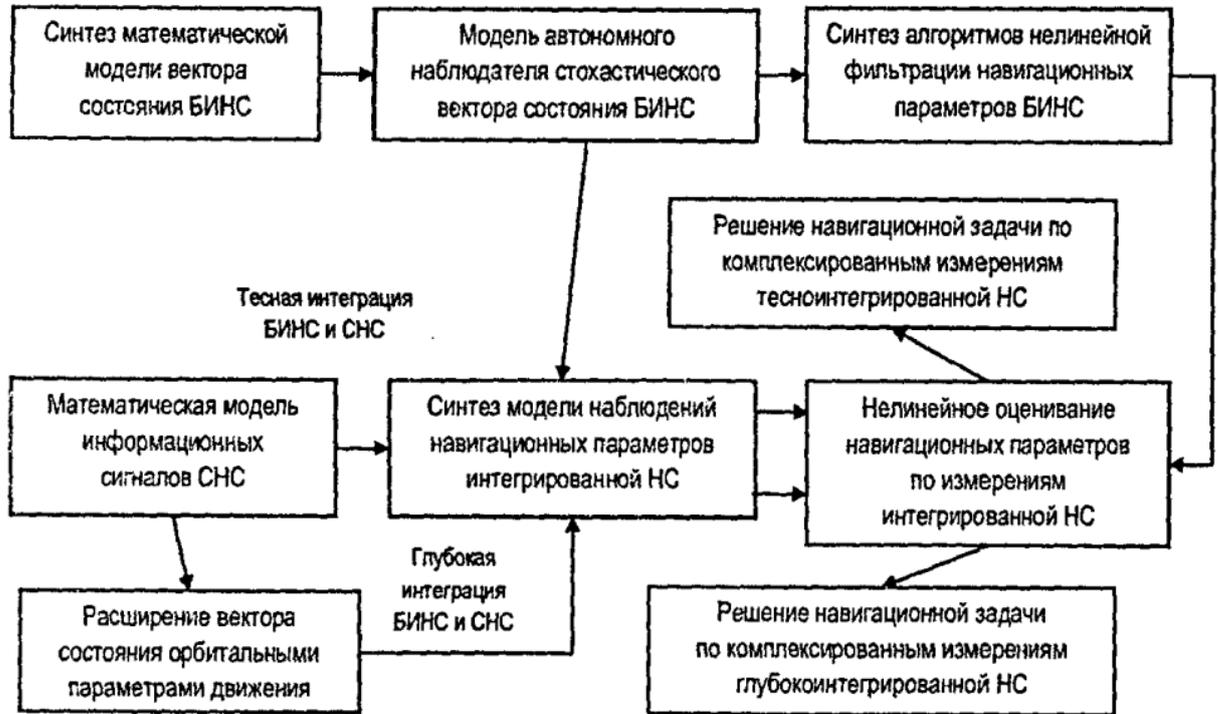


Рисунок 1.10 – Схема решения задачи тесной и глубокой интеграции СНС и БИНС [62]

Наибольший интерес в работе [62] представляет автоматизированная система управления движением поездов в периоды выделения технологических окон. Предложено использование технологий БИНС и СНС для составления графика движения поездов, получения информации о свободных путях, определения доступных для проезда железнодорожных переездов и перегонов, организации движения подвижных составов на станциях [62]. Автор описывает архитектуру предлагаемой автоматизированной системы по управлению работой участком в период выделения технологического окна (рисунок 1.11).

В качестве целевой функции системы автор предлагает использовать следующее выражение:

$$n_{\text{ок}}(n_{\text{фак}}) \rightarrow \max, \quad (1.21)$$

где $n_{\text{ок}}$ – число поездов в оперативном графике [62];

$n_{\text{фак}}$ – число фактически поступающих поездов.



Рисунок 1.11 – Архитектура автоматизированной системы ОГДПО [62]

В период действия окна предполагается пропуск поездов пакетами (по несколько составов), размер которых должен быть максимально возможным. При этом наибольший приоритет проезда имеют пассажирские и срочные поезда.

Также в работе [62] предложено использование технологий лазерного сканирования для автоматического определения профиля железнодорожного полотна. Это позволяет фиксировать следующие параметры: ненормативную ширину плеча балластной призмы и обочины земляного полотна, места с завышенной крутизной откосов, нарушение структурных линий полотна [62]. На рисунке 1.12 приведена схема измерений земляного полотна [62].

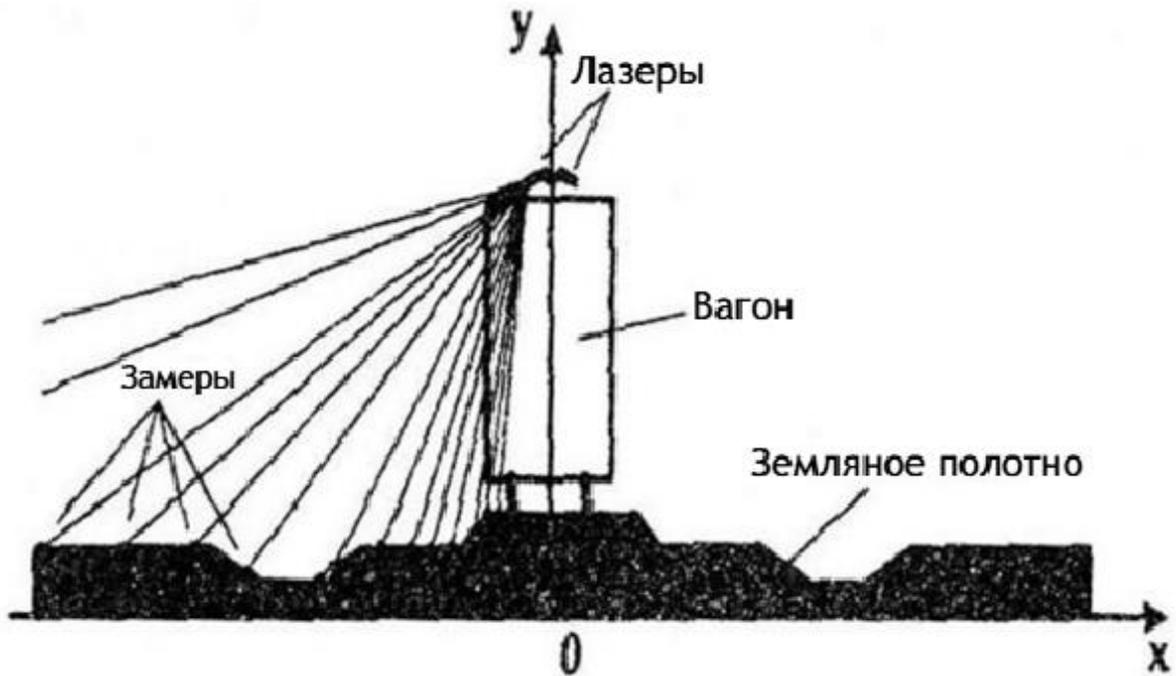


Рисунок 1.12 – Схема измерений земельного полотна [62]

Коваленко А.Н. рассматривает вопросы организации системы путевого хозяйства, планирование и выполнения работ по содержанию рельсового пути в условиях перехода на линейную систему деления участков. Автор выполняет анализ качества состояния железной дороги на опытном участке Приволжской железной дороги в 1000 км [63]. Исследованы особенности проведения подъёмочного, среднего и капитального вида ремонта. Внимание уделяется частоте проведения обслуживания путей и охвату в рамках длины участка. При этом автор также отмечает, что для путевых работ характерен недостаточный уровень механизации – порядка 15 %. Он определяет, что фронт подъёмочного и среднего ремонта чаще всего составляет около 0,5 км. При этом установлено, что зависимость длины ремонтируемого участка пути от продолжительности его эксплуатации подчиняется закону нормального распределения как для подъёмочного ремонта, так и для среднего ремонта.

В работе [63] построена математическая модель организации ремонтных работ. Предложены пути совершенствования планирования восстановительных мероприятий. Автор выполняет постановку и решение задачи назначения ремонтов

пути. Для каждого элемента рельсового пути определяется набор показателей, достаточных для описания его качества и надёжности. В зависимости от класса, группы и категории железной дороги автор задаёт для этих показателей предельные значения. Для каждой характеристики элемента пути определяется степень её важности. Для всех участков пути автор определяет коэффициент предпочтения:

$$C_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{если } P_{ij} > P_{kj} \\ \frac{1}{2}, & \text{если } |P_{ij} - P_{kj}| \leq \varepsilon_j \\ 0, & \text{если } P_{ij} < P_{kj} \text{ или } P_{ij} - r_j > \varepsilon_j \end{cases}, \quad (1.22)$$

где C_{ijk} – коэффициент предпочтения участка i относительно участка k по показателю состояния j [63];

P_{ij} и P_{kj} – значения j -ого показателя состояния соответственно i -ого и k -ого участка пути;

ε_j – коэффициент безразличия сравнения двух участков по j -ому показателю;

r_j – предельное значение показателя состояния j .

Автор также вводит индекс качества для каждого i -ого участка пути:

$$K_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C_{ijk}, \quad (1.23)$$

где K_{ij} – индекс качества для i -ого участка пути по показателю состояния j [19].

На основе формул (1.22) и (1.23) формируется множество участков пути, требующих планово-предупредительных работ, замены или ремонта шпал, замены или ремонта рельсов, замены или ремонта креплений, требующих выправки или исправления геометрии колеи. Ставится задача определения рационального полигона деятельности дистанций пути. Для этого предложено минимизировать стоимость производства ремонта:

$$\sum P = 2 * P_{\text{хоз}} + P_{\text{бал}} + 2 * (P_{\text{мон}} + P_{\text{мех}}) + 2 * (P_{\text{зп}}^{\text{гр}} + P_{\text{зп}}^{\text{пасс}} + P_{\text{зп}}^{\text{приг}}), \quad (1.24)$$

где $\sum P$ – суммарная стоимость проведения путевых работ [63];

$P_{\text{хоз}}$ – суммарные расходы, связанные с пробегом хозяйственных поездов;

$P_{\text{бал}}$ – суммарные расходы на доставку балласта к месту проведения работ;

$P_{\text{мон}}, P_{\text{мех}}$ – расходы по доставке рабочих путевых колонн и механиков путевых машин соответственно к месту работ;

$P_{зп}^{гр}$, $P_{зп}^{пасс}$, $P_{зп}^{приг}$ – суммарные расходы, связанные с задержками грузовых, пассажирских и пригородных поездов при пропуске по перегону.

В результате проведения исследований автор получает представленные на рисунке 1.13 протяжённости полигонов деятельности.

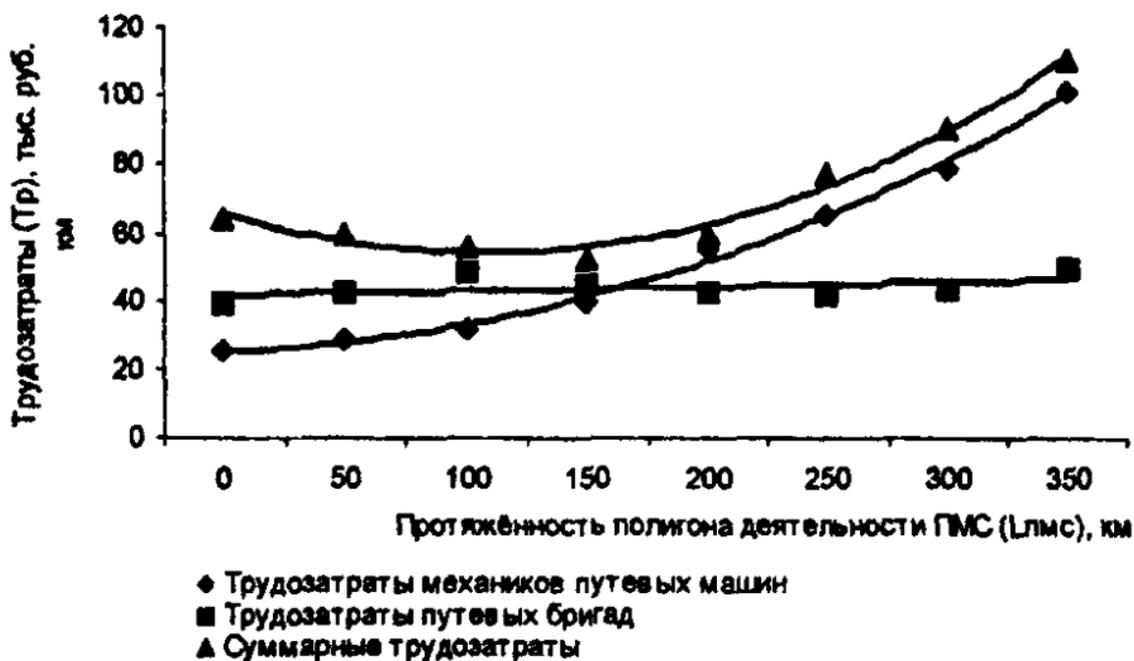


Рисунок 1.13 – Суммарные трудовозатраты на проведение работ в зависимости от полигона деятельности [63]

Коваленко А.Н. предлагает пути улучшения процессов содержания пути с целью повышения качества обслуживания путём оптимизации планирования профилактических работ и распределения материальных ресурсов, совершенствования структуры подразделений. В работе он активно использует методы математической статистики, данные наблюдений за состоянием пути.

В работе Прохорова В.М. [64] производится анализ системы ремонтов и текущего содержания пути с учётом состава мероприятий и планируемых сроков их проведения. Автор рассматривает вопрос совершенствования системы планирования ремонтных работ на основе статистической информации по частоте выявления отступлений II степени (рисунок 1.14). Автор использует методы математической статистики для построения моделей и анализа данных. Выполняется оценка влияния различных факторов на накопление дефектов пути:

среднемесячного числа неисправностей за предшествующий период проведения проверки; наличия и влияния сезонных изменений (дожди, снег), приводящих к росту числа накопления неисправностей; показателя наработки всех элементов конструкции пути, интенсивности эксплуатации участка пути [64].

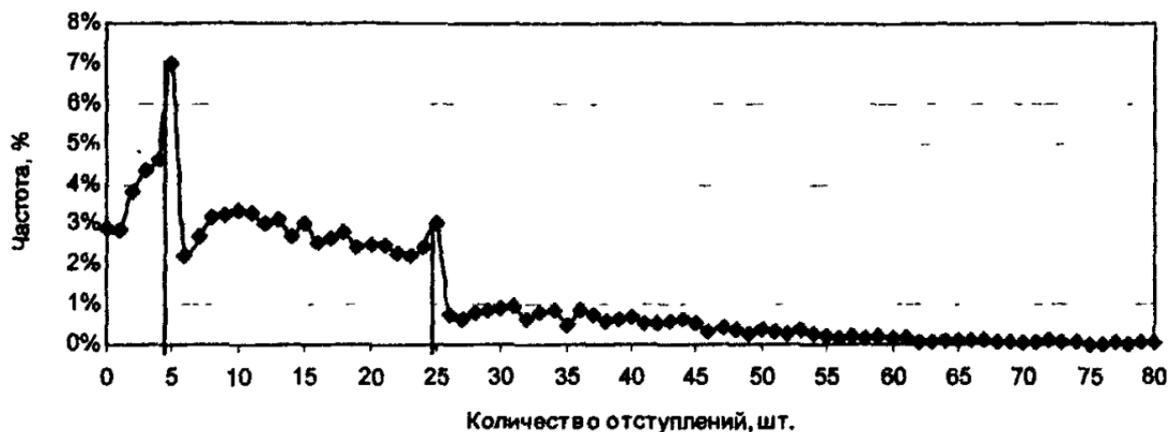


Рисунок 1.14 – Распределение среднемесячного количества отступлений II степени [64]

Автор подчёркивает важность оценки качества проведения ремонтных работ как одного из ключевых факторов, влияющих на число выявляемых отступлений II степени. Он вводит коэффициент эффективности ремонтов:

$$k_{\text{рем}} = \frac{N_{II}^{\text{до ремонта}}}{N_{II}^{\text{после ремонта}}}, \quad (1.25)$$

где $k_{\text{рем}}$ – коэффициент эффективности ремонтов [64];

$N_{II}^{\text{до ремонта}}$ – число отступлений II степени за 3-12 месяцев до ремонта;

$N_{II}^{\text{после ремонта}}$ – число отступлений II степени за 3-12 месяцев после ремонта.

На основе статистических данных о расстройствах пути автор рекомендует проводить уточнение планов работ и численности персонала на участке пути. Предложено использование трёх уровней управления: оперативного, тактического и стратегического. В первом случае реализуется техническое обслуживание рельсового пути с привлечением машинных комплексов в пределах отдельных километров и смежных с ними кривых. В рамках тактического плана в границах участка пути и околотков разрабатывается годовой график работ, включая

локальный и сплошной ремонт отдельных километров [64]. Также определяется перечень необходимых ресурсов для проведения восстановительных мероприятий. На стратегическом уровне планирования на основании данных о необходимых объемах работ определяется состав и парк технических средств, которые будут задействованы. Показано, что применение механизированных систем для устранения отступлений снижает интенсивность прироста неисправностей.

Рубченко Д.С. в своей работе [65] поднимает вопрос затрат на проведение капитального ремонта и реконструкции рельсового пути. Отмечается, что на данные мероприятия отводится более 90% от общего объема финансирования ремонтных работ. Выяснено, что, начиная с 2000 года, трудозатраты на строительство железнодорожного пути в 4,5 раза выше, чем на капитальный ремонт пути, при том, что стоимость таких работ только в 1,3 раза выше [65]. На рисунке 1.15 приводятся полученные автором результаты сравнения расходов. Подчеркивается возможность совершенствования процесса управления затратами при планировании устранения неисправностей. В работе [65] используются экономическая теория транспорта и строительства, комплексная оценка, методы системного и структурного анализа, сравнения и сопоставления.



Рисунок 1.15 – Сравнение стоимости 1 км реконструкции верхнего строения пути в ценах на 1 января 2000 года по сборникам на строительство и ремонтные работы

Автор предлагает подход по вычислению затрат на проведение ремонта, зависящий от используемых технологий организации путевых работ:

$$C_v^{\text{уст}} = C_v^{\text{рек}} + C_v^M + C_v^{\text{пр.п}} + C_v^{\text{п.д.}}, \quad v = 1, 2 \dots n, \quad (1.26)$$

где $C_v^{\text{уст}}$ – затраты, связанные с производством работ по реконструкции и капитальному ремонту пути, тыс. руб. [65];

$C_v^{\text{рек}}$ – сметная стоимость работ по ремонту пути, тыс. руб.;

C_v^M – затраты, связанные с пропуском поездов в период проведения ремонтных работ, тыс. руб.;

$C_v^{\text{пр.п}}$ – стоимостная оценка времени остановки движения, тыс. руб.;

$C_v^{\text{п.д.}}$ – размер недополученного ОАО РЖД дохода в связи с невозможностью пропуска планового количества поездов, тыс. руб.;

v – номер варианта производства работ;

n – количество альтернативных вариантов проведения работ.

Автор предлагает схему действий при определении того или иного способа поведения для составления оптимального плана работ (рисунок 1.16).

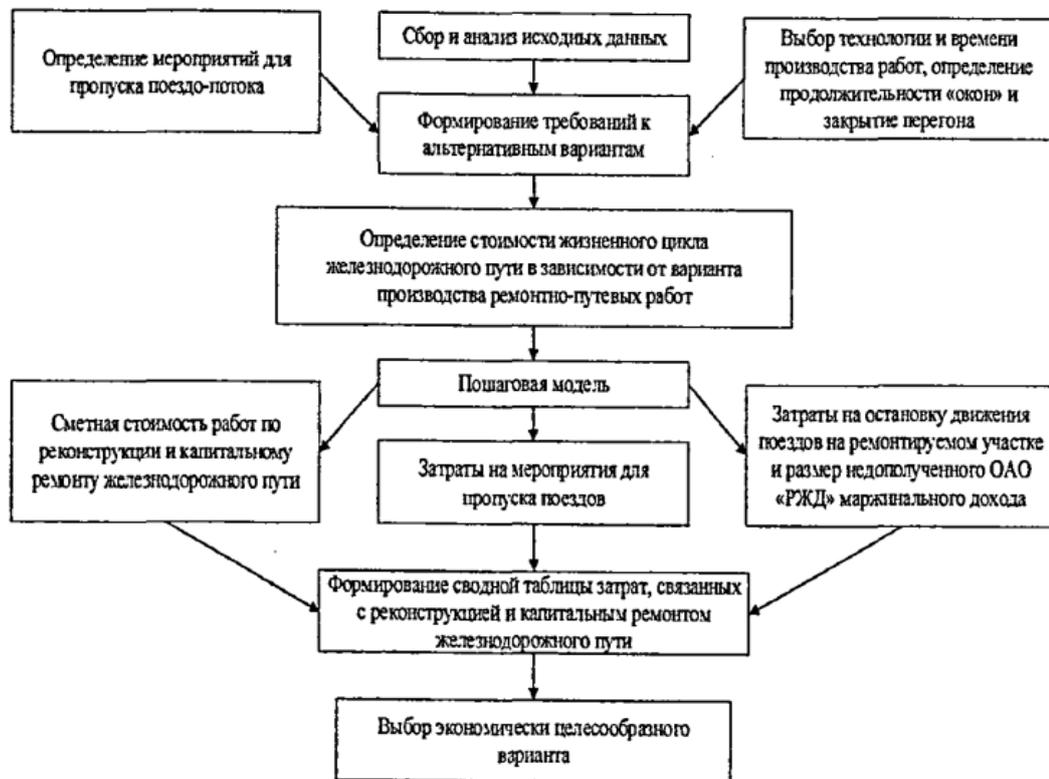


Рисунок 1.16 – Блок-схема расчета затрат и оценки альтернативных вариантов организации работ по капитальному ремонту пути [65]

В работе [66] предложен метод оценки состояния и стабильности геометрии рельсовой колеи путём анализа данных об отступлениях II степени. Используются методы математической статистики и теории вероятностей. Автор исследует основные особенности накопления неисправностей и динамические показатели отклонений в вертикальной плоскости верхнего строения пути. Предложено использование двух коэффициентов оценки состояния дороги: показателя роста числа отступлений k_n и показателя нестабильности k_Δ [66]. Применяется регрессионная оценка параметров. При этом оба коэффициента зависят от числа выявленных отступлений и задаются прямой тренда (рисунок 1.17 и рисунок 1.18). Признаком стабильности пути является близкое к нулю или отрицательное значение описанных показателей. На основе выведенных зависимостей автор предлагает принцип предсказания значений коэффициентов роста числа отступлений и нестабильности. Задействуется интерполяция с использованием полиномов Лагранжа [66]. Автор также находит зависимости показателя k_Δ от k_n и показателя k_n от среднемесячного количества выявляемых отступлений.

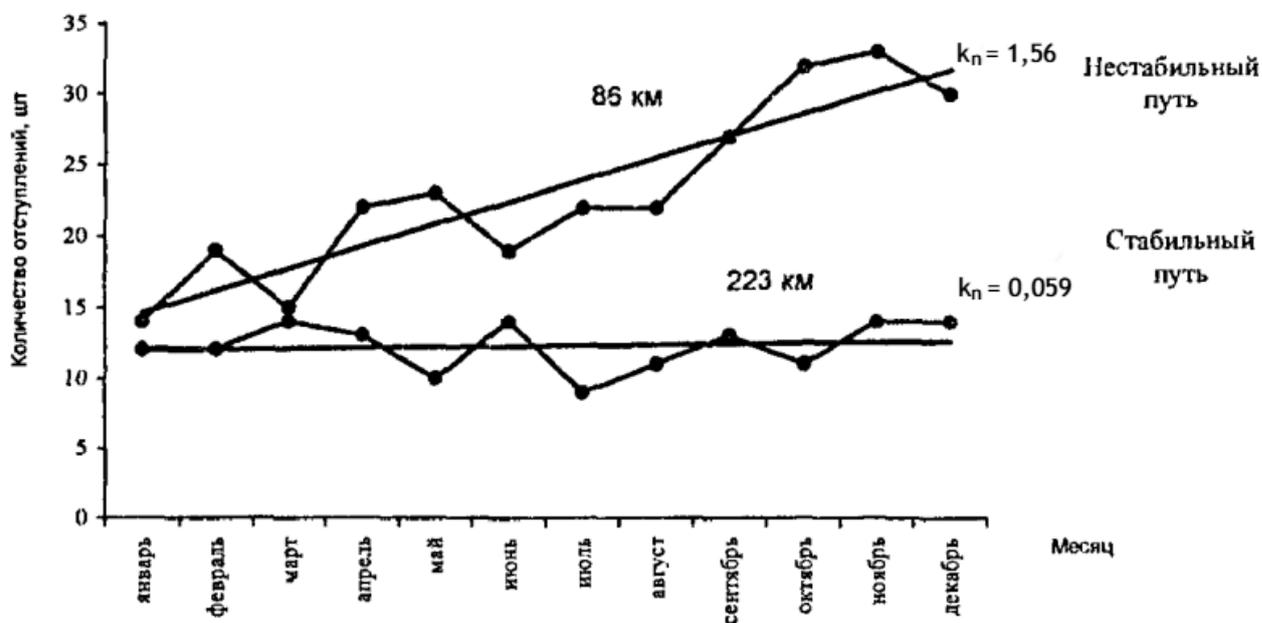


Рисунок 1.17 – Зависимость среднемесячного нарастания количества отступлений от пропущенного тоннажа (времени) на километр пути [66]

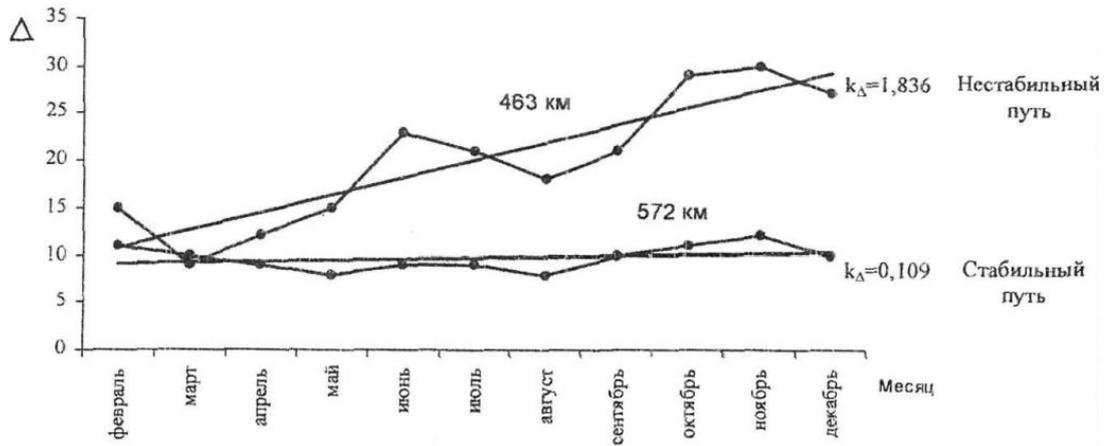


Рисунок 1.18 – Зависимость нарастания показателя нестабильности от пропущенного тоннажа (времени) на километр пути [66]

Результаты работы [66] заключаются в возможности своевременного выявления участков пути с нестабильными характеристиками и неблагоприятными тенденциями по отступлениям II степени, где рекомендуется проведение профилактических работ. Апробация прогностической модели выполнена на участке Юго-Восточной железной дороги [66]. Осуществлялось предсказание показателя роста количества отступлений II степени за следующие 8 лет для составления схемы плано-предупредительных работ. В зависимости от ожидаемого значения k_n на определённых этапах роста неисправностей предлагается устранение отклонений на локальных отрезках или использование комплекса машин (рисунок 1.19).

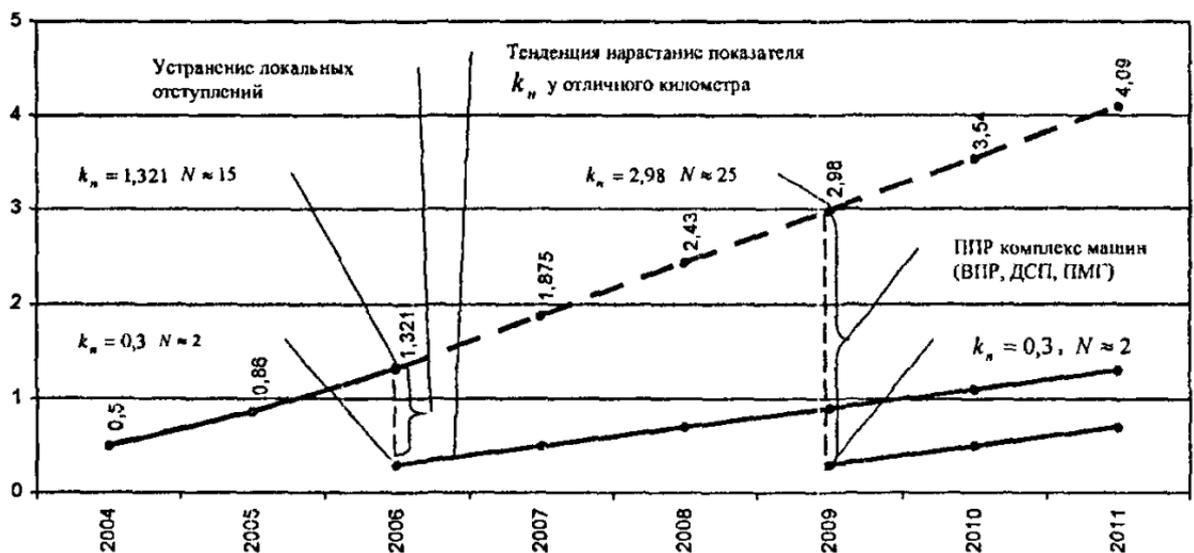


Рисунок 1.19 – Схема назначения плано-предупредительных работ [66]

Баронайте Р.А. [67] предлагает пути совершенствования в планировании среднесрочных и краткосрочных ремонтных работ на дорогах с высокой грузонапряжённостью. Автор осуществляет анализ неисправностей на участках Горьковской, Юно-Уральской и Северной дирекции инфраструктуры [67]. Применяются методы математической статистики, анализа данных и методологии многовариантного прогнозирования. Для оценки стабильности участка пути заданной длины автор предлагает использовать следующие показатели: среднее количество отступлений II степени, среднеквадратическое отклонение отступлений II степени, суммарное количество отступлений II степени. Важным аспектом является анализ обозначенных характеристик во времени при увеличении тоннажа пути [67].

На основе введённых показателей стабильности осуществляется оценка эффективности проводимых на участках пути работах по локальной (рисунок 1.20) и сплошной выправкам (рисунок 1.21). Автор приходит к заключению, что важно правильно осуществлять планирование видов восстановительных мероприятий и контролировать качество их выполнения.

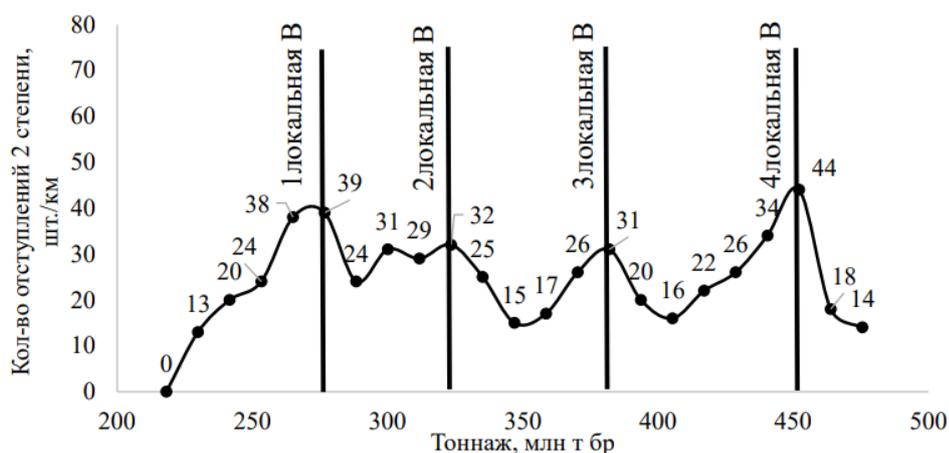


Рисунок 1.20 – Распределение количества отступлений II степени в функции прошедшего тоннажа и выправочных работ на участке с наработкой до 475 млн. т. бр. [67]



Рисунок 1.21 – Распределение количества отступлений II степени в функции прошедшего тоннажа и выправочных работ на участке с наработкой более 850 млн. т. бр. [67]

В процессе проведения исследований было выявлено, что среднее и максимальное число отступлений II степени на километр пути за год эксплуатации железной дороги может быть снижено при своевременном проведением локальных выправок пути. При этом среднеквадратическое отклонение по образующимся неисправностям растёт при наработке тоннажа [67].

В работе [67] также предлагается решение по оптимизации системы организации и планирования работ по сплошной и локальной выправке пути. Автор выдвигает идею о выделении нескольких технологических окон, каждое из которых будет длиться 4 часа. При этом предлагается организовать несколько фронтов работ и использовать три комплекса машин (рисунок 1.22). Применение данного подхода помогает сократить число задержанных поездов почти в 2 раза [67]. Автор также вносит рекомендации по организации окон для проведения работ на участках различной протяжённости.

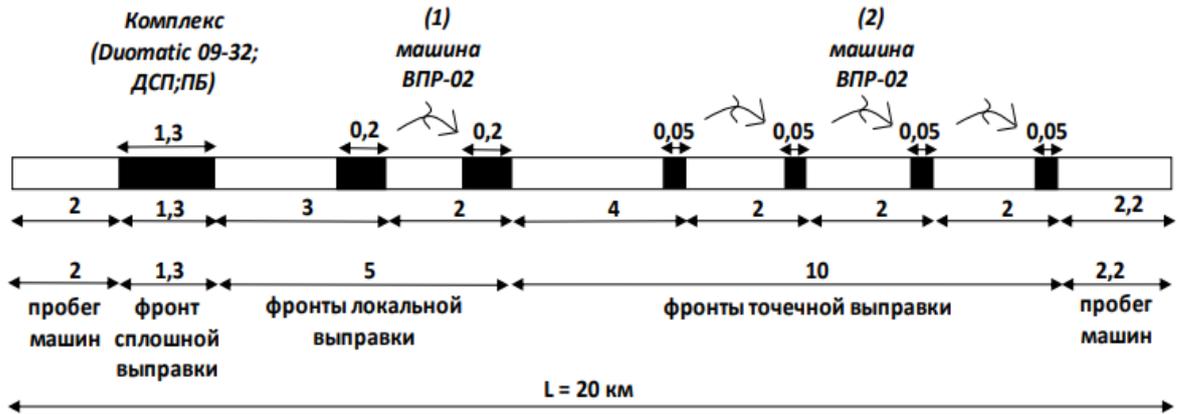


Рисунок 1.22 – Схема распределения участков выправочных работ на примере перегона длиной 20 км в окна продолжительностью 4 часа [67]

1.5.2 Аналитический обзор существующих методов диагностики состояния элементов рельсового пути

В последние годы в области обеспечения безопасности на железных дорогах всё чаще используются технологии искусственного интеллекта. В ряде исследовательских трудов предлагается применение нейронных сетей для распознавания изображений рельсового пути с целью диагностики его состояния. В работе [94] рассматриваются вопросы обнаружений препятствий на железной дороге. Подчёркивается важность своевременного информирования подходящих к данному участку машинистов поездов о наличии посторонних предметов на путях. Для обнаружения объектов используется нейронная сеть MobileNet-v2. На рисунке 1.23 приводится предложенная авторами архитектура системы оповещения. Она позволяет своевременно проинформировать центр управления о наличии угрозы для движения поездов и по сути осуществляет поддержку принятия решений. Система функционирует в реальном времени. MobileNet-v2 выполняет распознавание объектов на различных снимках пути, выполненных в направлении движения поезда. Авторы пробуют разные архитектуры нейросетей и показывает, что выбранная модель показывает наилучшие результаты распознавания (рисунок 1.24).

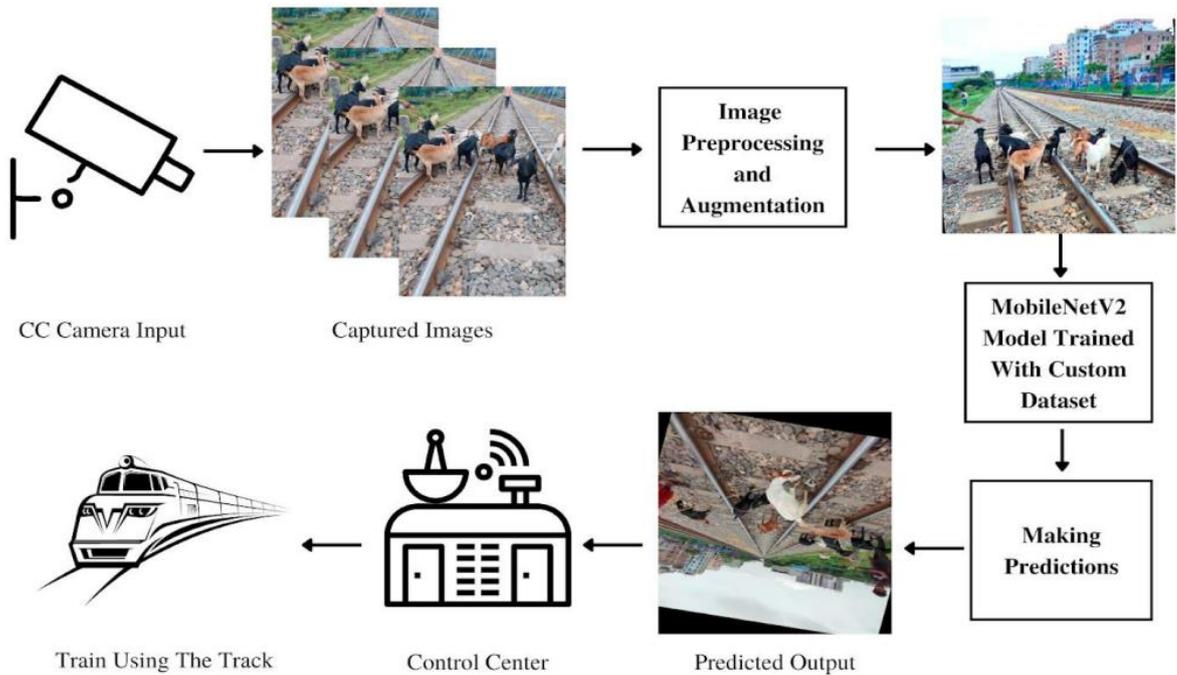


Рисунок 1.23 – Архитектура предлагаемой системы оповещения о препятствиях на пути движения поезда [94]

| Deep Learning Model | Training Accuracy | Validation Accuracy | Precision | Accuracy |
|---------------------|-------------------|---------------------|-----------|----------|
| YOLOv5 | 76.03% | 75.01% | 65.06% | 76.08% |
| Resnet50 | 99.19% | 93.43% | 91.50% | 92.00% |
| VGG19 | 98.31% | 94.46% | 94.00% | 94.00% |
| VGG16 | 99.28% | 95.73% | 96.00% | 96.00% |
| MobileNetV2 | 96.55% | 97.81% | 97.00% | 97.00% |

Рисунок 1.24 – Метрики точности работы различных моделей глубокого обучения в задаче обнаружения препятствий на железной дороге [94]

В работах [95, 96] предлагается использование нейросетей для распознавания изображений ВСП, содержащих рельсовые скрепления. Авторы данных трудов стремятся усовершенствовать и дообучить модель YOLOv5. Они осуществляют доработку архитектуры модели с целью улучшения детектирования мелких объектов скреплений. В работе [95] авторы изменяют размеры якорных рамок модели YOLOv5 и предлагают внедрить в неё дополнительные слои Transform Encoder, СВAM, ТНР (рисунок 1.25).

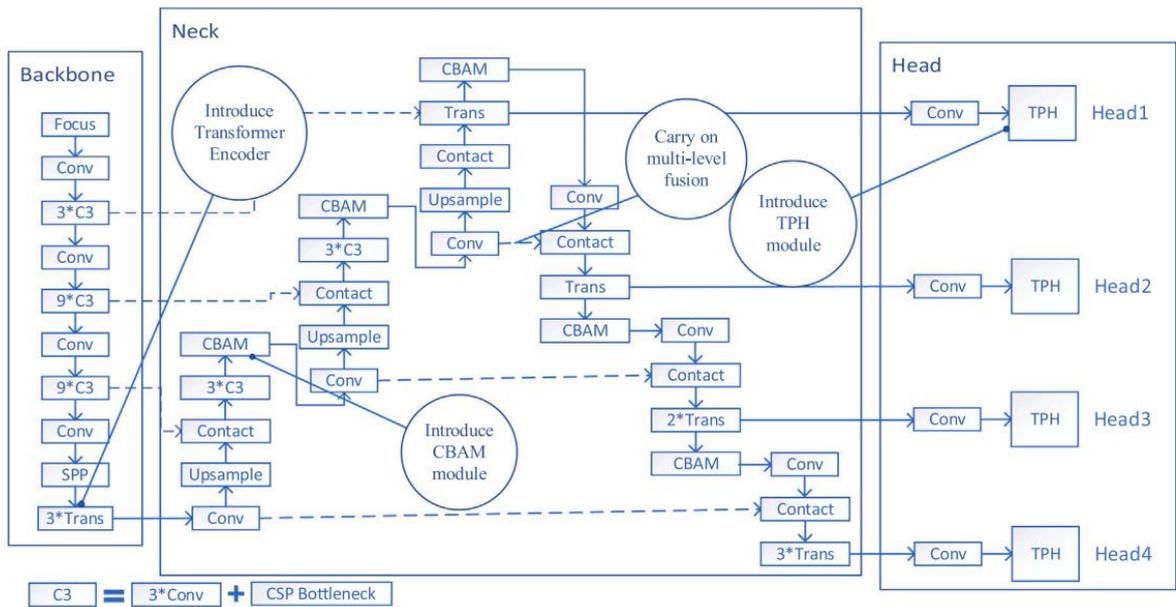


Рисунок 1.25 – Улучшенная архитектура модели YOLOv5 [95]

Авторы подготавливают датасет с изображениями рельсовых скреплений и выполняют обучение. В результате улучшенная модель YOLOv5 превосходит исходную по метрике обобщённой средней точности (mAP): 0.991 по сравнению с 0.989 ранее [95].

В работе [96] авторы также модифицируют архитектуру YOLOv5 и стремятся снизить время работы модели. Используется схема расширения набора данных Mosaic, при которой новые кадры создаются из 9 исходных изображений вместо 4 в оригинальной модели. Авторы внедряют в архитектуру модуль FEL, который помогает нейросети лучше справляться с распознаванием редко встречающихся классов рельсовых скреплений. Для оценки точности локализации объекта предлагается использовать функцию потерь DIoU, учитывающую не только площадь пересечения исходной и обнаруженной рамок, но и расстояние между их центрами [96]. Авторы выполняют обучение модели YOLOv5 с применением каждой из описанных модификаций отдельно и с применением всех сразу. В последнем случае им удаётся улучшить точность распознавания скреплений до 94,6% по метрике mAP и повысить производительность до 12,5 мс (рисунок 1.26).

| | mAP | Inference time |
|--|-------|----------------|
| HOG+SVM | 90.6% | 46.1 ms |
| Faster R-CNN | 94.1% | 35.3 ms |
| MobileNet-SSD | 91.5% | 18.6 ms |
| MobileDets | 92.4% | 12.2 ms |
| Original YOLOv5 | 93.8% | 12.5 ms |
| Original YOLOv5 with improved Mosaic data augmentation | 94.2% | 12.5 ms |
| Original YOLOv5 with FEL model | 94.5% | 12.5 ms |
| Original YOLOv5 with DIoU | 93.9% | 12.5 ms |
| Improved YOLOv5 | 94.6% | 12.5 ms |

Рисунок 1.26 – Сравнение метрики mAP и времени работы модели для различных архитектур детекторов в задаче распознавания рельсовых скреплений [96]

Работа [97] посвящена разработке и внедрению эффективного метода автоматической семантической сегментации изображений рельсового пути и последующей оценки параметров дефектов на поверхности катания рельса. Авторы предлагают использовать Swin-T в качестве базового блока в модели распознавания дефектов. За основу они берут модель для семантической сегментации UPerNet. Осуществляется интеграция Swin-T в архитектуру этой модели, что повышает качество выделения контуров мелких дефектов (рисунок 1.27).

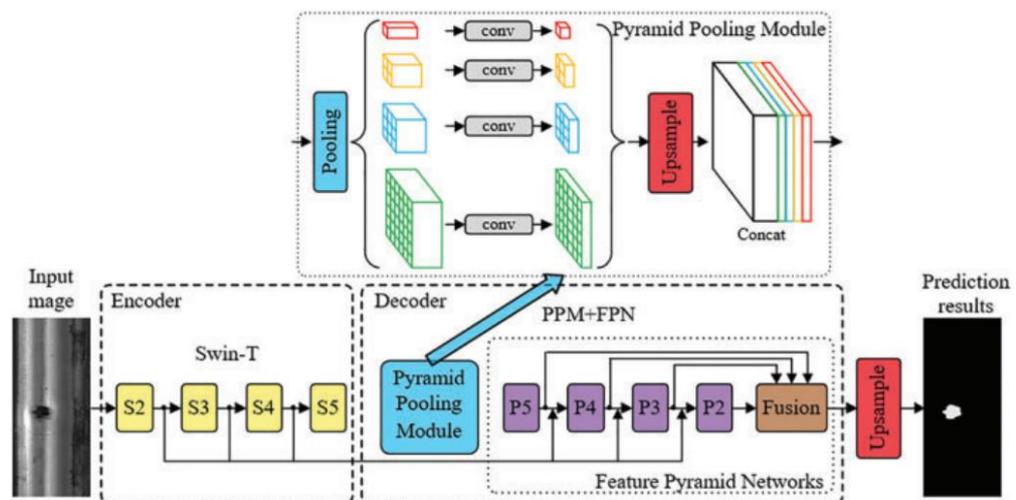


Рисунок 1.27 – Структура метода работы улучшенной модели UPerNet [97]

Авторы предлагают использование функции потерь Lovász-hinge, которая учитывает пространственные зависимости между соседними пикселями и устраняет дисбаланс между фоном с большой площадью и мелкими дефектами [97]. В работе осуществляется синхронизация нормализации батчей, что позволяет обучать модель для маленьких значений мини-выборок. Для оценки параметров дефектов используется алгоритм анализа связанных компонентов. Использование описанных подходов и модификаций позволяет авторам добиться прироста точности обнаружения проблемных зон в области полосы катания рельсов по метрикам pixel accuracy, precision и intersection over union. После семантической сегментации для каждого объекта определяется пиксельный контур. На его основе можно вычислить длину, ширину и площадь найденного дефекта. Точное определение данных параметров даёт наглядное представление о проблемном месте, что может быть использовано при планировании ремонтных работ [97].

1.5.3 Онтологическое проектирование как ключевой подход к формированию знаний о процессе технического обслуживания

Современные исследования в области технического обслуживания сложных систем направлены на использование новых подходов для обеспечения управления производственными операциями ТО и ремонта.

Работа [98] посвящена разработке системы поддержки принятия решений (СППР) для управления процессом технического обслуживания и ремонта (ТОиР) автономных транспортных средств. В этой статье в качестве примера рассматриваются проблемы содержания автомобилей КАМАЗ. Ключевым этапом в разработке базы знаний и правил вывода для СППР авторы обозначают построение онтологии технического обслуживания транспортных средств. В работе [98] показано, что выделение основных понятий, связей и свойств предметной области позволяет сформировать таблицы решений к задаче, определить ключевые параметры системы. Авторы анализируют ключевые характеристики сферы знаний с целью принятия наиболее правильных, оптимальных решений в отношении каждого автомобиля. В соответствии с

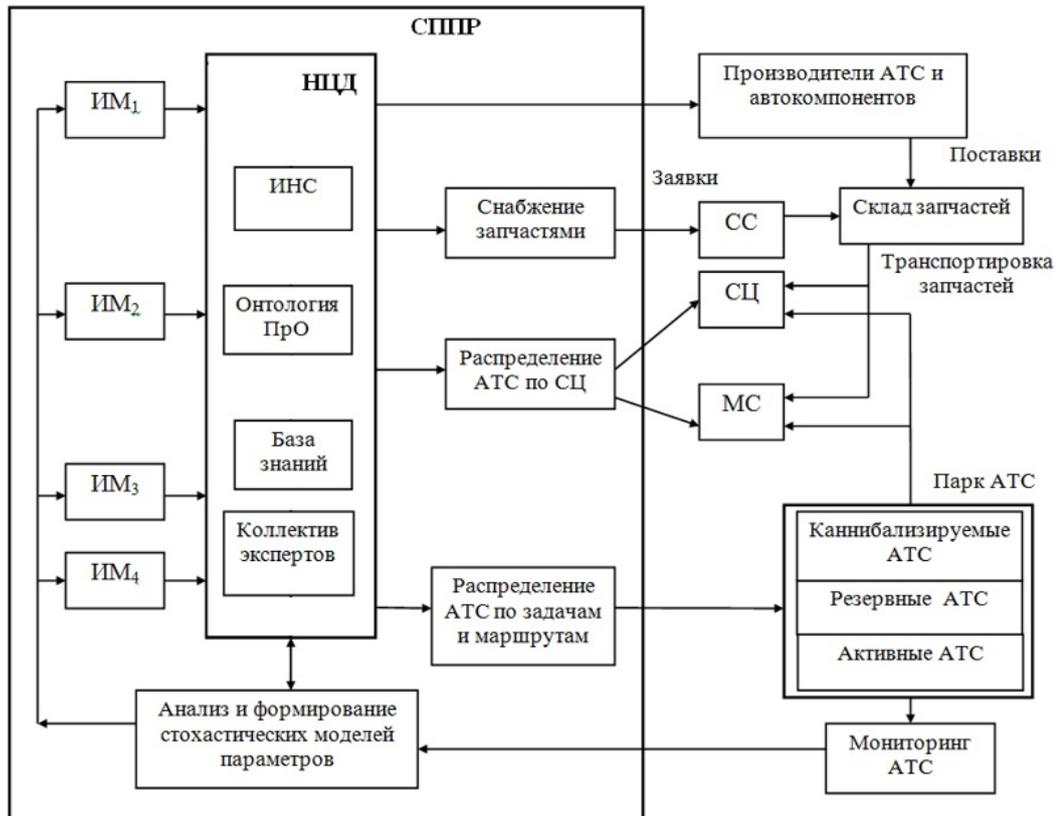


Рисунок 1.29 – Архитектура системы ТОиР парка автономных транспортных средств [98]

В статье [99] представлена архитектура веб-приложения, ориентированного на оптимизацию процессов в агропромышленном комплексе. Система определяет пространство знаний через иерархию классов и отношений, обеспечивая формализацию терминологии предметной области для автоматизации процесса обслуживания машин. Она представляет собой интеллектуальную систему, обеспечивающую генерацию рекомендаций по обслуживанию сельхозтехники [99]. Важным элементом этой системы выступает онтология рассматриваемой предметной области. Благодаря проектированию основных понятий, связей и правил функционирования сферы знаний авторы обеспечивают семантическую согласованность данных, генерируют метаданные для представления знаний и поддерживают интероперабельность между разнородными источниками информации о техническом обслуживании.

Проведённый анализ исследований по проблемам технического обслуживания железной дороги показывает, что тема является актуальной и в ряде аспектов хорошо проработанной. Тем не менее существующие решения имеют ряд недостатков и могут быть усовершенствованы. Имеющиеся пробелы в знаниях могут быть устранены и проработаны. Большая часть авторов занимаются вопросами совершенствования планирования и управления процессами организации движения по железной дороге [60-63, 65]. Активно исследуются вопросы, связанные с оптимизацией расходов. В некоторых работах авторы занимаются вопросами минимизации издержек от простоя поездов [62], а в других поднимаются вопросы минимизации совокупных потерь от остановки движения, включая затраты на ремонтные работы [60, 61, 63, 65]. Задача оптимизации расходов с целью получения технико-экономического эффекта тесно связана с вопросами оптимизации длительности технологических окон. Поэтому авторы также предлагают свои решения для этой проблемы.

Однако в упомянутых работах не рассматриваются вопросы оптимизации длительности ремонтных работ. Минимизация времени проведения восстановительных работ является важным аспектом при организации движения по железной дороге. Получения рабочего решения для данной задачи позволило бы сократить длительность и число технологических окон и продолжительность простоя поездов. Последнее в свою очередь позволило бы железнодорожным компаниям снизить потери, связанные с остановкой движения.

В исследованиях [64, 66, 67] рассматриваются вопросы планирования восстановительных работ по устранению дефектов II степени. Авторы проводят статистический анализ истории накопления дефектов и проводимых ремонтов по выправке геометрии рельсовой колеи. Они предлагают свои решения по организации ремонтных мероприятий и их видов на основе выявленных закономерностей формирования неисправностей. В данных работах не рассматриваются отступления III и IV степеней. Их анализ позволил бы создать более комплексную картину о состоянии пути и повысить эффективность планирования. Исследования [64, 66, 67] по большей части сконцентрированы на

капитальном и среднем видах ремонта. В существующих решениях не уделено достаточно внимания текущим работам по содержанию пути. При этом все описанные исследования сконцентрированы исключительно на планово-предупредительных мероприятиях. Важно уделить внимание первоочерёдным и аварийным ремонтным работам. В последнем случае неминуемо произойдёт остановка движения до устранения неисправности. Минимизация времени проведения аварийных работ позволит сократить как длительность простоя поездов, так и связанные с ним потери доходов. Выявление отступлений III и IV степеней требует пересмотра составленного плана работ на ближайший период времени. Данные неисправности окажут значительное влияние на существующий график мероприятий по техническому обслуживанию рельсового пути, составленный только с учётом отклонений II степени.

В работах [66, 67] авторы также предлагают решения по прогнозированию состояния рельсового пути через определённые промежутки времени (месяцы, годы). Данные решения могут быть усовершенствованы путем применения нейронных сетей для предсказаний состояния элементов железной дороги. Искусственный интеллект способен эффективно прогнозировать показатели качества и состояния технических компонентов и их характеристик на основе имеющейся истории наблюдений.

В исследовательском труде [63] автор предлагает решение задачи о назначениях рабочих бригад на выполнение ремонтных работ. Он определяет рациональные полигоны работ по характеристикам участков путей и выявленным неисправностям. В предложенном решении не учитывается возможность появления новых дефектов или возникновения аварийных ситуаций в процессе реализации плана ремонтных мероприятий. Данный аспект потребует пересмотра и переработки существующего графика работ. Предложенный автором подход не затрагивает вопросы оптимизации времени на проведение ремонта. Приведённое решение может быть доработано и усовершенствовано путём разработки СППР при организации ремонтных мероприятий.

В работах [94-97] рассматриваются вопросы совершенствования диагностики состояния элементов ВСП. Применяются современные технологии распознавания элементов пути с использованием нейронных сетей. Предложенные подходы позволяют повысить точность определения неисправностей и автоматизировать процесс контроля. Однако приведённые решения распространяются только на определённые классы элементов пути: рельсовые скрепления, поверхность катания рельсов, посторонние объекты на железной дороге. Используемые подходы не дают комплексной оценки состояния пути. Он содержит множество других элементов инфраструктуры: шпалы, рельсовые накладки и стыки, дроссельные штепсели и перемычки, заземления опор, устройства контроля схода подвижного состава. Стоит также отметить многообразие существующих типов скреплений и их компонентов, дефектов поверхности катания. В работах [94-97] рассмотрены вопросы распознавания конкретных видов элементов пути. Очень важно провести комплексную оценку состояний компонентов ВСП. Многие из них, как, например, стыки и накладки, тесно связаны между собой. Совместный анализ разных классов элементов пути позволит сформировать более полную картину о состоянии рельсового пути, повысить эффективность выявления комплексных отступлений.

В работах [98, 99] особое внимание уделено разработке онтологий для предметных областей в сфере технического обслуживания. Такой подход помогает выявить семантику рассматриваемой отрасли знаний, установить принципы её функционирования и специфику поведения. Полученные в ходе онтологического проектирования базы знаний находят широкое применение в различных интеллектуальных системах (ИС), включая экспертные системы (ЭС) и СППР. Полученные в работах [98, 99] онтологии могут быть модифицированы с целью описания особенностей технического обслуживания и ремонта рельсового пути и формирования правил и особенностей её функционирования. Они являются отправной точкой к разработке ИС для оптимальной организации путевых работ.

Таким образом, система управления ТОиР рельсового пути с разрабатываемой СППР будет иметь следующую структуру, которая приведена на рисунке 1.30.



Рисунок 1.30 – Структура системы управления техническим обслуживанием и ремонтом верхнего строения пути: СППР – система поддержки принятия решений, ИНС ВСП– искусственная нейронная сеть системы распознавания элементов верхнего строения пути, СДН - система дистанционного наблюдения за составами, ДНЦ – поездной диспетчер

На рисунке 1.30 обозначены следующие переменные:

- I - измеряемые параметры рельсового пути;
- V – поток изображений рельсового пути;
- D – обнаруженные и классифицированные дефекты рельсового пути;
- S – данные спутникового мониторинга положения поездов в реальном времени;
- T^0 – технологические окна;
- X – выходные данные СППР;
- w_1, \dots, w_n – бригады, назначенные для обслуживания пути.

1.6 Выводы по первой главе

1. Железную дорогу можно рассматривать как киберфизическую систему, включающую рельсовый путь, систему энергоснабжения подвижных составов, элементы опор и грузокompенсации, информационно-измерительную подсистему контроля состояния инфраструктуры пути, подсистему позиционирования поездов и технический обслуживающий персонал.

2. Обзор существующих решений показал актуальность тематики технического обслуживания рельсового пути. Множество работ направлено на повышение экономической эффективности железных дорог за счёт снижения затрат на ремонт и потерь от остановок движения. Хорошо раскрыты вопросы оптимизации длительности технологических окон. Авторы производят анализ статистических данных для улучшения планирования устранения и прогнозирования появления неисправностей, а также предлагают методы назначения ремонтных бригад. В вопросах диагностики отступлений успешно применяются технологии искусственного интеллекта, что автоматизирует процесс выявления дефектов и сокращает трудозатраты.

3. Однако в рассмотренных трудах слабо раскрыт вопрос оптимизации времени проведения ремонта. Предлагаемые подходы к задаче о назначениях бригад на выполнение работ преследуют целью минимизировать стоимость работ, но не их длительность. Рассмотренные решения могут быть доработаны, усовершенствованы и использованы для построения системы поддержки принятия решений.

4. Проведенный системный анализ объекта исследования и существующих подходов показал, что в диссертационной работе следует выполнить решение следующих задач:

1) Построение онтологии процесса диагностики и технического обслуживания рельсового пути и формирование на её основе базы знаний.

2) Разработка методики диагностики состояния элементов верхнего строения пути с использованием технологий искусственного интеллекта.

3) Постановка и решение задач оптимизации времени проведения ремонтных работ и распределения ресурсов

4) Разработка системы поддержки принятия решений для управления процессом технического обслуживания и ремонта, а также назначения рабочих бригад на устранение выявленных неисправностей рельсового пути.

2 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПУТЕВЫМИ РАБОТАМИ

2.1 Построение онтологии технического обслуживания рельсового пути

Проектирование онтологии технического обслуживания рельсового пути является важнейшим этапом при разработке базы знаний для СППР. Описание основных понятий, свойств, связей и ограничений предметной области позволяет чётко выстроить правила работы интеллектуальной системы, оптимизирующей планирование ремонтов и распределение рабочих бригад на устранение неисправностей. Онтологическое проектирование помогает извлечь из данных семантическую составляющую, обеспечить их логическую непротиворечивость и выявить скрытые знания. Оно позволяет моделировать причинно-следственные связи между различными понятиями предметной области. Применение онтологии повышает эффективность распределения ресурсов ПЧ и уменьшает риски ошибок при планировании путевых работ.

Разработка онтологий осуществляется на языке OWL (Web Ontology Language). Он является ключевым компонентом семантической паутины (Semantic Web) и позволяет описывать любую предметную область, как часть реальности — через наборы классов любых объектов и отношений между ними [99, 100]. Каждому элементу описания в OWL присваивается уникальный идентификатор URI, позволяющий получить к нему доступ. Поэтому существует возможность размещения онтологий и их компонентов, а также получения доступа к ним через сеть Интернет [100]. При онтологическом проектировании рассматриваемая часть реальности описывается как отношение «объект-свойство».

Одним из наиболее популярных инструментов для создания онтологий является редактор Protégé. Он позволяет создать набор иерархически организованных классов, описывающих понятия и свойства предметной области, а также построить отношения между ними [99].

Protégé предоставляет средства для формулирования аксиом, накладывающих ограничения на функционирование понятий, свойств и отношений

в рассматриваемой системе. Заданные правила вывода позволяют программно получать новые знания о предметной области на основе исходных данных, заложенных в онтологию на этапе проектирования.

2.1.1 Основные понятия онтологии ТОиР железной дороги

В данной диссертационной работе редактор Protégé использован для построения онтологии технического обслуживания и ремонта рельсового пути. На рисунке 2.1 приводится разработанная OWL-диаграмма понятий верхнего уровня, присущих рассматриваемой предметной области.

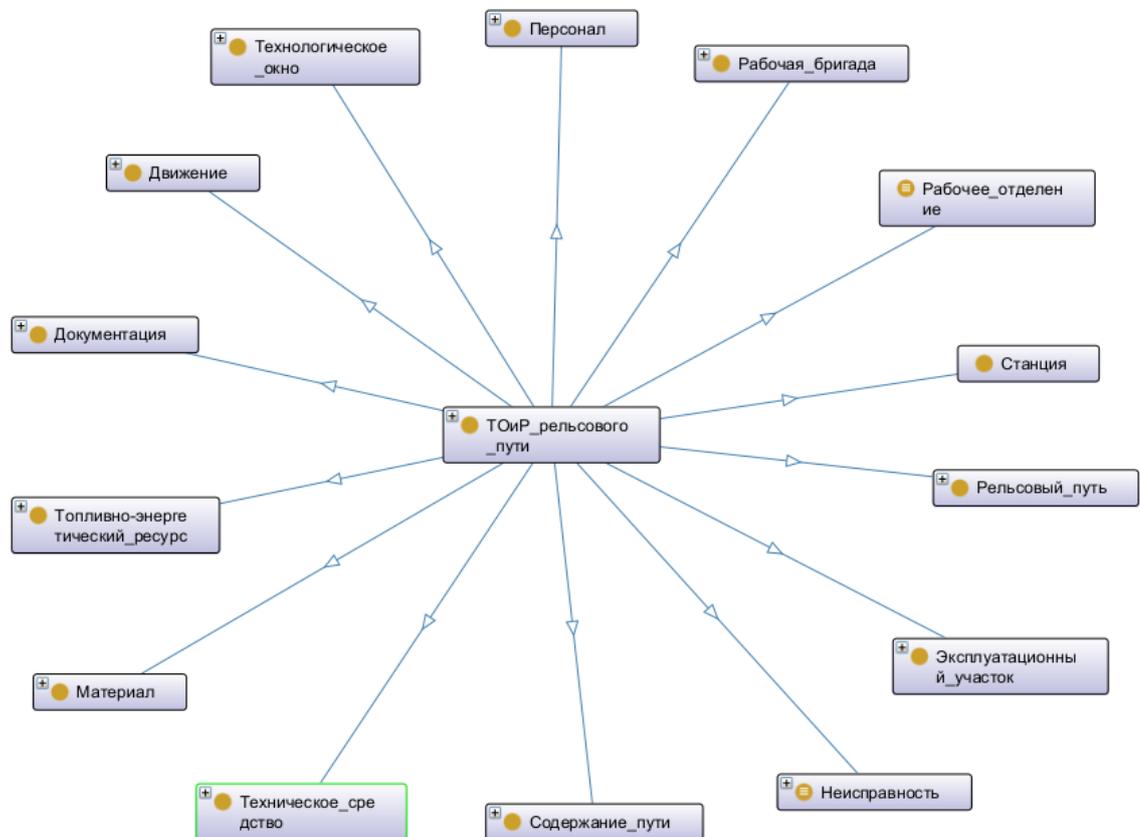


Рисунок 2.1 – OWL-диаграмма понятий верхнего уровня для области ТОиР

Главным понятием онтологии, от которого наследуются все остальные выступает класс «ТОиР_рельсового_пути». От него на верхнем уровне наследуются следующие компоненты: «Персонал», «Рабочая_бригада», «Рабочее_отделение», «Станция», «Рельсовый_путь», «Эксплуатационный_участок», «Неисправность», «Содержание_пути», «Техническое_средство»,

«Материал», «Топливо-энергетический ресурс», «Документация», «Движение» и «Технологическое окно». Эти классы являются ключевыми понятиями области ТОиР рельсового пути.

Понятие «Персонал» описывает рабочих ПЧ, задействованных при обслуживании железной дороги (рисунок 2.2). Сотрудники дистанции пути делятся на 2 типа: управляющие и рабочие. Первые выполняют руководящие функции. К ним относятся начальники эксплуатационных участков, техники пути, диспетчер путевой части, а также дежурные по станции и поездной диспетчер. Рабочий персонал занимается работами по содержанию и ремонту железной дороги. Он включает в себя дорожных мастеров линейных участков (по неотложным и плановым работам), бригадиров (по плановым и неотложным работам, по контролю за состоянием пути), механиков и монтеров [82]. Отдельно можно отменить подкласс контролёров, осуществляющих проверку состояния элементов инфраструктуры ВСП. К ним относятся обходчики, дежурные по переездам, операторы вагонов-путеизмерителей, бригадиры ПДБК, а иногда и машинисты поездов [82].

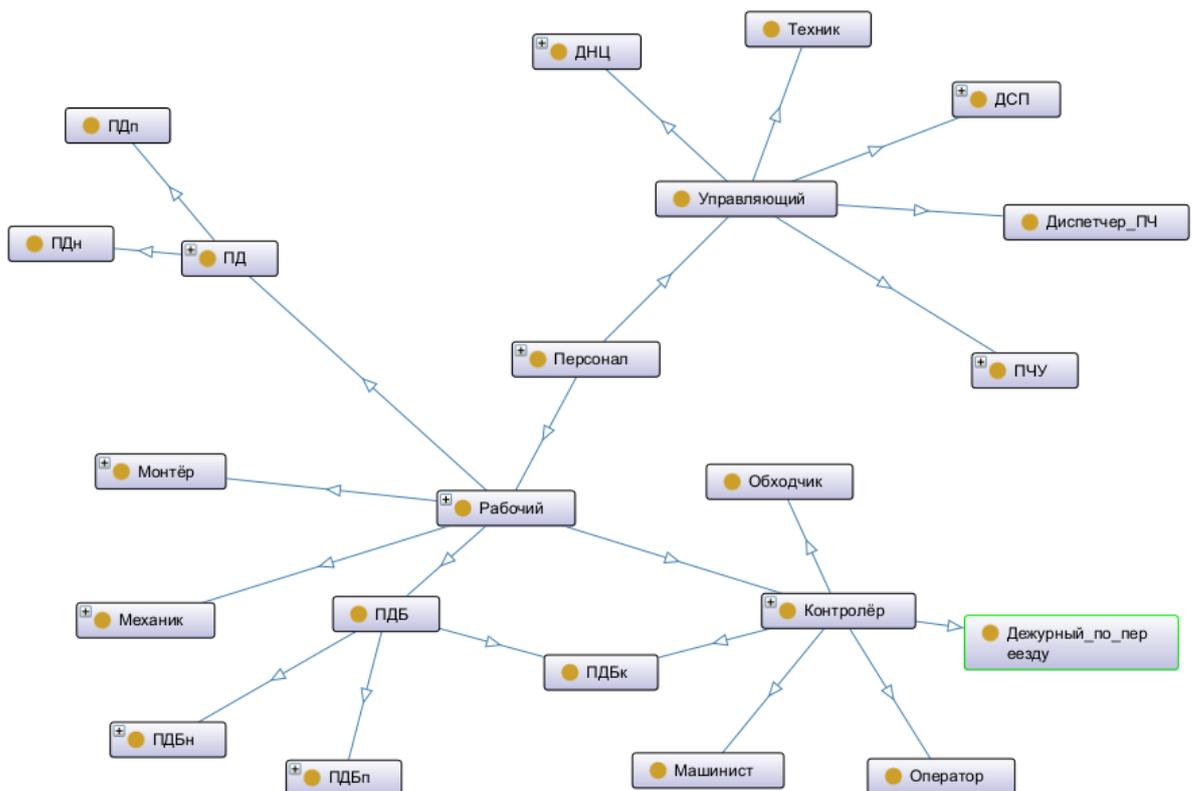


Рисунок 2.2 – OWL-диаграмма понятия «Персонал»

Понятие «Рабочая бригада» включает в себя описание рабочих бригад. Они делятся на два основных типа: неотложные и укрупнённые (рисунок ПА.1). Первые выполняют ремонтные работы на определённом линейном участке пути, а вторые — на эксплуатационном участке пути.

Понятие «Рабочая отделение» описывает место базирования рабочих бригад.

Понятие «Станция» представляет собой представляет собой важнейший узел линейного участка пути, где располагаются рабочие отделения.

Понятие «Рельсовый путь» является одним из важнейших во всей онтологии. Оно связано с описанием инфраструктуры железной дороги, обеспечивающей надёжность и безопасность движения поездов (рисунок 2.3). Рельсовый путь состоит из двух основных частей: верхнего строения пути и нижнего строения пути (НСП). Первая из них включает в себя основные элементы инфраструктуры, обеспечивающие движение поездов по железной дороге: рельсы, шпалы, скрепления, накладки, стрелочные переводы, рельсовые соединители и прочее [101]. Также к ВСП относится балласт. Он является прослойкой между земельным полотном и шпалами и позволяет обеспечить прочность, устойчивость и долговечность верхнего строения пути [101]. Маячные метки используются для контроля угона рельсов.

К нижнему строению пути относятся земельное полотно и водоотводные конструкции. Первое служит основанием для ВСП и участвует в распределении нагрузки от подвижных составов на грунт [102]. Водоотводные конструкции предназначены для защиты земельного полотна и рельсового пути от размыва. К ним относятся канавы, трубы, кюветы и лотки.

Помимо ВСП и НСП рельсовый путь включает в себя различные искусственные сооружения. Они предназначены для обеспечения устойчивости и безопасности движения при преодолении различных препятствий на дороге. К искусственным сооружениям относятся мосты над реками и озёрами, тоннели через горы и скалистые массивы, железнодорожные переезды, платформы на станциях [102].

На рельсовом пути также устанавливаются элементы контроля состояния железной дороги и безопасности движения. Среди них выделяются заземления опоры, обеспечивающие защиту контактной сети, ЖАТ-соединители, обеспечивающие электрическую проводимость для систем сигнализации, централизации и блокировки. Существуют также и автоматизированные компоненты контроля состояния пути. К ним относят систему автоматического управления торможением (САУТ) поездов, контроля буксовых узлов и тормозов (КТСМ) и устройство контроля схода подвижного состава (УКСПС) [84].

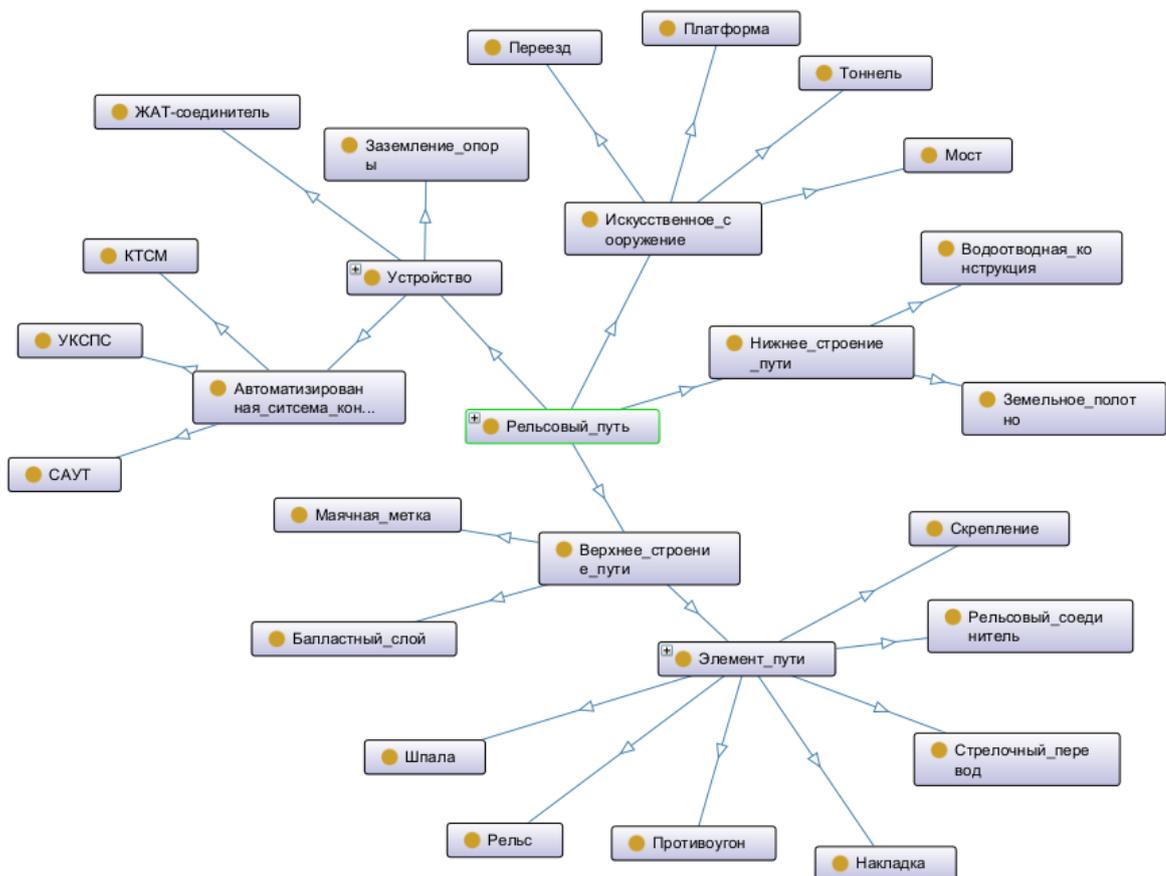


Рисунок 2.3 – OWL-диаграмма понятия «Рельсовый путь»

Понятие «Эксплуатационный участок» описывает ключевую единицу структуры ПЧ (рисунок ПА.2). Он делится на линейные участки пути, которые включают в себя перегоны.

Понятие «Неисправность» характеризует любой дефект, возникающий на рельсовом пути (рисунок ПА.3). Отступления, как было описано в главе 1, могут быть качественными, количественными или смешанными.

Понятие «Содержание пути» описывает все возможные виды работ, проводимые в процессе технического обслуживания рельсового пути (рисунок ПА.4). К ним относятся диагностика пути, проводимая с целью своевременного выявления отступлений, и ремонт неисправных элементов.

Диагностика пути осуществляется различными способами. Одним из основных методов контроля неисправностей выступает натурный осмотр. Он долгое время являлся основным способом выявления отступлений. При натурном осмотре обходчики пути, ПДБК или даже машинисты пути выполняют визуальный осмотр рельсового пути с использованием приборов и инструментов для определения каких-либо нарушений в элементах инфраструктуры [91].

В настоящее время наиболее распространены автоматизированные методы контроля элементов рельсового пути: лазерное сканирование, ультразвуковое сканирование, видеоконтроль. Первый метод позволяют измерять геометрию пути, выявлять дефекты рельсов, шпал и балласта [103]. Ультразвуковое сканирование используется для неразрушающего контроля внутренних дефектов рельсов, таких как трещины, надрезы, включения и выплывки, которые не видны при визуальном осмотре [104].

Видеоконтроль является самым современным способом анализа состояния элементов рельсового пути. Обычно он предполагает выполнение съёмки железнодорожной инфраструктуры при помощи камер, устанавливаемых на вагон-путьеизмеритель [78, 84]. Полученные изображения используются для обучения ИНС с целью обнаружения неисправностей рельсового пути. Метод может быть использован как для анализа состояния как элементов ВСП, так и, например, компонентов КС [90].

Ремонт пути делится на аварийный и плановый. Первый случай описывает ситуации по устранению дефектов IV степени неотложными бригадами. Он направлен на точечное устранение опасных отступлений. Плановый ремонт включает в себя работы по капитальному, профилактическому и среднему ремонту. В первом случае требуются серьёзные воздействия на элементы инфраструктуры пути, например, сплошная замена рельсошпальной решётки [105]. При

профилактический ремонт связан с устранением дефектов II степени. При нём может осуществляться выравнивание геометрии рельсовой колеи или сплошная шлифовка рельсов [105]. И капитальный, и профилактический ремонт обычно задействуют крупное оборудование и выполняются укрупнёнными бригадами. Средний ремонт обычно связан с устранением неисправностей, связанных с небольшим количеством элементов рельсового пути: одиночной заменой рельсов и шпал, корректировкой балластного слоя, устранением локальных отступлений [105].

Понятие «Техническое средство» характеризует используемые при выполнении работ по содержанию пути оборудование и транспорт (рисунок ПА.5). Первый тип технических средств классифицируется по своим размерам. Крупное оборудование обычно используется только укрупнёнными бригадами и связано с выполнением планово-профилактических и капитальных ремонтов [105]. Среди таких технических средств можно выделить подъёмники и укладчики. Первые часто применяются для перемещения больших и тяжёлых элементов пути, таких как шпалы. Одним из самых распространённых типов подъёмников является кран. Второй тип крупных технических средств может использоваться для укладки компонентов железной дороги, например, рельсов или балласта. Выправочные машины применяются для выправки рельсового пути и восстановления геометрии рельсовой колеи [105]. Тележки часто используются для перевозки мелкого оборудования или в измерительных целях.

К мелкому оборудованию относятся различные приборы и инструменты. Первые используются для измерения различных числовых параметров элементов пути, таких как размеры (линейка, микрометр, штангенциркуль), характеристики электрического тока (ампервольтметр), температура (термометр), толщину материала или слоя покрытия (толщиномер) [106]. Ручные инструменты помогают рабочим устранять неисправности. К такому оборудованию можно отнести гаечный ключ для закручивания болтов у накладок или рельсовых скреплений, молоток для забивания гвоздей в деревянные шпалы, кувалду для подбивки шпал, сварочный аппарат для приварки рельсовых соединителей или сварки рельсов,

рельсовые клещи для удаления металла, монтировка для разбора компонентов рельсового пути [106].

К транспортным средствам относятся автомобили и вагоны. Они используются рабочими для достижения места выявления дефекта соответственно по дороге и рельсовому пути. Первый вид транспорта используются неотложными бригадами, а второй – укрупнёнными. В автомобилях и вагонах рабочие также перевозят мелкое оборудование.

Понятие «Материал» описывает расходные ресурсы, используемые монтёрами рабочих бригад в процессе выполнения ремонтных работ (рисунок ПА.6). Прежде всего к ним относятся запчасти, являющиеся составными частями элементов пути, такие как гвозди, шурупы, болты, пружины, гайки, клеммы, подкладки для рельсовых скреплений или накладок, острия и крестовины стрелочных переводов, провода для рельсовых соединителей. Материалами могут выступать и цельные компоненты железной дороги: рельсы, шпалы.

К расходным ресурсам также относятся различные жидкости для обработки элементов пути. Смазочные материалы используются для подвижных компонентов инфраструктуры и позволяют снизить трение и износ. Растворы и краски применяются для закрашивания мелких трещин, очистки элементов пути от загрязнений, металлических конструкций и шпал от влияния коррозии. Гидроизоляционные материалы помогают избежать попадания воды и влаги.

Понятие «Топливо-энергетически ресурс» характеризует потребляемые при передвижении рабочих бригад ресурсы (рисунок ПА.7). К ним относятся топливо для автомобилей и электроэнергия для поездов.

Понятие «Документация» описывает в бумажном или электронном виде все регламенты, нормы и правила ТОиР железной дороги (рисунок ПА.8). Прежде всего, к ним относятся различные инструкции, описывающие устройство рельсового пути [81, 82, 92], порядки содержания и ремонта пути [81, 87, 88, 91, 92, 105], характеристики отступлений [84-86]. Документация включает в себя разрабатываемые дорожными мастерами планы путевых работ. По результатам осуществляемых действий и мероприятий формируются различные

виды отчётов: по предпринятым мерам, по выполненному ремонту, по проведённой диагностике элементов инфраструктуры пути. Первый документ, например, может быть оформлен в случае отказа дорожного мастера от проведения работ в связи с тем, что неисправность была выявлена ошибочно [84].

Понятие «Движение» описывает важнейший аспект использования железной дороги – перемещение подвижных составов. При выполнении работ по содержанию пути во многих случаях приходится прибегать к его остановке.

Понятие «Технологическое окно» характеризует период времени, на который движение поездов по перегону не производится [93]. Окна заранее планируются и согласовываются. В период их действия рабочие бригады осуществляют работы по ТОиР рельсового пути.

2.1.2 Свойства данных в онтологии ТОиР железной дороги

После выделения основных понятий онтологии выполняется определение связей, которые существуют между ними. Для этого определяются объектные свойства. Формируются высказывания вида «Субъект-Предикат-Объект». Они носят название триплетов [107]. Выделенные в области ТОиР рельсового пути объектные свойства и связанные ими понятия представлены в таблице 2.1. Для некоторых связей субъектами и объектами могут выступать несколько разных классов. Также по некоторым триплетам присутствует поясняющий комментарий.

Таблица 2.1 — Объектные свойства онтологии ТОиР рельсового пути

| Свойство | Субъект | Объект | Комментарий |
|----------------------------|----------------------------|-------------------|--|
| анализирует | Контролёр Видеоконтроль | Рельсовый_путь | анализ состояния инфраструктуры |
| базируется_в | Рабочая_бригада | Рабочее_отделение | |
| включает_в_себя | Эксплуатационный_участок | Линейный_участок | |
| выполняет_работы | Рабочий | Содержание_пути | рабочий персонал выполняет работы по ТОиР пути |
| выявляется_в | Неисправность | Рельсовый_путь | |
| выявляется_при | Неисправность | Диагностика_пути | |
| действует_в_соответствии_с | Рабочая_бригада | План_работ | |

| | | | |
|---------------------------------|---|---------------------------------------|--|
| действует_на | Технологическое _окно | Перегон | |
| закрывается_при | Движение | Ремонт_пути | |
| использует_при _ремонте | Рабочая_бригада Монтёр | Материал Оборудование | |
| направлен_на _восстановление | Ремонт_пути | Рельсовый_путь | |
| настраивает | Механик | Мелкое оборудование | |
| описывает _структуру | Инструкция_по _устройству_пути | Рельсовый_путь | |
| описывается_в | Неисправность | Инструкция_по _отступлениям | |
| останавливает | ДНЦ ДСП | Движение | |
| осуществляет | Рабочая_бригада | Ремонт_пути | |
| отвечает_за _безопасность | Рабочее_отделение Рабочая_бригада | Линейный_участок | |
| оформляет | ПЧУ ПД Контролёр | Отчёт | |
| перевозится_в | Материал Мелкое оборудование | Транспорт | |
| передвигается_на | Рабочая_бригада | Транспорт | |
| подвергается | Рельсовый_путь | Диагностика_пути | |
| потребляет | Транспорт | Топливо- энергетический _ресурс | |
| предоставляет | ДНЦ ДСП | Технологическое _окно | |
| применяется_при | Оборудование | Содержание_пути | |
| производится_для _устранения | Ремонт_пути | Неисправность | |
| работает_в | Монтёр Механик ПБД _н ПБД _к | Рабочая_бригада | |
| разрабатывает | ПД | План_работ | |
| расположен_на | Искусственное _сооружение Элемент_пути Устройство Перегон Станция Рабочее_отделение | Линейный_участок | |
| руководствуется | Рабочий | Инструкция | |
| составляется_для | План_работ | Ремонт_пути | |

| | | | |
|----------------------------|-------------------------------------|---|--|
| состоит_из | Устройство Элемент_пути | Запчасть | |
| требует_выделения | Ремонт_пути | Технологическое _окно | |
| устраняет | Рабочая_бригада | Неисправность | |
| устраняется_в | Неисправность | Технологическое _окно | устраняется в период действия окна |
| устраняется_при _помощи | Неисправность | Инструмент Материал Крупное оборудование | |
| формируются_на | Рабочее_отделение | Станция | |
| хранится_в | Материал Техническое средство | Рабочее_отделение | |

Помимо объектных свойств для ТОиР рельсового пути выделены свойства данных. Эти триплеты описывают присущие определённым классам онтологии характеристики и параметры, выраженные простыми типами данных. В таблице 2.2 представлены сформированные свойства данных.

Таблица 2.2 — Объектные свойства онтологии ТОиР рельсового пути

| Свойство | Субъект | Тип данных | Комментарий |
|--------------------------------|--|------------|--|
| имеет_длину | Эксплуатационный участок | decimal | |
| имеет_класс | Неисправность | integer | номер класса неисправности |
| имеет_координату конца | Эксплуатационный участок | decimal | |
| имеет_координату начала | Эксплуатационный участок | decimal | |
| имеет_позицию | Неисправность Элемент_пути Станция Рабочее_отделение Рабочая_бригада | decimal | описывает относительную координату объекта |
| имеет_порог | Количественное _отступление Смешанное _отступление | float | пороговое значение параметра для идентификации отступления |
| имеет_приоритет _устранения | Неисправность | string | определение приоритета в соответствии с таблицей 1.1 |

| | | | |
|-----------------------------|---|----------|---|
| имеет _продолжительность | Технологическое_окно Ремонт_пути | integer | в часах |
| имеет_разряд | Монтёр | integer | |
| имеет_скорость | Рабочая_бригада | integer | скорость передвижения бригады |
| имеет_срок_устранения | Неисправность | integer | определение срока устранения соответствии с таблицей 1.1 |
| имеет_степень | Неисправность | integer | |
| имеет_стоимость | Оборудование Материал Топливо Электроэнергия | integer | |
| имеет_численность | Рабочая_бригада | integer | число монтёров |
| начинается_в | Технологическое_окно | datetime | время начала действия окна |
| обнаружен_в | Неисправность | datetime | дата и время обнаружения дефекта |
| требует_времени | Неисправность | decimal | время на устранение дефекта в часах |
| требует_монтёров | Неисправность | integer | число монтёров, необходимых для устранения дефекта |

Стоит дополнительно отметить, что любые свойства, определённые для класса, также характерны для всех его подклассов и имеют отношение и к ним.

2.2 Получение новых знаний по ТОиР ВСП с использованием средств Protégé Reasoner

2.2.1 Определение аксиом для онтологии ТОиР рельсового пути

Сформированная онтология может быть использована для получения новых знаний в области ТОиР рельсового пути на основе заданных исходных данных. С этой целью в неё закладываются аксиомы и правила вывода.

В конструкциях аксиом для свойств часто указываются ключевые слова, обозначающие их тип, такие как *some* и *only*. Их называют кванторами [108]. В таблице 2.3 приведены описания значений некоторых ключевых слов.

Таблица 2.3 — Кванторы ограничений в OWL-аксиомах [108]

| Квантор | Значение квантора |
|-----------|--|
| only | показывает связь с объектами только этих классов |
| some | существует хотя бы один объект, связанный данным свойством |
| min n | существует минимум n объектов, связанный данным свойством |
| max n | существует максимум n объектов, связанный данным свойством |
| exactly n | существует ровно n объектов, связанный данным свойством |
| value | следует перед указанием значения свойства данных |
| or | выполняется хотя бы одно условие |
| and | выполняются все условия |

Для понятий области технического обслуживания железной дороги в диссертации были определены следующие высказывания:

1. «Неотложная_бригада отвечает_за_безопасность only Линейный_участок» — только линейный участок является областью работ неотложной бригады.
2. «Неотложная_бригада передвигается_на exactly 1 Автомобиль» - показывает, что неотложная бригада пользуется только одним автомобилем.
3. «Неотложная_бригада устраняет some Неисправность» - показывает, что неотложная бригада используется для устранения дефекта.
4. «Укрупнённая_бригада отвечает_за_безопасность only Эксплуатационный_участок» — только эксплуатационный участок является областью работ укрупнённой бригады.
5. «Укрупнённая_бригада передвигается_на only Вагон» - показывает вид транспорта, на котором передвигается укрупнённая бригада.
6. «Рабочая_отделение inverse (базируется_в) max 2 Неотложная_бригада» — определяет, что в рабочем отделении может базироваться максимум 2 неотложные бригады. Ключевое слово inverse означает использование свойства обратного указанному в скобках.
7. «Технологическое_окно действует_на only Перегон» - показывает, что окно может действовать только на экземпляры класса «Перегон».

8. «Рабочая_отделение отвечает_за_безопасность some Линейный_участок – обозначает зону ответственности рабочего отделения в виде как минимум одного линейного участка.

9. «Монтёр работает_в exactly 1 (Неотложная_бригада or Укрупнённая_бригада)» - монтёр пути работает ровно в одной неотложной или укрупнённой бригаде.

10. «Станция имеет_позицию value 25» - задаёт относительную координату станции на линейном участке равной 25 км.

Аналогичным образом можно выстроить большое количество характерных для ТОиР рельсового пути высказываний.

Помимо аксиом существуют более сложные SWRL-правила вывода (Semantic Web Rule Language). В отличие от OWL-аксиом они позволяют цепочку логических утверждений вида «если-то», а также сравнивать значения свойств данных [109]. С целью получения новых знаний по ТОиР рельсового пути для разработанной онтологии введён ряд SWRL-правил:

- рабочее отделение имеет ту же позицию, что и станция, на которой оно расположено

$$\begin{aligned} & \text{Станция}(?s) \wedge \text{Рабочее_отделение}(?wd) \wedge \\ & \text{имеет_позицию}(?st, ?pos) \wedge \text{формируется_на}(?wd, ?st) \rightarrow \\ & \rightarrow \text{имеет_позицию}(?wd, ?pos) \end{aligned} \quad (2.1)$$

- рабочая бригада имеет ту же позицию, что и отделение, в котором она базируется

$$\begin{aligned} & \text{Рабочее_отделение}(?wd) \wedge \text{Рабочая_бригада}(?wb) \wedge \\ & \text{имеет_позицию}(?wd, ?pos) \wedge \text{базируется_в}(?wb, ?wd) \rightarrow \\ & \rightarrow \text{имеет_позицию}(?wb, ?pos) \end{aligned} \quad (2.2)$$

- станция расположена на линейном участке, если её координата попадает в границы участка

$$\begin{aligned}
& \text{Станция}(? st) \wedge \text{Линейный_участок}(? lp) \wedge \\
& \quad \text{имеет_позицию}(? st, ? pos) \wedge \\
& \quad \text{имеет_координату_начала}(? lp, ? start) \wedge \\
& \quad \text{имеет_координату_конца}(? lp, ? end) \wedge \\
& \text{greaterThan}(? end, ? pos) \wedge \text{lessThan}(? start, ? pos) \rightarrow \\
& \quad \rightarrow \text{расположен_на}(? st, ? lp)
\end{aligned} \tag{2.3}$$

- определение длины линейного участка по координатам его границ

$$\begin{aligned}
& \text{Линейный_участок}(? lp) \wedge \\
& \quad \text{имеет_координату_начала}(? lp, ? start) \wedge \\
& \quad \text{имеет_координату_конца}(? lp, ? end) \wedge \\
& \quad \text{subtract}(? len, ? end, ? start) \rightarrow \\
& \quad \rightarrow \text{имеет_длину}(? lp, ? len)
\end{aligned} \tag{2.4}$$

- дефект имеет ту же координату, что и элемент пути, в котором он выявлен

$$\begin{aligned}
& \text{Неисправность}(? d) \wedge \text{Элемент_пути}(? el) \wedge \\
& \quad \text{имеет_позицию}(? el, ? pos) \wedge \text{выявляется_в}(? d, ? el) \rightarrow \\
& \quad \rightarrow \text{имеет_позицию}(? d, ? pos)
\end{aligned} \tag{2.5}$$

- дефект расположен на линейном участке, если его координата попадает в границы участка

$$\begin{aligned}
& \text{Неисправность}(? d) \wedge \text{Линейный_участок}(? lp) \wedge \\
& \quad \text{имеет_позицию}(? d, ? pos) \wedge \\
& \quad \text{имеет_координату_начала}(? lp, ? start) \wedge \\
& \quad \text{имеет_координату_конца}(? lp, ? end) \wedge \\
& \text{greaterThan}(? end, ? pos) \wedge \text{lessThan}(? start, ? pos) \rightarrow \\
& \quad \rightarrow \text{расположен_на}(? d, ? lp)
\end{aligned} \tag{2.6}$$

- технологическое окно может быть выделено на перегон, если его длительность не меньше времени устранения дефекта, выявленного на этом перегоне

$$\begin{aligned}
& \text{Технологическое_окно}(? w) \wedge \text{Неисправность}(? d) \wedge \\
& \quad \text{Перегон}(? p) \wedge \text{расположен_на}(? d, ? p) \wedge \\
& \quad \text{требует_времени}(? d, ? dtime) \wedge \\
& \quad \text{имеет_продолжительность}(? w, ? wtime) \wedge \\
& \quad \text{lessThanOrEqual}(? dtime, ? wtime) \rightarrow \\
& \quad \rightarrow \text{действует_на}(? w, ? p)
\end{aligned} \tag{2.7}$$

- дефект устраняется в окне, выделенное на перегон с этим дефектом

$$\begin{aligned}
 & \text{Технологическое_окно}(?w) \wedge \text{Неисправность}(?d) \wedge \\
 & \text{Перегон}(?p) \wedge \text{расположен_на}(?d, ?p) \wedge \\
 & \text{действует_на}(?w, ?p) \rightarrow \\
 & \rightarrow \text{устраняется_в}(?d, ?w)
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

2.2.2 Поиск знаний о выделении технологических окон на перегоны

Для реализации примера поиска знаний в Protégé были созданы экземпляры ряда определённых при проектировании онтологии классов. Рассматривается линейный участок LP_1 длиной с координатой начала 0 км и координатой конца 50 км. На нём находятся три станции $\{St_1, St_2, St_3\}$ и четыре перегона $\{P_1, P_2, P_3, P_4\}$ (рисунок 2.4). Координаты станций соответственно равны 15, 25 и 40 км. На каждом перегоне выявлено по одному дефекту: открученный болт в скреплении КБ (d_1), выкол головки рельса (d_2), трещина в железобетонной шпале (d_3) и излом рельса (d_4). Относительные координаты элементов пути с неисправностями соответственно равны 5, 17, 30 и 48 км. Времена устранения дефектов составляют 0,67, 3, 2 и 6 часов. Для устранения дефектов может быть выделено одно из четырёх технологических окон $\{T_1^O, T_2^O, T_3^O, T_4^O\}$ длительностью 1, 6, 4 и 2 часа.

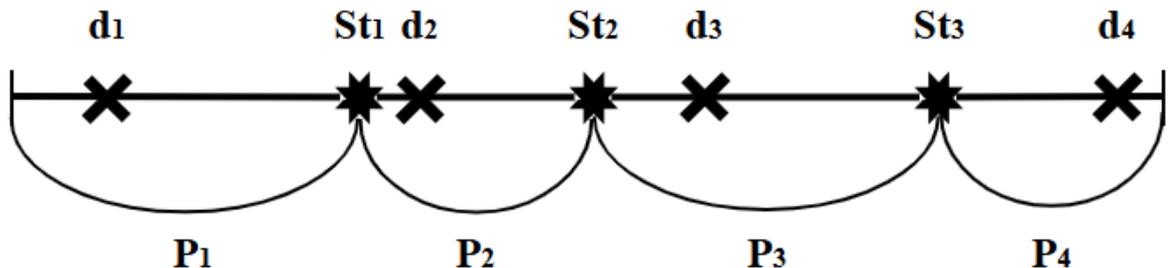


Рисунок 2.4 – Структура линейного участка для поиска знаний

Разработанные OWL-аксиомы и SWRL-правила (2.1 - 2.8) позволяют получить новые знания в соответствии с определёнными исходными данными. Получение новых данных о ТООР осуществляется путём запуска механизма вывода Protégé Reasoner. Он реализует дескриптивную логику для проверки согласованности онтологии и автоматического классифицирования классов, свойств и индивидов [110]. Для возможности использования более сложных

конструкций вывода знаний в диссертации применяется Reasoner Pellet [110]. Он позволяет выполнять операции, задаваемые SWRL-правилами. Выведенные знания отображаются в Protégé строками на жёлтом фоне.

В результате запуска Pellet были получены следующие знания:

- 1) длина линейного участка равна 50 км;
- 2) о расположении станций St_1 , St_2 , St_3 на линейном участке LP_1 ; пример вывода для станции St_2 представлен на рисунке 2.5;

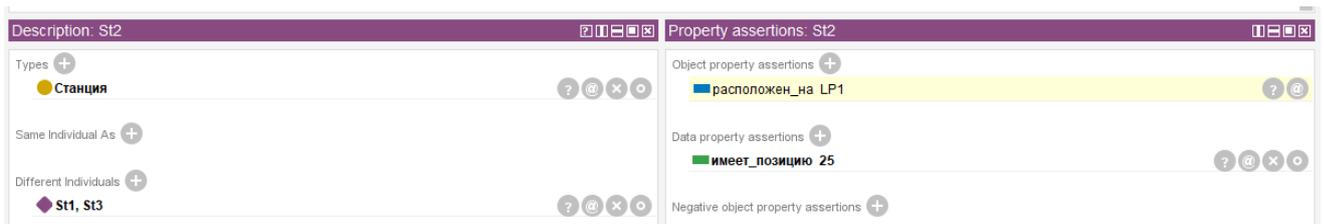


Рисунок 2.5 – Вывод знаний об участке, на котором расположена станция St_2

3) координаты неисправностей совпадают с координатами элементов, в которых они выявлены – выставлено свойство «имеет_позицию» в соответствии с правилом (2.5);

4) о расположении дефектов на линейном участке и LP_1 и по перегонам P_1 , P_2 , P_3 , P_4 ; информация по перегонам получена в связи с наследованием правила (2.6); на рисунке 2.6 приведён пример вывода для дефекта d_4 ;

5) о перегонах с дефектами, на которые могут быть выделены технологические окна T_1^O , T_2^O , T_3^O , T_4^O ; примеры выведенных значений для окон T_3^O и T_4^O представлены на рисунках 2.7 и 2.8;

6) о том, какие технологические окна T_1^O , T_2^O , T_3^O , T_4^O подходят для устранения дефекта в соответствии с правилом (2.8); пример полученных значений для дефекта d_4 представлен на рисунке 2.6;

7) о типе неисправностей, поскольку для подкласса понятия «Неисправность» были чётко определены дефекты, которые к нему относятся; пример вывода подкласса отступления приведён на рисунке 2.6.

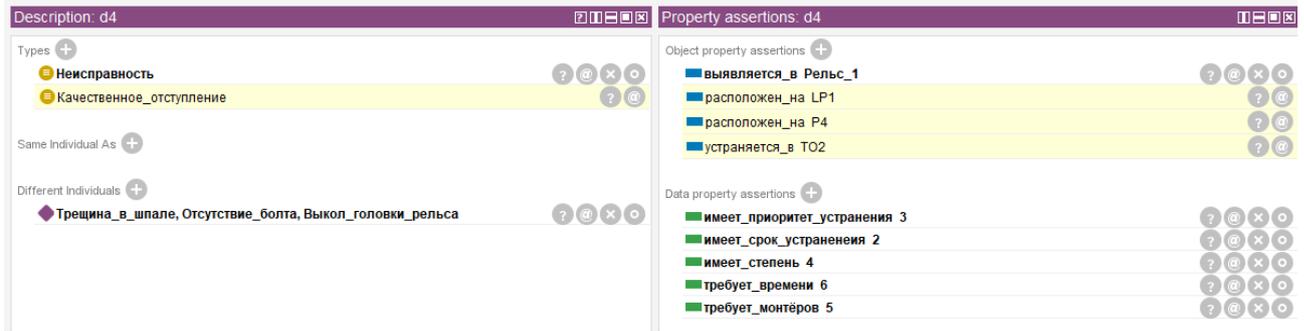


Рисунок 2.6 – Вывод знаний об участке и перегоне, на которых расположен дефект d_4 и в какие окна он может быть устранён



Рисунок 2.7 – Вывод знаний о перегонах, на которые может быть выделено технологическое окно T_3^O

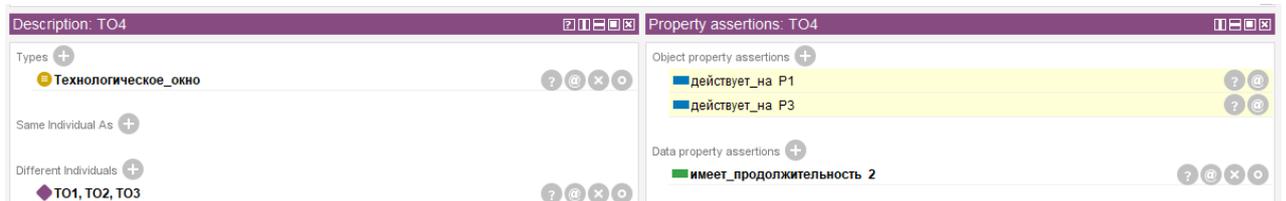


Рисунок 2.8 – Вывод знаний о перегонах, на которые может быть выделено технологическое окно T_4^O

2.3 Проектирование СППР для планирования ремонта рельсового пути

Завершение онтологического проектирования, определение основных правил вывода и особенностей функционирования изучаемой предметной области позволяет перейти к разработке СППР для назначения рабочих бригад на устранение выявленных дефектов пути. На рисунке 2.9 приводится предлагаемая в диссертации структура ИС.

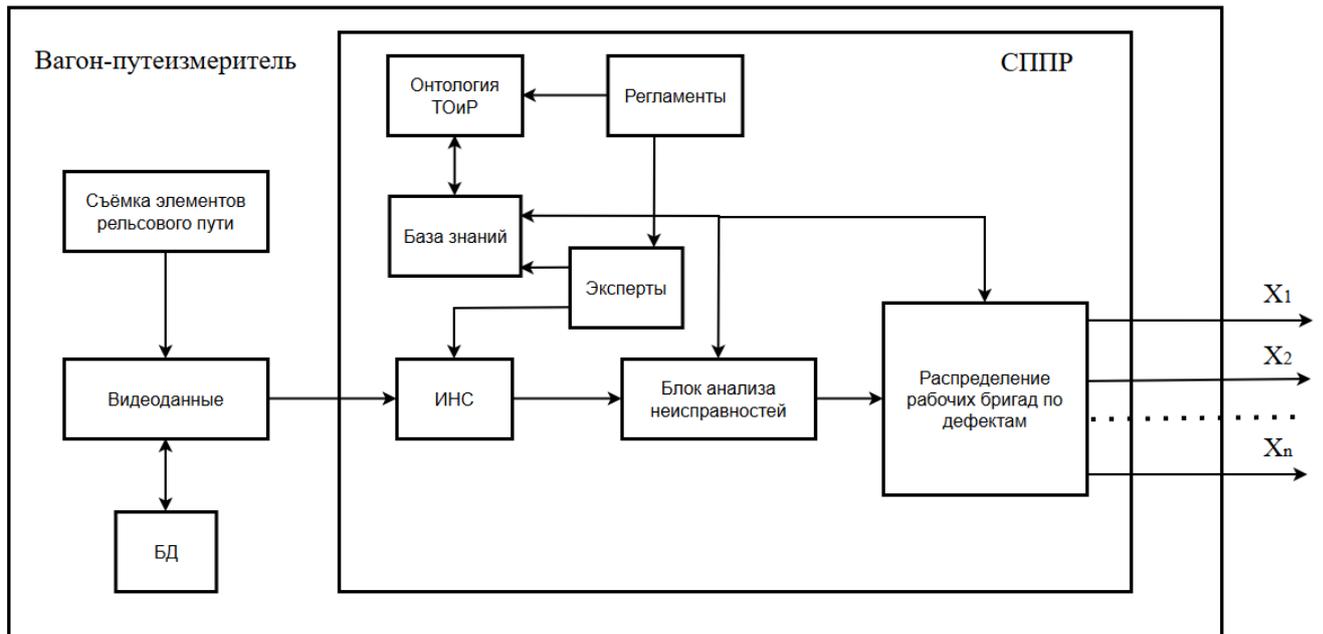


Рисунок 2.9 – Структура СППР для планирования ремонтных работ на рельсовом пути:

БД – база данных видеосъёмки, ИНС – искусственная нейронная сеть, СППР – система поддержки принятия решений, (X_1, \dots, X_n) – вектор назначения бригад

Общий алгоритм работы СППР описывается в следующем виде.

1. Для получения исходных данных об элементах рельсового пути используется система видеоконтроля. Съёмка компонентов ВСП осуществляется при помощи камер, устанавливаемых на вагон-путеизмеритель.
2. Сформированные изображения элементов пути хранятся в базе данных.
3. После съёмки и предобработки кадров с компонентами ВСП они передаются на вход ИНС в режиме реального времени.
4. Модель ИНС распознаёт и классифицирует объекты ВСП на изображениях, определяет их размеры, выявляет дефекты.
5. В соответствии с инструкцией [84] по распознанным ИНС областям происходит определение характеристик и параметров выявленных отступлений.
6. После обработки и классификации всех обнаруженных дефектов выполняется оптимальное распределение рабочих бригад для устранения

неисправностей в соответствии с правилами, определенными в разработанной базе знаний.

7. Эксперты в соответствии с регламентами выполняют корректировку базы знаний. Также они участвуют в формировании обучающих выборок для ИНС.

2.4 Выводы по второй главе

1. Разработана онтология и семантические сети ТОиР рельсового пути. Выделены основные понятия и свойства, характерные для рассматриваемой предметной области. Онтологическое проектирование позволило сформировать полную картину об области знаний ТОиР рельсового пути. Оно помогло извлечь семантическую составляющую из общего описания предметной области, определить причинно-следственные связи между её понятиями.

2. Сформулированы OWL-аксиомы и SWRL-правила вывода для разработанной онтологии ТОиР. С целью организации процесса поиска новых знаний определён набор исходных данных о линейном участке с перегонами и дефектами. Рассмотрена задача выбора подходящих технологических окно для этих перегонов с целью устранения выявленных неисправностей. Разработанные аксиомы и правила вывода обеспечивают получение новых знаний, которые не были заложены в модели заранее.

3. Спроектирована структура СППР для планирования ремонтных работ по устранению дефектов ВСП. Она предполагает использование системы видеоконтроля для формирования исходных данных об элементах пути. Предложено использование ИНС для обнаружения дефектов на изображениях ВСП. СППР включает в себя разработанную онтологию и базу знаний для принятия решений о назначении рабочих бригад на устранение неисправностей, которые реализуются программным модулем оптимизации.

3 РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКУАЛЬНОГО КЛАССИФИКАТОРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

3.1 Методика сбора данных о качестве инфраструктуры верхнего строения пути

Существуют разные виды вагонов-путеизмерителей, позволяющих анализировать различные элементы инфраструктуры железной дороги. Оценка технического состояния компонентов ВСП осуществляется с использованием диагностических комплексов инфраструктуры (ДКИ). На рисунке 3.1 представлен вид такого вагона. ДКИ оснащён специализированным оборудованием и ПО, предназначенными для измерения ключевых характеристик системы [78]. Процесс мониторинга осуществляется в режиме реального времени в процессе движения поезда по рельсовому пути. Скорость перемещения вагона по рельсовому пути может достигать 200 км/ч [78]. Помимо ДКИ можно отметить ВИКС, позволяющий анализировать состояние компонентов контактной сети и опорных конструкций железной дороги [90].



Рисунок 3.1 – Вагон-путеизмеритель ДКИ «ЭРА+»

Для получения исходных данных о состоянии элементов ВСП ДКИ выполняет съёмку рельсового пути при помощи камер, устанавливаемых на дно кузова вагона (рисунок 3.1). В зависимости от исследуемой подсистемы железной дороги используется различное число камер, их разрешение, размеры матрицы, фокусное расстояние, расстояние до объектов и прочее [72, 74, 78, 90]. Для контроля состояния элементов ВСП используются четыре линейные камеры. Они выполняют съёмку компонентов инфраструктуры в оттенках серого. Камеры установлены таким образом, что две из них формируют изображение ВСП слева и справа от левого рельса, а другие две – слева и справа от правого рельса (рисунок 3.2). Ширина линейки в формируемом изображении составляет 1024 пикселя. Частота съёмки составляет 60 Гц. При этом каждая линейка формирует изображение вдоль пути в масштабе 1 пиксель к 1 мм. Другие параметры камер являются настраиваемым и могут быть изменены операторами ДКИ [78]. Характеристики могут быть изменены помощи удалённого управления [78, 90].

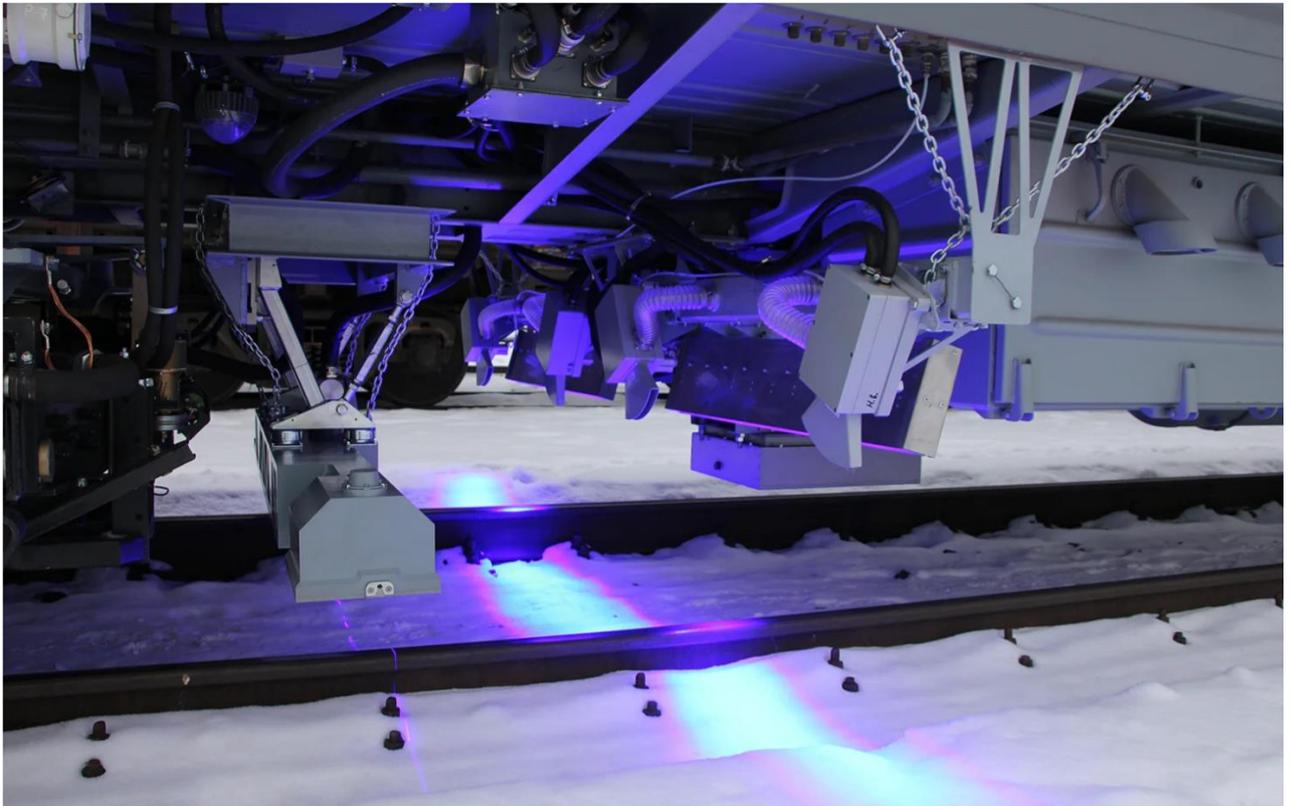


Рисунок 3.2 – Процесс съёмки вагоном-путьеизмерителем ВСП

После выполнения съёмки происходит передача сформированных изображений на обработку в режиме реального времени. Для этого используется нейросетевая модель. Также сформированные кадры могут быть сохранены в специальный файл с расширением `sgb` для возможности последующего анализа картинок в любое удобное время. Вне зависимости от типа обработки в ПО происходит создание буферов изображений. По каждой камере в оперативной памяти вычислительного устройства осуществляется хранение до 2 км данных. С целью формирования одного исходного кадра для нейронной сети извлекается 500 линеек изображения. Они считываются из буфера камеры. При этом кадры для модели формируются с нахлёстом в 80 пикселей с целью сохранения целостности объектов пути, которые могут оказаться на стыке двух изображений. Таким образом, исходные изображения имеют разрешение 1024x500. Они хранятся в формате `jrg`. На рисунках 3.3 и 3.4 приводятся примеры анализируемых изображений ВСП. В первом случае кадр был получен от камеры, расположенной слева от рельса, во втором – от камеры, расположенной справа от рельса. Оба изображения сформированы на одной координате рельсового пути.



Рисунок 3.3 – Пример изображения ВСП с камеры слева от рельса



Рисунок 3.4 – Пример изображения ВСП с камеры справа от рельса

3.2 Формирование наборов данных для моделей ИНС

3.2.1 Подготовка изображений с элементами ВСП

Для анализа состояния элементов рельсового пути в работе используется три искусственные нейронных сети:

- 1) основная модель для анализа состояний объектов ВСП, которая называется OBJ;
- 2) дополнительная модель для анализа компонентов рельсовых стыков, которая называется JLV;
- 3) дополнительная модель для анализа компонентов рельсовых накладок, которая называется BLT.

Основная модель OBJ используется для анализа всех элементов пути, которые попали в исходные кадр 1024x500. Она позволяет оценивать состояние рельсовых креплений, рельсов, шпал, рельсовых стыков и накладок, ЖАТ-соединителей, автоматизированных систем контроля, стрелочных переводов и других компонентов инфраструктуры. Изображения для нейронной сети формируются путём склеивания двух полных кадров. Модель OBJ является

развитием ИНС для диагностики состояний рельсовых креплений, представленной в работах [72, 73].

Дополнительная модель JLV используется для анализа состояний рельсовых стыков и связанных с ними объектов: рельсовых соединителей, поверхности катания рельса в области стыка. Она выполняет обработку изображения с разрешением 300x300. Исходный кадр для модели JLV вырезается из полных картинок 1024x500. Изображение формируется и анализируется по координатам рельсового стыка при условии, что модель OBJ обнаружила его. Для формирования кадра может потребоваться от 1 до 3 снимков из буфера данных. Модель JLV является развитием классификатора состояний рельсовых стыков, предложенного в работах [68-71].

Дополнительная модель BLT применяется для анализа элементов рельсовых накладок: торцов, болтов, гаек, болтовых шляпок и отверстий. Она распознаёт объекты на изображениях с разрешением 200x1200. Такие кадры формируются из 1-5 полных картинок, взятых из буфера данных. Вырезка изображения для модели BLT осуществляется в случае обнаружения моделью OBJ либо рельсового стыка, либо обоих торцов накладки по координатам этих объектов.

На рисунке 3.5 приводится структура разработанного интеллектуального классификатора. Указаны размеры картинок, передаваемых на входы моделей. Детекторы принимают кадры из буфера изображений. Модель OBJ выполняет распознавание основных элементов ВСП: креплений, шпал, рельсов, стрелочных переводов и других. Распознанные детектором объекты передаются анализатору неисправностей для формирования отступлений. В случае обнаружения рельсового стыка в кадре модель OBJ сообщает координату этого объекта детектору JLV. Тот запрашивает изображение размерами 300x300 со стыком из буфера картинок для более детального анализа данного объекта. В случае подтверждения наличия рельсового стыка модель JLV также передаёт распознанные области анализатору и вызывает модель BLT с целью поиска рельсовых накладок. Последний детектор выполняет аналогичные действия.

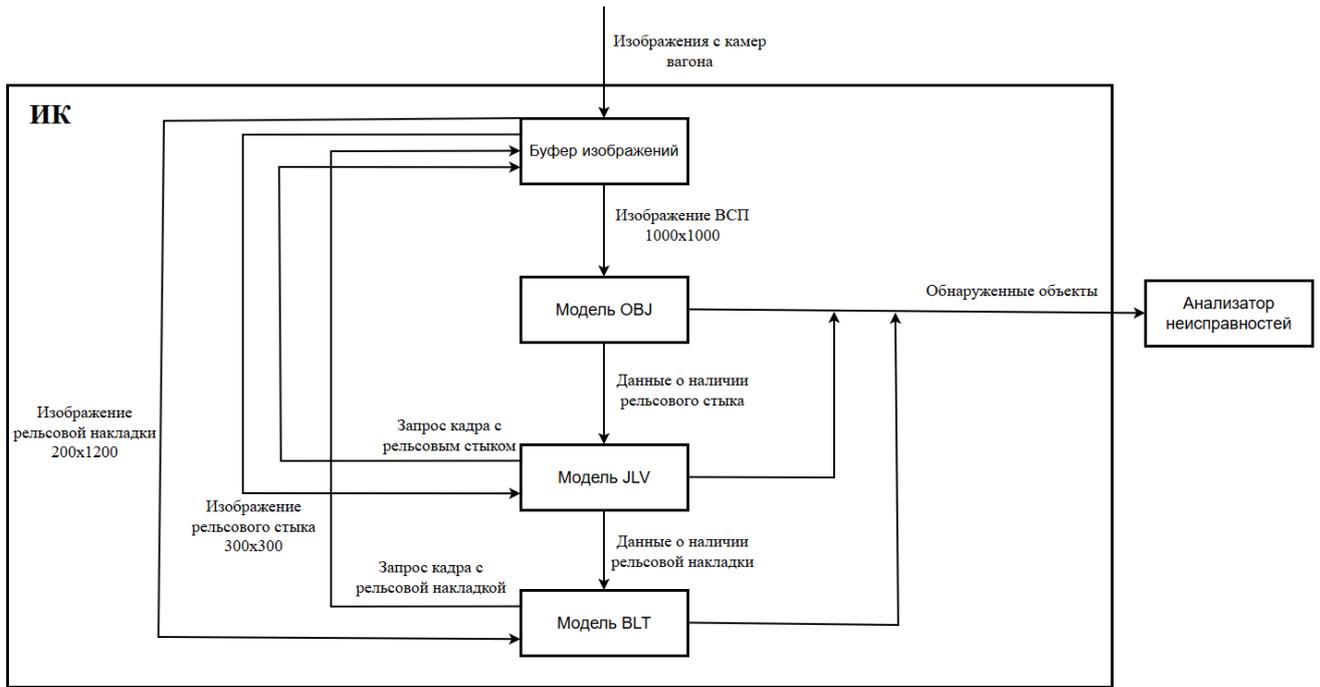


Рисунок 3.5 – Структура интеллектуального классификатора

На рисунках 3.6 – 3.8 приводятся примеры кадров, которые являются исходными данными для моделей OBJ, JLV и BLT соответственно. Отдельно стоит отметить, что для первой модели датасет содержит изображения с разрешением 1000x1000. Такие кадры формируются путём отсечения 24 пикселей с того края изображения, где находится рельс: для картинок с камер, расположенных слева от рельса (рисунок 3.3), с правой стороны, а для картинок с камер, расположенных справа от рельса (рисунок 3.4), с левой стороны.

Изображение для детектора JLV для картинок с камер, расположенных слева от рельса, формируется следующим образом: от координаты стыка осуществляется отступ 170 пикселей влево и 130 пикселей вправо, а также по 150 пикселей вверх и вниз (рисунок 3.7). Поскольку объект может быть расположен в разных местах по вертикали, для обрезки может потребоваться предыдущий или следующий кадр.

Изображение для детектора BLT для картинок с камер, расположенных слева от рельса, формируется следующим образом: от координаты стыка осуществляется отступ 200 пикселей влево, а также по 600 пикселей вверх и вниз (рисунок 3.8). Поскольку объект может быть расположен в разных местах по вертикали, для обрезки может потребоваться предыдущий или следующий кадр.

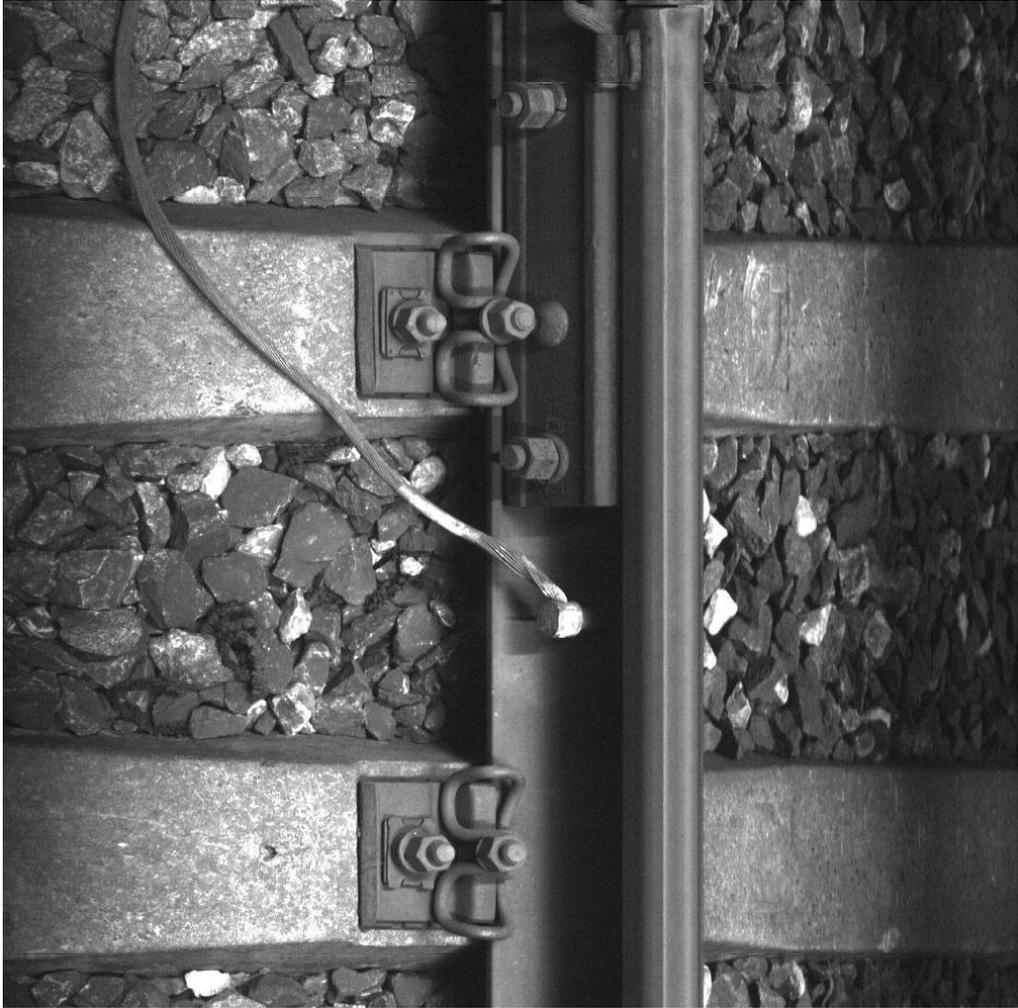


Рисунок 3.6 – Пример кадра из набора данных для основной модели детектора
ОВJ

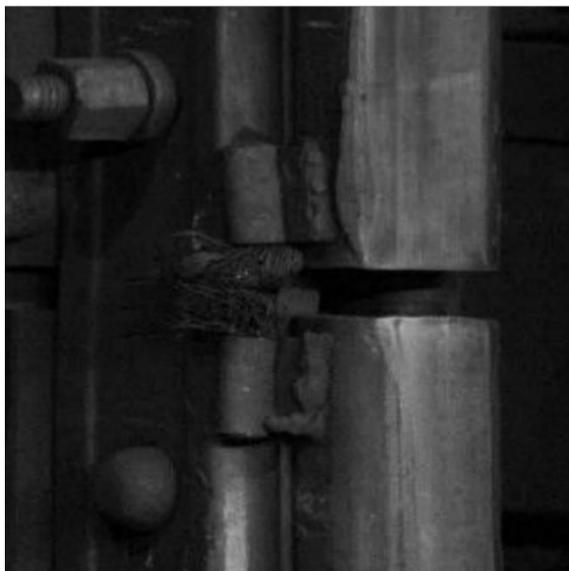


Рисунок 3.7 – Пример кадра из набора данных для дополнительной модели
детектора JLV



Рисунок 3.8 – Пример кадра из набора данных для дополнительной модели детектора BLT

3.2.2 Разметка изображений с элементами ВСП

Сформированные для наборов данных кадры используются для обучения моделей нейронных сетей. Они должны обучиться определять элементы ВСП для последующего анализа их состояний. Для этого производится разметка изображений. С целью получения высокой точности обнаружения отдельных компонент элементов рельсового пути в диссертационной работе предложено использовать подход с выделением прямоугольных областей на картинках. Такой метод используется для решения задачи распознавания уникальных экземпляров объектов разных классов на изображении, называемой object detection [111]. Существует большое число программ для нанесения разметки на кадры. Среди них наиболее распространёнными являются Labelimg, CVAT (Computer Vision Annotation Tool), Label Studio, VIA (VGG Annotation Tool), Diffgram и Labelme [112]. В диссертации задействовано первое из представленных программных средств для разметки. Labelimg устанавливается локально на компьютер

пользователя, имеет простой и понятный интерфейс, позволяет удобно и быстро выделять объекты на изображениях благодаря наличию горячих клавиш [113].

Для изображений каждой из трёх рассматриваемых моделей в программе Labeling произведена разметка компонентов верхнего строения пути. Хранение информации о выделенных объектах, их классах и координатах на кадре осуществляется в формате Pascal Voc [112]. Для каждого изображения после нанесения на него прямоугольных областей формируется файл с расширением xml с таким же именем, как и у картинки. Помимо данных об объектах он содержит в себе информацию о разрешении изображения и его названии (рисунок 3.9).

```

<annotation>
  <filename>20210917_010950_1_00_554.466.jpg</filename>
  <source>
    <database>Unknown</database>
    <annotation>Unknown</annotation>
    <image>Unknown</image>
  </source>
  <size>
    <width>1000</width>
    <height>1000</height>
    <depth />
  </size>
  <segmented>0</segmented>
  <object>
    <name>nut</name>
    <truncated>0</truncated>
    <occluded>0</occluded>
    <difficult>0</difficult>
    <bndbox>
      <xmin>244.0</xmin>
      <ymin>96.0</ymin>
      <xmax>301.0</xmax>
      <ymax>135.0</ymax>
    </bndbox>
    <attributes>
      <attribute>
        <name>rotation</name>
        <value>0.0</value>
      </attribute>
    </attributes>
  </object>
  <object>
    <name>tie_concr</name>
    <truncated>0</truncated>
    <occluded>0</occluded>
    <difficult>0</difficult>
    <bndbox>
      <xmin>1.0</xmin>
      <ymin>605.0</ymin>
      <xmax>303.0</xmax>
      <ymax>827.0</ymax>
    </bndbox>
    <attributes>
      <attribute>
        <name>rotation</name>
        <value>0.0</value>
      </attribute>
    </attributes>
  </object>
  <object>
    <name>nut</name>
  </object>

```

Рисунок 3.9 – Пример содержимого xml-файла с разметкой для модели ОВЖ

На рисунках 3.10 – 3.12 приводятся полученная в программе Labeling разметка для кадров с рисунков 3.6 – 3.8. В таблицах ПБ.1, ПБ.2 и ПБ.3 представлен список классов для моделей OBJ, JLV и VLT соответственно. Для каждой метки датасетов указаны значения выделяемых областей и количество таких областей. Всего наборы данных содержат 28741, 11843 и 10783 изображения соответственно. Для OBJ было размечено 205676 областей, для JLV – 37056, для VLT – 70762. Модели осуществляют распознавание объектов 65, 20 и 11 классов соответственно.

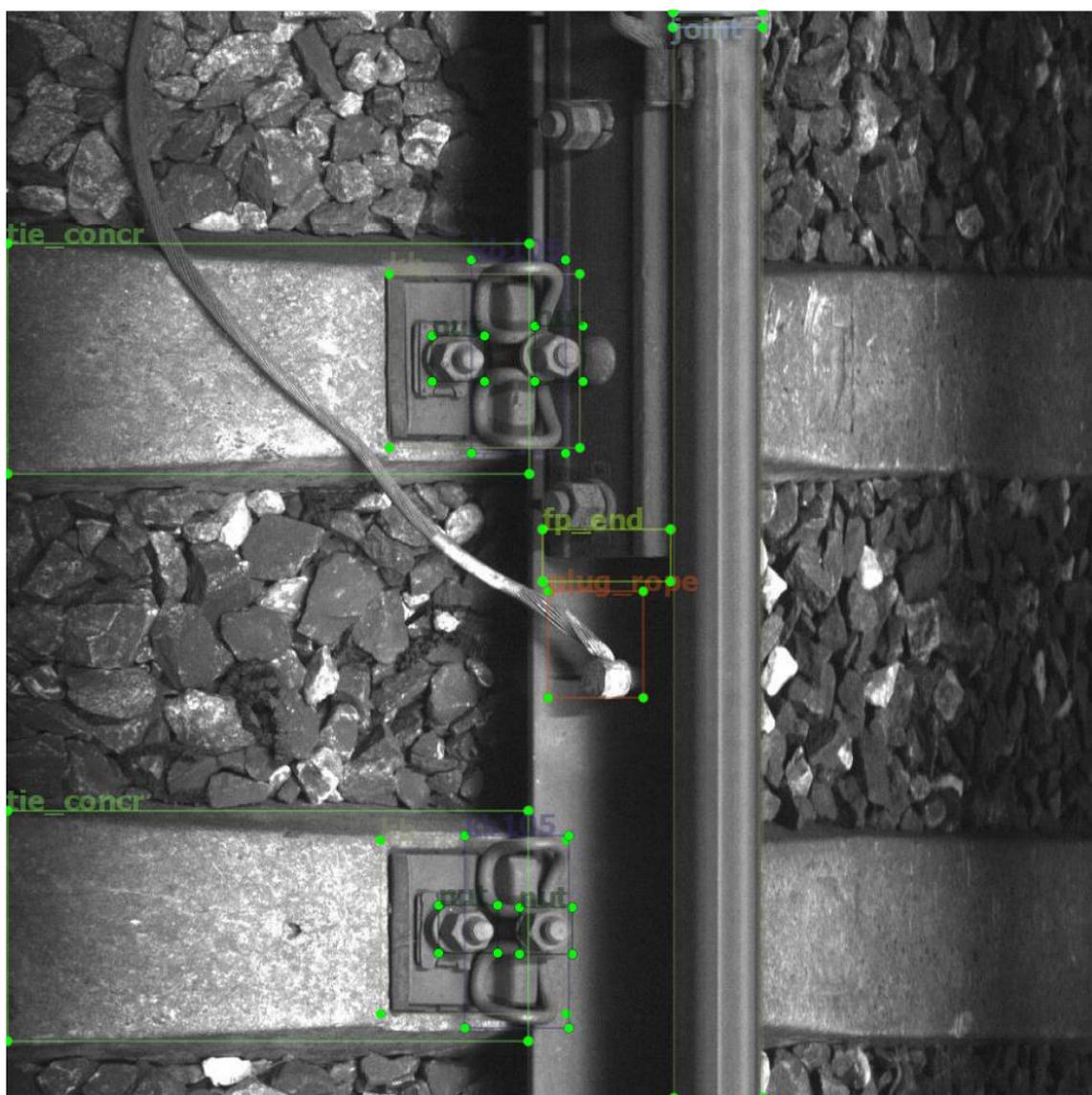


Рисунок 3.10 – Пример разметки кадра из набора данных для основной модели детектора OBJ



Рисунок 3.11 – Пример кадра из набора данных для дополнительной модели детектора JLV

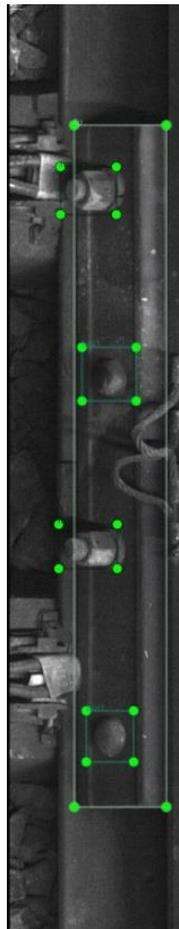


Рисунок 3.12 – Пример кадра из набора данных для дополнительной модели детектора BLT

Выделение объектов на изображениях прямоугольными областями позволяет решить ряд задач, связанных с обнаружением элементов верхнего строения пути и оценки их состояний.

1. Определить дефект по наличию объекта класса, который описывает неисправность, например, `hole_do`, `ars_no_mono`, `concr_crack`, `tie_concr_destroyed`, `pandrol_missing` (датасет OBJ), `conn_cut`, `conn_missing`, `broken_spike` (датасет JLV), `hole`, `bolt_crack`, `crack` (датасет BLT).

2. Определить положение дефекта в кадре.

3. Определить длину, ширину или площадь дефекта в плоскости пути;

4. Определить все дефекты, имеющиеся в кадре.

5. Определить несколько дефектов для одного и того же элемента пути на одной картинке, например, `kb_no_bracket` и `hole_square` для датасета OBJ.

6. Выполнить отслеживание положения определённых объектов пути в процессе движения, например, `gail` для датасета OBJ.

7. Определить параметры взаимного расположения объектов: область пересечения (наложение, перекрытие) и её площадь, угол между осями, расстояние.

3.2.3 Очистка и корректировка датасетов

После выполнения разметки наборов данных и формирования пар «jpg-файл—xml-файл» осуществляется проверка каждого датасета на корректность. Она включает в себя несколько этапов.

- Приведение кадра и разметки к нему к формату «рельс справа»: все изображения приводятся к единому виду, как если бы все кадры были отсняты слева от рельса (рисунки 3.3, 3.6 - 3.8).

- Проверка количества файлов: число файлов в наборе данных всегда должно быть чётным, поскольку одно изображение всегда описывается двумя файлами — кадром в формате jpg и xml-файлом с описанием выделенных областей. Если обнаружено отсутствие разметки для какой-либо картинки, то её можно доразметить в Labelimg. Если нет кадра, то его можно найти по названию в xml-файле.

- Проверка правильности нанесения метки класса и размеров прямоугольных областей: используется написанный автором скрипт для определения некоторых параметров объектов по каждому из классов – ширины, высоты, отношения ширины к высоте, площади и частоты появления на одной картинке. Также отдельно сохраняются изображения и разметка, где были найдены минимальная и максимальная из описанных характеристик. По каждому классу составляется график распределения обозначенных параметров (рисунок 3.13). В соответствии с полученными значениями минимальных и максимальных характеристик могут быть выявлены проблемы с размером отмеченных прямоугольников или с присвоением области не того класса. Обнаруженные ошибки исправляются через Labeling. Затем скрипт используется повторно для проверки тех классов, где ранее были выявлены некорректные области. Процесс повторяется до тех пор, пока все ошибки не будут устранены. Если для какого-либо класса выявляются закономерные ошибки, то его объекты пересматриваются полностью.

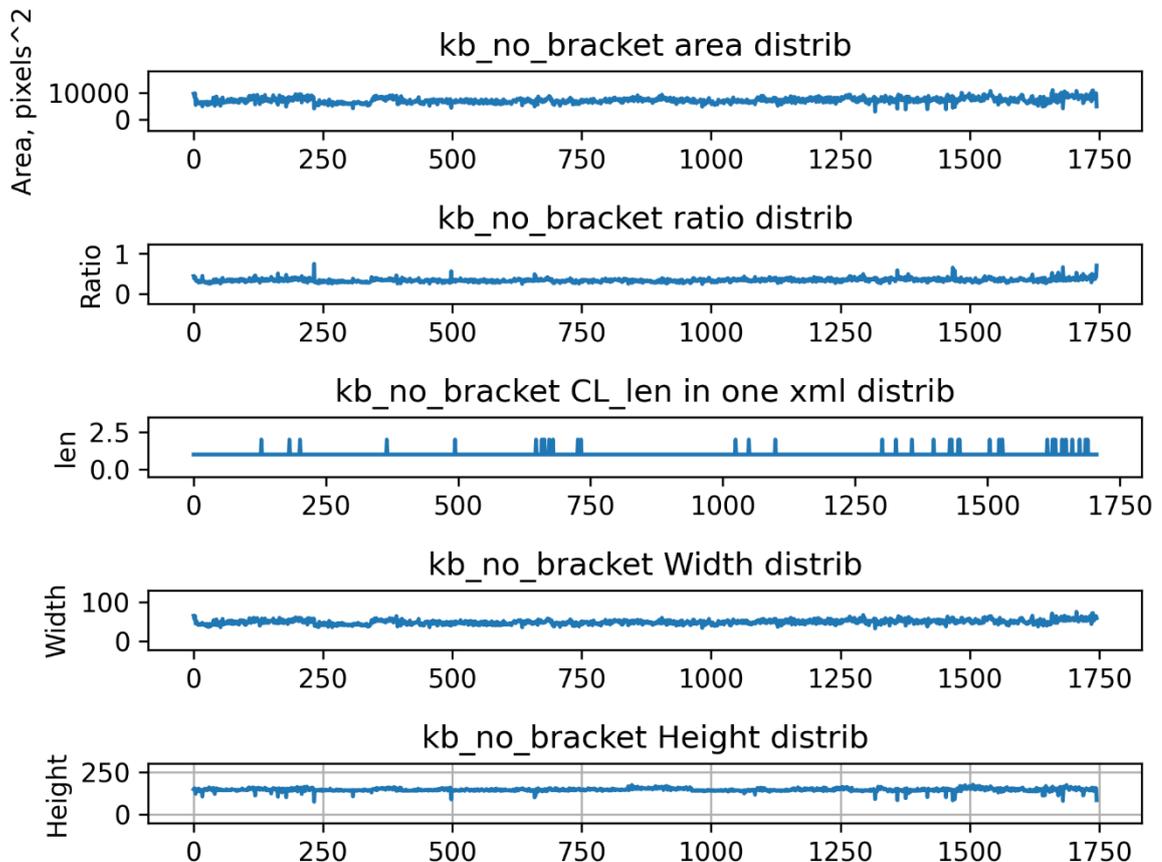


Рисунок 3.13 – Пример графиков распределения параметров для класса `kb_no_bracket` из датасета OBJ

- Удаление избыточной информации из xml-файлов: некоторые узлы xml-файлов с разметкой, такие как path, folder и verified, не используются при обучении моделей. Их очистка позволяет уменьшить размер наборов данных.

- Удаление классов с малым числом объектов: если класс содержит менее 30 объектов, то изображения, где есть области с данной меткой, исключаются из набора данных. Обучение модели на малом количестве примеров не позволит хорошо распознавать этот класс.

После завершения операций очистки и корректировки создаётся html-файл с датой формирования датасета и указанием числа объектов по каждому из классов. Также в нём для каждой метки отображаются фрагменты изображений с выделенными на них областями.

В завершении всех процесса предварительной обработки данных датасет делится на обучающую и валидационную выборки. Доля первой составляет 90% изображений, а второй – 10 %. Соотношение кадров в выборках одинаково для всех датасетов.

3.3 Обучение моделей ИНС распознаванию элементов рельсового пути

3.3.1 Выбор архитектуры нейронной сети с средств обучения

При выборе архитектуры нейросети важное внимание уделялось балансу производительности и качества работы модели. Детектор должен распознавать объекты достаточно быстро, поскольку система диагностики работает в реальном времени. При этом необходимо обеспечить приемлемое качество расписывания элементов и их дефектов. Необходимо находить баланс между производительностью и точность работы сети, выявлять оптимальные значения характеристик, учитывая требования конкретной задачи.

Для обнаружения компонентов верхнего строения пути выбрана предварительно обученная модель SSD Mobilenet v3 Small COCO из набора детекторов Tensorflow Model Zoo. Он включает в себя ряд нейросетей для распознавания объектов на изображениях. В Tensorflow Model Zoo приводится

информация о средней скорости обработки одного изображения (в мс) и точности обнаружения объектов по метрике mean Average Precision (mAP, средневзвешенная точность) [114]. Предобученные модели проще дообучить для решения собственных задач по распознаванию объектов на изображениях. Такой тип детекторов был заранее натренирован на огромном наборе данных с большим числом классов. Модель SSD Mobilenet v3 Small COCO обучена на уменьшенной версии популярного набора данных MS COCO (Microsoft Common Objects in Context) [115].

Выбранная архитектура SSD (Single Shot Detector), наряду с другой популярной архитектурой YOLO (You Look Only Once) [116, 117], показывает высокую производительность в задачах распознавания объектов на изображениях. Она является однопроводной сетью, что позволяет за один цикл прохода данных через нейросеть выполнять как определение прямоугольных областей, так и их классов [117, 118]. Этот детектор относится к серии сетей, тестируемых на мобильных устройствах с процессором типа Pixel 1. Скорость работы модели составляет 43 мс при средневзвешенной точности 15,4 [114]. Она обладает приемлемым качеством для идентификации элементов ВСП и их компонентов небольших размеров, что позволяет эффективно выявлять дефекты рельсового пути. Несмотря на то, что исходная модель SSD Mobilenet v3 Small COCO была обучена для обработки изображений определённых размеров (320x320 пикселей), имеется возможность изменять размеры входов модели. Это даёт большую гибкость в настройке скорости работы и качества детекции сети [117, 119].

Для обучения моделей детекторов выбрана одна из самых популярных библиотек для глубокого обучения Tensorflow. Для фреймворка написано большое количество руководств и имеется хорошая документация. Он подходит для обучения рассматриваемой модели SSD. Разработчики библиотеки предлагают удобный программный интерфейс Tensorflow Object Detection API для тренировки предобученных на Tensorflow моделей [120].

Обучение моделей производится на языке программирования Python, на котором написана библиотека Tensorflow.

Для реализации обучения на фреймворке Tensorflow исходные выборки датасетов конвертируются в формат record – один файл для обучающей выборки и один для валидационной. Также создаётся файл с расширением pbtxt, который содержит список классов из набора данных в алфавитном порядке и определяет для каждого класса уникальный идентификатор, являющийся натуральным числом.

3.3.2 Обучение основной модели ОВJ

Перед обучением ИНС осуществляется настройка параметров тренировки модели. Характеристики детектора корректируются через файл конфигурации, поставляемый вместе с предобученной моделью. Он содержит базовые настройки обучения, которые применялись при обучении исходной сети [121]. Для детектора ОВJ используются следующие настройки обучения.

1. Число классов — 65.

2. Размер входа сети 500x500. Исходные изображения сжимаются в 2 раза, что является приемлемым масштабом для того, чтобы различать объекты рельсового пути. Поскольку размеры входа исходной сети также квадратные (320x320) ей будет проще адаптироваться под новые значения этого параметра.

3. Фокальная функция потерь для оценки правильности классификации объектов (Focal Loss, Weighted Sigmoid Loss). Первая из них является модификацией бинарной перекрёстной энтропии (Binary Cross Entropy). Основная идея фокальной потери — минимизировать влияние правильно распознанных объектов на общий градиент ошибки [122]. Алгоритм автоматически фокусируется на сложных случаях, при этом учитывая вес каждого класса в зависимости от его вклада в общую ошибку. Формула фокальных потерь выглядит следующим образом:

$$FL = - \sum_{i=1}^{C=2} \alpha_i (1 - y_i')^{\gamma} \log(y_i'), \quad (3.1)$$

где FL – значение потерь;

C – число классов;

i – номер класса;

y_i – истинные метки классов объектов на картинке;

y_i' – предсказанные метки классов объектов на картинке;

α_i – весовой коэффициент;

γ – параметр фокуса.

Параметр фокуса выступает в роли коэффициента, регулирующего ослабление вклада лёгких примеров в общую ошибку классификации. В диссертации применяется стандартное значение $\gamma = 2$ для всех моделей. При нулевом γ функция сводится к обычной бинарной кросс-энтропии. Коэффициент α_i задаёт вес для i -ой метки. Он описывает вклад правильных и ложных классификаций в итоговое значение ошибки. Если α_1 является весом для верных распознаваний, то для неверных $\alpha_2 = 1 - \alpha_1$. В диссертации для всех моделей при обучении используется значение $\alpha_1 = 0,75$.

4. Функция потерь Хьюбера или сглаженная абсолютная ошибка (Smooth MAE) для оценки правильности локализации объектов. Она является производной от функций MAE (Mean Absolute Error) и MSE (Mean Squared Error) и золотой серединой между ними [123]. При небольшом значении ошибки функция потерь Хьюбера применяет среднюю оценку, а при большом – абсолютную. Она вычисляется по формуле:

$$HL = \begin{cases} \frac{1}{2}(y - y')^2, & \text{если } |y - y'| \leq \delta \\ \delta|y - y'| - \frac{1}{2}\delta^2, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (3.2)$$

где HL – значение потерь;

C – число классов;

y_i – истинные значения координат объектов;

y_i' – предсказанные значения координат объектов;

δ – пороговое значение.

Параметр δ определяет функцию потерь, которую необходимо использовать для вычисления ошибки. Если абсолютная разность между истинными и предсказанными метками меньше или равна δ , то применяется MSE, в противном случае применяется MAE. В диссертации при обучении всех моделей используется значение $\delta = 1$.

5. Размер батча — 64. Это число показывает количество изображений, обрабатываемых моделью за один проход кадров через неё. Чем выше это значение, тем быстрее будет проходить процесс обучения. Его выбор зависит от имеющегося объёма оперативной памяти и размера входов модели.

6. Число эпох – 100000. Количество шагов обучения. Определяет, сколько раз через модель проходят все кадры датасета.

7. Методы расширения данных (Data augmentation) — `ssd_random_crop` и `random_vertical_flip`. Задаёт способы изменения обучающей выборки в процессе обучения детектора с целью повышения вариативности исходных данных. Операции расширения данных применяются к каждому выражению с заданной вероятностью. `ssd_random_crop` является стандартной опцией для всех моделей SSD. Метод выполняет обрезку изображения в случайном месте, где есть выделенные области и приводит размеры кадра к входным размерам модели [120]. Вероятность его применения составляет 0,85. Операция `random_vertical_flip` выполняет это переворот изображения по вертикали. Вероятность применения метода составляет 0,5.

8. Оптимизатор — Адам. Для обучения всех моделей детекторов используется один из самых популярных алгоритмов поиска оптимального значения весов Адам (Adam) [124].

9. Принцип изменения скорости обучения (learning rate) — циклически уменьшающийся. Один из самых эффективных методов дообучения моделей. Предполагает задание начальной скорости обучения с её дальнейшим уменьшением [120]. Начальное значение данного параметра для модели OBJ составляет 0,002. Затем оно уменьшается в 2 раза на шагах обучения 5000, 10000, 20000 и 50000.

Помимо описанных параметров в настройках обучения задаются пути к файлу с предварительно обученной моделью SSD (checkpoint), к файлам с выборками в формате record, к файлу с описанием классов с расширением ptxt.

Далее осуществляется запуск обучения. Для детекторов OBJ, BLT и JLV в процессе тренировки применяется подход с тонкой настройкой всех весов (Fine

Tuning). Данный метод предполагает внесение небольших корректировок в значения весов модели для возможности распознавания новых объектов [125].

Отслеживание прогресса обучения и основных метрик качества работы модели на разных шагах тренировки осуществляется с помощью плагина Tensorboard [126]. Ключевыми показателями при оценке работы модели приняты средневзвешенная точность mAP (mean Average Precision) и средневзвешенный отклик mAR (mean Average Recall), а также значение функции потерь loss. Данные метрики входят в набор coco_detection_metrics и являются самыми мощными в задачах распознавания объектов на изображениях [127].

mAP определяется с помощью precision и recall – двух важных метрик точности распознавания. Первая из них показывает долю верных предсказаний объектов по классу среди всех предсказаний модели по данному классу, а вторая – долю верно предсказанных объектов по классу среди всех объектов, на самом деле принадлежащих к этому классу [128]. Стоит отметить условие, при котором прямоугольная область считается обнаруженной правильно. Объект считается распознанным в том случае, если существует рамка того же класса, с которой он совпадает. При этом задаётся минимальная степень соответствия областей. Правильность обнаружения определяется через метрику IoU (Intersection over Union). Эта характеристика определяется как отношение площади пересечения предсказанного и реального объектов к их общей площади [128]. Часто в качестве порогового значения для верной идентификации области принимается значение $\text{IoU} = 0,5$. При вычислении mAP для определения правильного предсказания используется диапазон значений IoU от 0,5 до 0,95 с шагом 0,05. Для каждого значения IoU определяется средняя точность (AP):

$$AP = \sum_{k=0}^{k=n-1} [\text{recall}(k) - \text{precision}(k + 1)] * \text{precision}(k), \quad (3.3)$$

где AP – средняя точность;

n – число интервалов IoU;

$\text{recall}(k)$ – значение recall для k -ого IoU;

$precision(k)$ – величина precision для k -ого IoU;

$precision(k+1)$ – величина precision для $k+1$ -ого IoU.

Для вычисления mAP в определённой точке находится среднее значение между всеми AP для рассматриваемого диапазона IoU. На рисунке 3.14 приводятся графики зависимости нескольких видов mAP от номера эпохи обучения, полученные в Tensorboard для модели OBJ. Для наглядности и демонстрации тенденции изменения mAP используется сглаживание формируемой кривой (жирная линия). Графики зависимостей фактических значений mAP от номера эпохи обучения представлены на рисунке 3.14 полупрозрачными линиями.

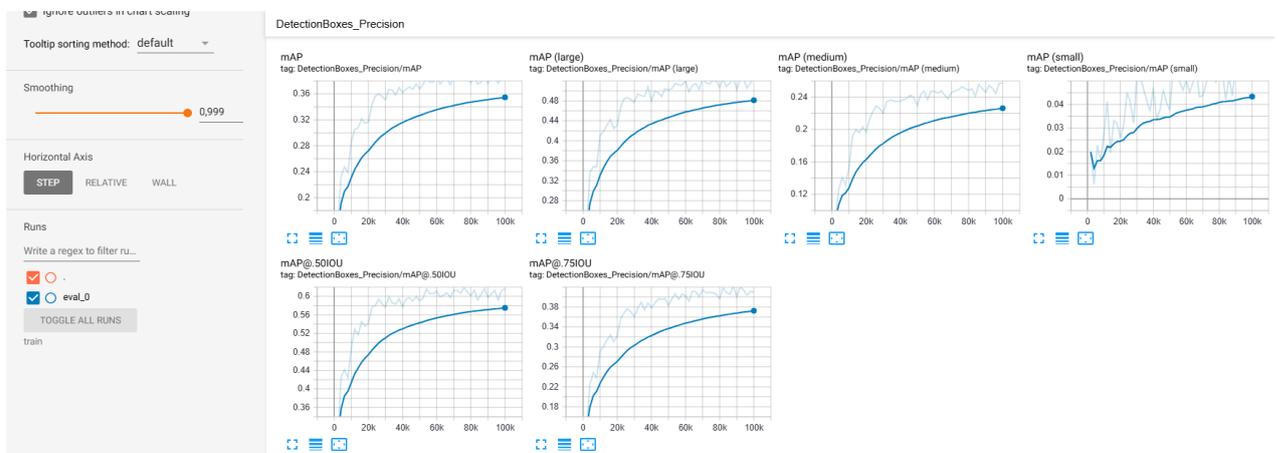


Рисунок 3.14 – Значения mAP, полученные в результате обучения детектора OBJ

Первый график показывает значение mAP, полученное при варьировании IoU от 0,5 до 0,95. Для модели OBJ на в момент завершения обучения оно равно 0,39. Полученное значение является небольшим, поскольку датасет содержит большое количество классов разных размеров. Из-за этого по некоторым меткам наложение на исходные области более точное.

Следующие три графика первой строки на рисунке 3.14 показывают значение mAP для объектов разных размеров. mAP large вычисляется только для прямоугольных областей площадью не менее 96^2 пикселей, mAP medium – для областей площадью от 32^2 до 96^2 пикселей, mAP small – для областей площадью не более 32^2 пикселей [127]. Для модели OBJ полученные на эпохе 100000 значения описанных метрик составляют соответственно 0,53, 0,26 и 0,06. По полученным

результатам выявляются особенности работы модели SSD – более точное распознавание крупных объектов и менее точное мелких.

Последние два графика показывают значение mAP полученное при $IoU = 0,5$ и $IoU = 0,75$ соответственно. Первая метрика признана в диссертации самой важной, поскольку является необходимым и достаточными условием верного обнаружения элементов ВСП. Для модели детектора OBJ на момент завершения обучения были получены значения $mAP_{IoU=0,5} = 0,61$ и $mAP_{IoU=0,75} = 0,41$. Полученные метрики являются хорошими для модели, содержащей большое число классов разных размеров.

Метрика AR (average recall) вычисляется по аналогии с mAP. Для каждого из выбранных порогов степени покрытия прямоугольных областей IoU определяется значение recall для каждого из классов [127]. mAR вычисляется как среднее значение AR по всем меткам. На рисунке 3.15 приводятся полученные в результате обучения модели OBJ зависимости по этой метрике. В Tensorboard mAR обозначен как AR.

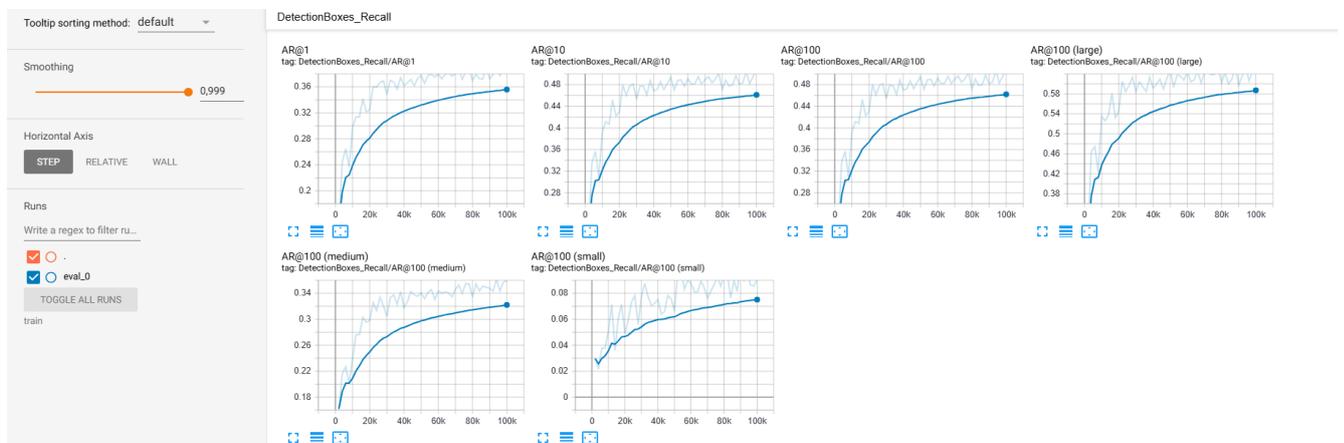


Рисунок 3.15 – Значения mAR, полученные в результате обучения детектора OBJ

Первые три графика показывают значение mAR по следующему принципу:

- для объекта с самой высокой достоверностью в кадре;
- для десяти объектов с самыми большими достоверностями в кадре;
- для сотни объектов с самыми большими достоверностями в кадре.

По данным метрикам для модели OBJ получены значения 0,39, 0,51 и 0,51. Для задачи распознавания элементов ВСП наиболее важными являются последние.

Полученные значения являются приемлемыми для метрики mAR, поскольку превышают значение 0,5 [127]. Примерное совпадение последних двух значений объясняется тем, что для датасета OBJ обычно имеется около 10 реальных объектов в кадре (рисунок 3.10). Также mAR вычисляется для объектов разных размеров по аналогии с mAP для 100 самых достоверных объектов. По этим метрикам отклика получены значения 0,64, 0,36 и 0,09 соответственно для маленьких, средних и больших объектов.

Tensorflow Object Detection API производит вычисление трех составляющих общей функции потерь: классификационной, локализационной и регуляризационной. Последняя добавляется автоматически средствами пакета программ и служит для сглаживания итоговых ошибок. На рисунке 3.16 приводятся полученные для модели OBJ графики отдельных функций потерь и общей функции потерь. Значения первых трёх компонент на момент завершения обучения составили 0,12, 0,07 и 0,02 соответственно. Общее значение функции потерь равно 0,21. Полученное значение ошибки говорит о хорошем качестве работы модели на валидационной выборке.

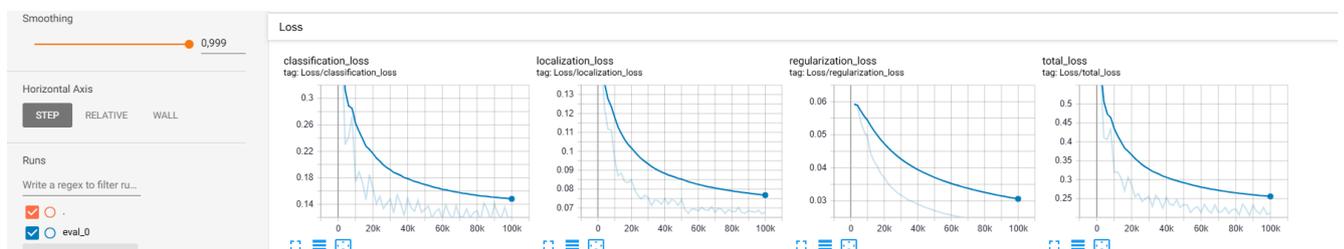


Рисунок 3.16 – Значения функций потерь, полученные в результате обучения детектора OBJ

На рисунке 3.17 приводится пример распознавания объектов на изображении обученной моделью OBJ. Для каждой области указывается определённый класс и достоверность принадлежности к нему. Как видно из рисунка 3.15 модель успешно распознала дефект «отсутствие болта» (классы hole_square и kb_defect_2) у крепления типа КБ.

Помимо построения графиков mAP и mAR выполнено вычисление наибольшего значения точности по каждому из классов датасета OBJ по метрике F1.

Также выявлено, при какой достоверности достигается это значение. Метрика F1 вычисляется следующим образом.

$$F1 = \frac{2 * precision * recall}{precision + recall}, \quad (3.4)$$

где $F1$ – значение метрики F1;

$precision$ – значение precision при заданных достоверности классификатора и IoU областей;

$recall$ – значение recall при заданных достоверности классификатора и IoU областей.

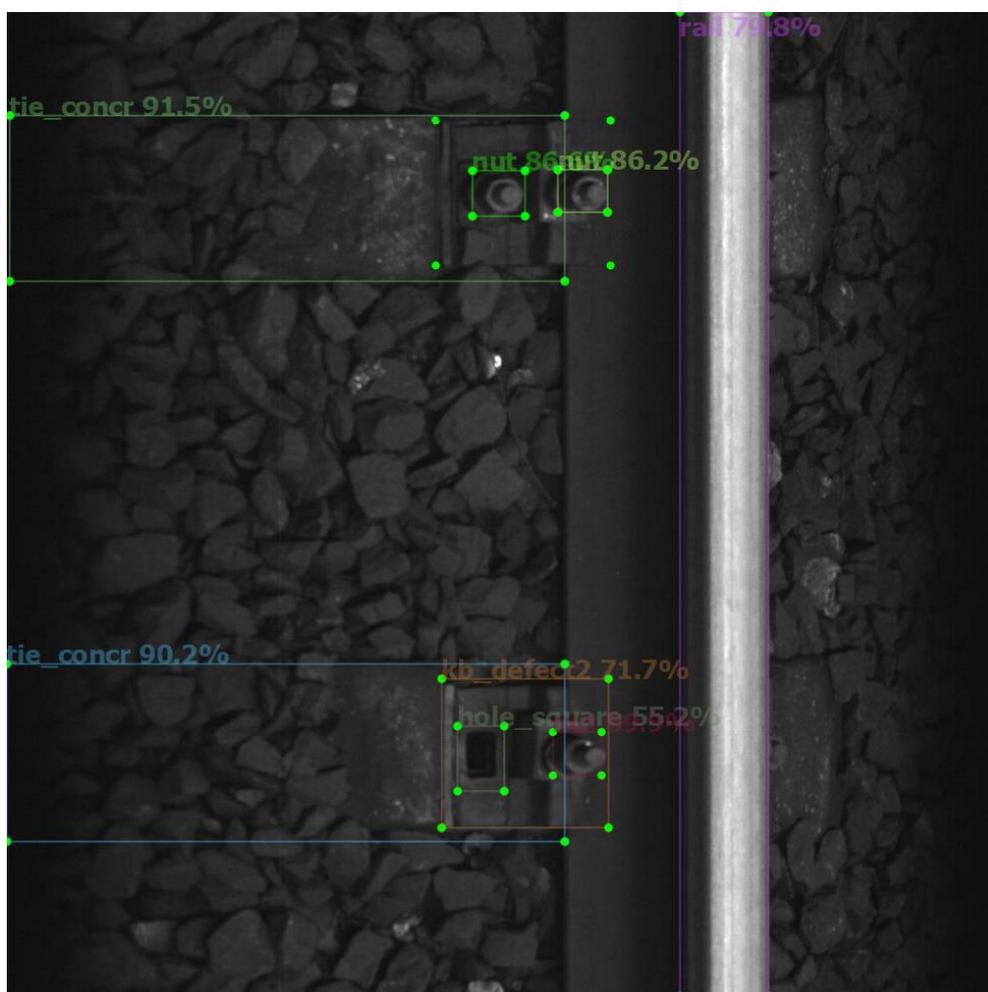


Рисунок 3.17 – Пример кадра, размеченного моделью OBJ

В таблице ПВ.1 представлены значения метрики F1 для всех классов модели OBJ с указанием достоверностей, при которых они достигаются. Показатели

вычислены для валидационной выборки. Полученные результаты показывают основные особенности работы модели:

- зависимость качества обнаружения объектов класса от числа областей в датасете;
- зависимость качества обнаружения объектов класса от размеров областей класса;
- зависимость качества обнаружения объектов класса от наличия визуальных признаков их отличимости от фона и других классов.

3.3.3 Обучение дополнительной модели JLV

Перед обучением детектора JLV также осуществляется настройка параметров тренировки путём изменения файла конфигурации SSD модели. Задаются следующие опции.

1. Число классов – 20.
2. Размер входа сети 300x300.
3. Фокальная функция потерь для оценки правильности классификации объектов.
4. Функция потерь Хьюбера для оценки правильности локализации объектов.
5. Размер батча – 64.
6. Число эпох – 200000.
7. Методы расширения данных (Data augmentation) — `ssd_random_crop`.
8. Оптимизатор — Адам.
9. Принцип изменения скорости обучения (learning rate) — циклически уменьшающийся. Начальное значение данного параметра для модели JLV составляет 0,001. Затем оно уменьшается в 2 раза на шагах обучения 5000, 10000, 50000 и 100000.

Помимо описанных параметров в настройках обучения задаются пути к файлу с предварительно обученной моделью SSD (checkpoint), к файлам с выборками в формате record, к файлу с описанием классов с расширением ptxt.

На рисунке 3.18 приводятся полученные в Tensorboard в результате обучения модели JLV графики зависимостей различных вариаций mAP от номера эпохи.

Первый график показывает значение mAP, полученное при варьировании IoU от 0,5 до 0,95. Для модели JLV на в момент завершения обучения оно равно 0,41. Полученное значение является небольшим, поскольку датасет содержит большое количество классов с небольшим на данный момент числом объектов, которые распознаются плохо.

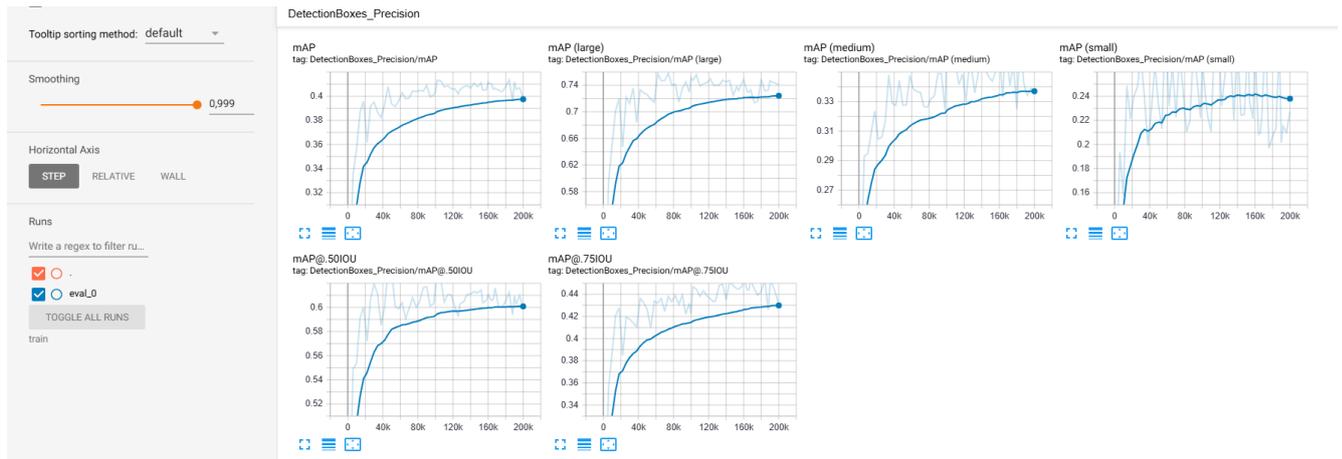


Рисунок 3.18 – Значения mAP, полученные в результате обучения детектора JLV

В результате обучения для модели JLV полученные значения для метрик mAP large, mAP medium и mAP small составили соответственно 0,74, 0,34 и 0,23. Они значительно выше, чем для детектора OBJ, так как датасет содержит намного меньше классов и маленьких областей. Небольшое значение mAP medium и mAP small также объясняется малым числом объектов классов с дефектами поверхности катания. Величины метрик $mAP_{IoU=0,5}$ и $mAP_{IoU=0,75}$ на эпохе 200000 составили 0,61 и 0,45. Полученные метрики являются хорошими для модели, содержащей большое число классов разных размеров.

На рисунке 3.19 приводятся полученные в результате обучения модели JLV зависимости по метрике mAR. Для mAR_1 , mAR_{10} и mAR_{100} получены значения 0,47, 0,53 и 0,53. Примерное совпадение последних двух значений объясняется тем, что в кадре датасета JLV обычно имеется около 10 объектов (рисунок 3.11). Для показателей mAR в распределении по размерам областей получены величины 0,82,

0,47 и 0,42 соответственно для маленьких, средних и больших рамок. Довольно высокие значения этих метрик говорят о том, что модель способна хорошо выявлять объекты разных классов – как крупные, так и мелкие.

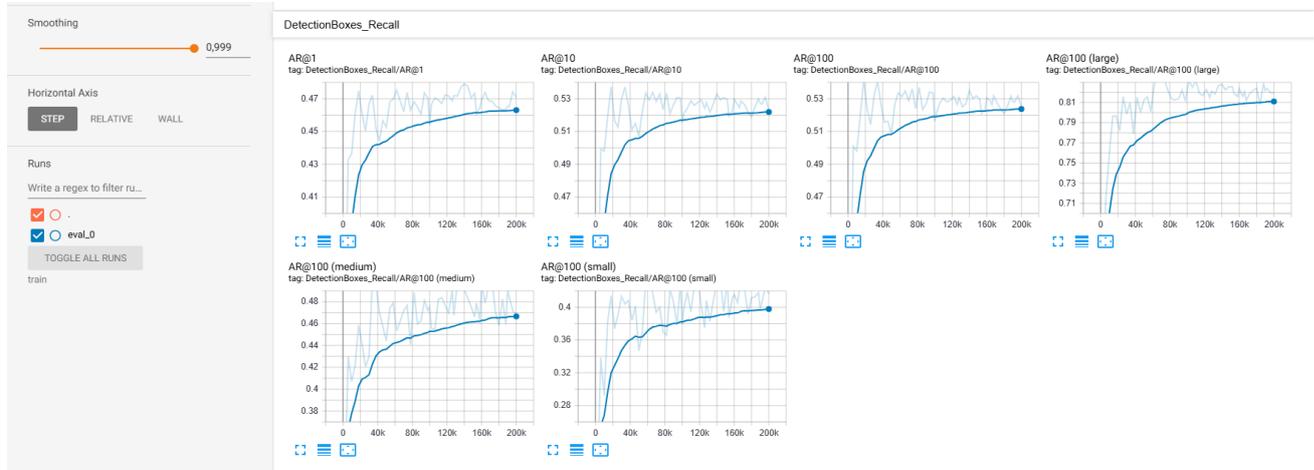


Рисунок 3.19 – Значения mAR, полученные в результате обучения детектора JLV

На рисунке 3.20 приводятся полученные для модели JLV графики отдельных функций потерь и общей функции потерь. Значения первых трёх компонент на момент завершения обучения составили 0,1, 0,03 и 0,02 соответственно. Общее значение функции потерь равно 0,15. Полученное значение ошибки говорит о хорошем качестве работы модели на валидационной выборке.

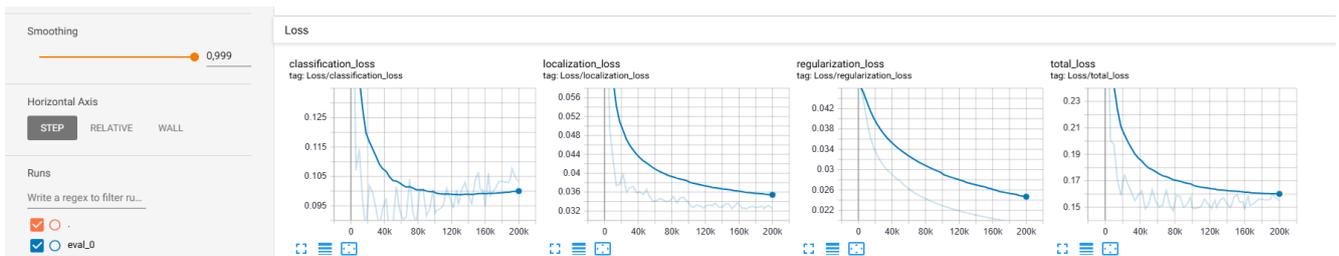


Рисунок 3.20 – Значения функций потерь, полученные в результате обучения детектора JLV

На рисунке 3.21 приводится пример распознавания объектов на изображении обученной моделью JLV. Для каждой области указывается определённый класс и достоверность принадлежности к нему. Как видно из рисунка 3.19 модель успешно распознала дефект «оторванный с одного конца рельсовый соединитель» (класс `conn_cut`) у приварного рельсового соединителя.

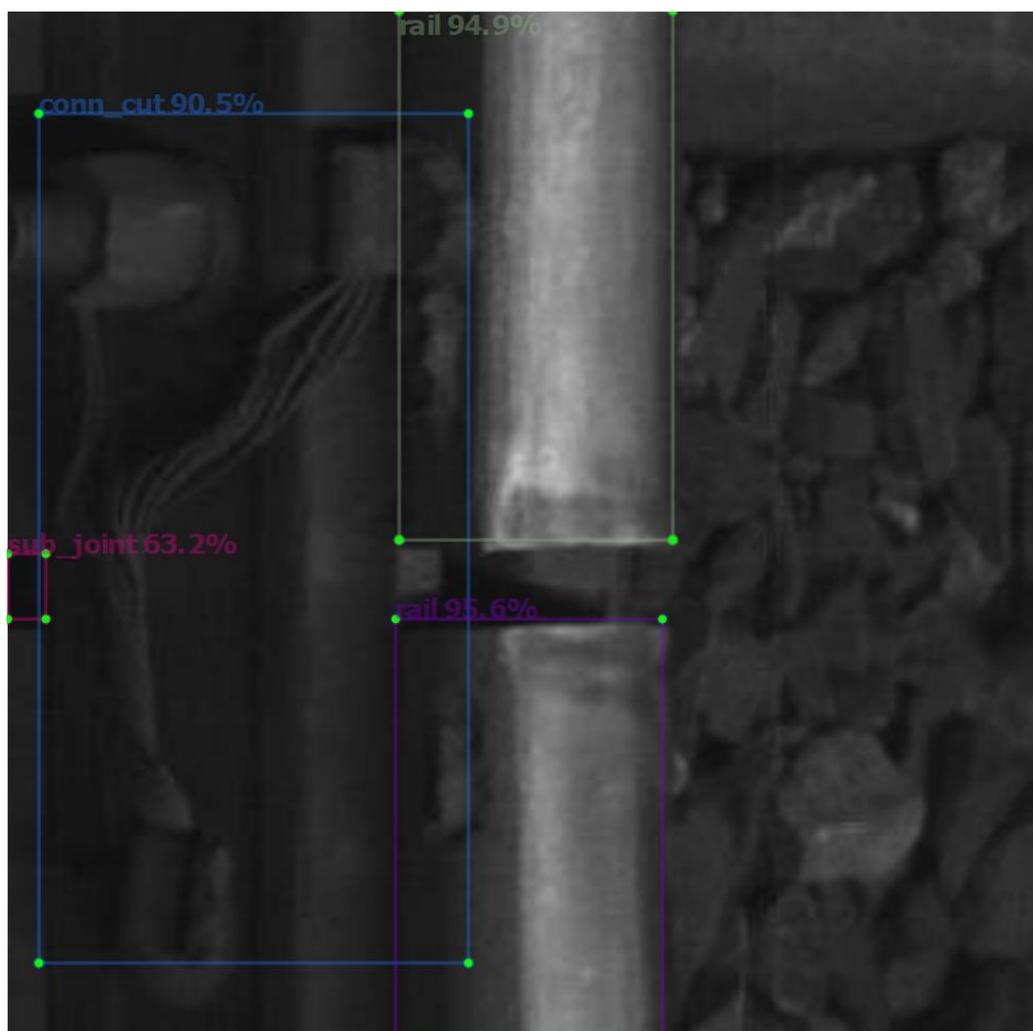


Рисунок 3.21 – Пример кадра, размеченного моделью JLV

В таблице ПВ.2 представлены значения меры F1 для всех классов модели JLV с указанием достоверностей, при которых они достигаются. Показатели вычислены для валидационной выборки.

Помимо метрики F1 для кадров валидационной выборки набора данных JLV выполнено построение матрицы ошибок (confusion matrix). Она позволяет чётко увидеть число объектов, верно распознанных по каждому классу. Также данная матрица показывает количество ошибок первого и второго рода и метки, с которыми была спутана прямоугольная рамка [129]. На рисунке 3.22 представлена полученная для модели JLV матрица ошибок. Строки в ней соответствуют реальным классам в наборе данных, а столбцы – предсказанным моделью. Для наглядности выполнен вывод главной диагонали матрицы ошибок более яркими

цветами. Она сформирована по скрипту, написанному автором. Область считается распознанной, если IoU между реальной и предсказанной рамками составляет не менее 0,5 и их класс совпадает. Вычисления производятся для достоверностей объектов, при которых, согласно таблице ПВ.2, достигается максимальное значение меры F1. Текст программы для построения матрица ошибок представлен в Приложении Г.

Confusion matrix of JLV for validation data

| | background | -10_1 | -10_2 | -14 | -17_1 | -17_1_vics | -17_2 | -18_1 | -18_2 | -20_1 | -20_2 | broken_spike | conn_cut | conn_missing | conn_no_rope | conn_normal | isolation | rail | rail_weld | sub_joint | weld |
|--------------|------------|-------|-------|-----|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|----------|--------------|--------------|-------------|-----------|------|-----------|-----------|------|
| background | 0 | 1 | 2 | 18 | 72 | 0 | 4 | 5 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 7 | 1 | 0 | 4 | 0 | 1 | 31 | 0 |
| -10_1 | 2 | 1 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -10_2 | 1 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -14 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -17_1 | 52 | 0 | 0 | 1 | 46 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -17_1_vics | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -17_2 | 2 | 0 | 3 | 2 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -18_1 | 14 | 0 | 0 | 16 | 1 | 0 | 0 | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -18_2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -20_1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -20_2 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| broken_spike | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 | 0 | 0 | 0 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| conn_cut | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 82 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| conn_missing | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 93 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| conn_no_rope | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| conn_normal | 3 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 5 | 0 | 0 | 90 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| isolation | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 87 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| rail | 1 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1025 | 0 | 0 | 0 |
| rail_weld | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 99 | 0 | 0 |
| sub_joint | 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 230 | 0 |
| weld | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 99 |

Рисунок 3.22 – Матрица ошибок, полученная в результате обработки моделью JLV валидационной выборки

Как видно из полученных значений меры F1 и матрицы ошибок модель JLV хорошо научилась распознавать различные виды рельсовых стыков и соединителей, ошибки случаются редко. Довольно редко случаются ситуации, когда детектор выявляет дефектные классы broken_spike и conn_cut как conn_normal или наоборот. Это хороший результат, поскольку данные типы рельсовых соединителей визуально очень похожи. Иногда случаются пропуски класса sub_joint поскольку он довольно маленький. Некоторое число ошибок с

классами из левого верхнего угла матрицы связано с малым числом дефектов поверхности катания рельса в датасете JLV (10_1, 10_2, 14, 17_1_vics, 18_2, 20_1) или маленьким размером их областей (17_1). Отдельно можно отметить ошибку предсказания метки 18_1 как 14 из-за визуального сходства. Особо заметно появление большого числа как ложных детекций, так и пропусков для класса 17_1, объекты которого имеются в датасете JLV в достаточном количестве. Проблема вызвана разнообразием размеров и вида (цвета) областей этого класса.

Детектор JLV позволил усовершенствовать модель классификации состояний рельсовых стыков, представленную в работах [68-71]. Новая модель способна не просто определять типы стыков, но и выявлять связанные с ними компоненты, которые расположены вокруг. Детектор JLV способен определить дефекты рельсовых соединителей и поверхности катания рельса в стыке и чётко определить их местоположение.

3.3.4 Обучение дополнительной модели BLT

Перед обучением детектора BLT также осуществляется настройка параметров тренировки путём изменения файла конфигурации SSD модели. Задаются следующие опции.

1. Число классов – 11.
2. Размер входа сети 200x1200.
3. Фокальная функция потерь для оценки правильности классификации объектов.
4. Функция потерь Хьюбера для оценки правильности локализации объектов.
5. Размер батча – 64.
6. Число эпох – 100000.
7. Методы расширения данных (Data augmentation) — `random_vertical_flip`, `random_adjust_contrast` и `random_absolute_pad_image`. Вторым методом позволяет случайным образом изменять контрастность пикселей каждого изображения обучающей выборки. Определяются максимальный и минимальный множители модификации описываемого параметра. Полученный их этого диапазона

коэффициент изменения контрастности применяется ко всем пикселям изображения. Для каждого кадра выбирается свой, новый множитель [120]. При обучении модели BLT в опции `random_adjust_contrast` использовано минимальное значение 0,85 от исходной контрастности пикселей кадра, а максимальное – 1,12. Опция `random_absolute_pad_image` позволяет сдвинуть пиксели изображения, поставив на их место нули (чёрные пиксели) с любой стороны кадра. Операция производится с целью формирования ситуации со смещением рельсовой накладки от центра кадра. При обучении модели BLT используется максимальное смещение по горизонтали в 20 пикселей и по вертикали в 10 пикселей. Операция применяется отдельно к каждому кадру обучающей выборки со своими значениями сдвижки [120].

8. Оптимизатор — Адам.

9. Принцип изменения скорости обучения (`learning rate`) — циклически уменьшающийся. Начальное значение данного параметра для модели JLV составляет 0,00003. Затем оно уменьшается в 2 раза на шагах обучения 5000, 10000 и 50000.

Описанные подходы по расширению данных и изменению скорости обучения применяются в связи со схожестью изображений с рельсовыми накладками и объектами на них в датасете BLT. Изменения контрастности пикселей и сдвижки позволяют создать реальные ситуации расположения областей и защитить модель от переобучения. Очень низкая скорость обучения выбрана в связи с визуальным сходством объектов датасета BLT. Аугментация `ssd_random_crop` не используется, поскольку области в наборе данных всегда имеют одинаковые размеры и не могут обрезаться краями кадра.

Помимо описанных параметров в настройках обучения задаются пути к файлу с предварительно обученной моделью SSD (`checkpoint`), к файлам с выборками в формате `record`, к файлу с описанием классов с расширением `rbtxt`.

На рисунке 3.23 приводятся полученные в Tensorboard в результате обучения модели JLV графики зависимостей различных вариаций mAP от номера эпохи. Первый график показывает значение mAP, полученное при варьировании IoU от

0,5 до 0,95. Для модели BLT на в момент завершения обучения оно равно 0,5. Полученное значение является хорошим для данной метрики.

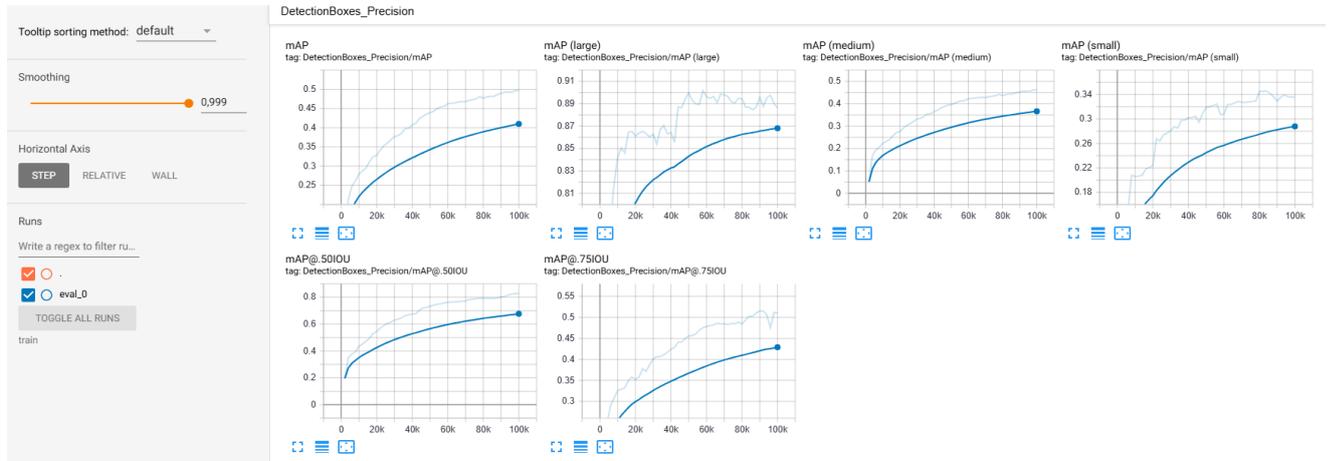


Рисунок 3.23 – Значения mAP, полученные в результате обучения детектора BLT

В результате обучения для модели BLT полученные значения для метрик mAP large, mAP medium и mAP small составили соответственно 0,89, 0,46 и 0,34. Они выше, чем для детекторов OBJ и JLV, так как датасет содержит меньше классов и меньше классов с малым число объектов. Величины метрик $mAP_{IoU=0,5}$ и $mAP_{IoU=0,75}$ на эпохе 100000 составили 0,83 и 0,51. Полученные метрики являются очень хорошими и позволяют достаточно точно распознавать рельсовые накладки и болтовые отверстия.

На рисунке 3.24 приводятся полученные в результате обучения модели BLT зависимости по метрике mAR. Для mAR_1 , mAR_{10} и mAR_{100} получены значения 0,45, 0,64 и 0,64. Примерное совпадение последних двух значений объясняется тем, что в кадре датасета BLT обычно имеется чуть менее 10 объектов (рисунок 3.12). Для показателей mAR в распределении по размерам областей получены величины 0,92, 0,63 и 0,37 соответственно для маленьких, средних и больших рамок. Довольно высокие значения этих метрик говорят о том, что модель способна достаточно хорошо выявлять как крупные накладки разной длины, так и мелкие болтовые отверстия.

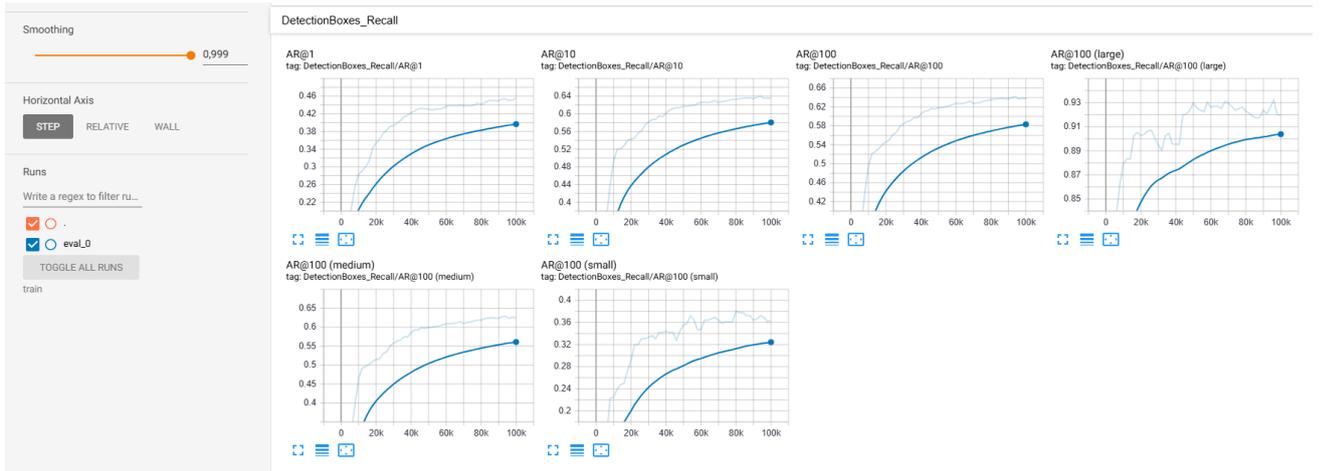


Рисунок 3.24 – Значения mAR, полученные в результате обучения детектора BLT

На рисунке 3.25 приводятся полученные для модели BLT графики отдельных функций потерь и общей функции потерь. Значения первых трёх компонент на момент завершения обучения составили 0,17, 0,08 и 0,03 соответственно. Общее значение функции потерь равно 0,28. Полученное значение ошибки говорит о хорошем качестве работы модели на валидационной выборке. Небольшие неточности классификации допускаются при распознавании визуально схожих классов (bolt и hole), а небольшие неточности в локализации – из-за небольших размеров рамок болтовых отверстий.

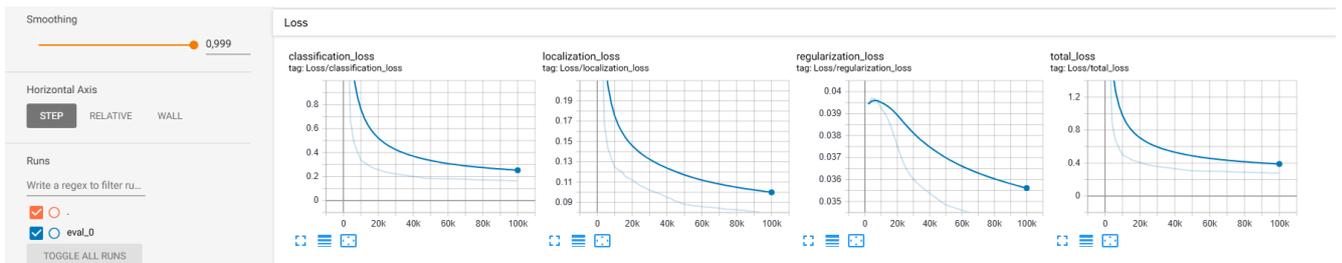


Рисунок 3.25 – Значения функций потерь, полученные в результате обучения детектора BLT

На рисунке 3.26 приводится пример распознавания объектов на изображении обученной моделью BLT. Для каждой области указывается определённый класс и достоверность принадлежности к нему. Как видно из рисунка 3.26 модель успешно распознала два дефекта «дырка в рельсовой накладке» (класс hole) у приведённой рельсовой накладки.

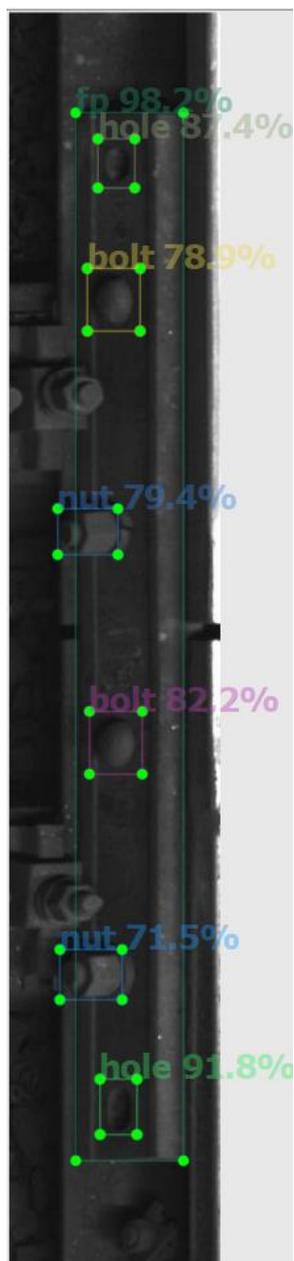


Рисунок 3.26 – Пример кадра, размеченного моделью BLT

В таблице ПВ.3 представлены значения меры F1 для всех классов модели BLT с указанием достоверностей, при которых они достигаются. Показатели вычислены для валидационной выборки.

Помимо вычислен точности F1 для кадров валидационной выборки набора данных BLT выполнено построение матрицы ошибок (рисунок 3.27). Как видно из полученных значений меры F1 и матрицы ошибок модель BLT хорошо научилась распознавать все виды рельсовых накладок и болтовых отверстий.

Confusion matrix of BLT for validation data

| | background | bolt | bolt_crack | bolt_stick_out | check_crack | crack | fp | half_crack | hole | nut | two_nut | unscrewed_nut |
|----------------|------------|------|------------|----------------|-------------|-------|-----|------------|------|-----|---------|---------------|
| background | 0 | 2 | 0 | 6 | 0 | 5 | 25 | 3 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| bolt | 3 | 330 | 4 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| bolt_crack | 1 | 11 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| bolt_stick_out | 9 | 0 | 0 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| check_crack | 6 | 0 | 0 | 0 | 14 | 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| crack | 5 | 0 | 0 | 0 | 6 | 25 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| fp | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 287 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| half_crack | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| hole | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 123 | 0 | 0 | 0 |
| nut | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 333 | 2 | 26 |
| two_nut | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 5 | 0 |
| unscrewed_nut | 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 | 31 |

Рисунок 3.27 – Матрица ошибок, полученная в результате обработки моделью BLT валидационной выборки

Детектор BLT достаточно редко совершает ошибки первого и второго рода, что связано с небольшим числом классов и их хорошей визуальной различимостью. Большая часть проблем связана с соотношением числа дефектных объектов с недефектными в наборе данных. Мелкие ошибки прослеживаются при распознавании классов `bolt_crack` и `bolt_stick_out` – они выявляются на месте класса `bolt`, так как похожи друг на друга, а первые два класса представлены в датасете в малом количестве. Метки дефектов `unscrewed_nut` и `two_nut` иногда выявляются как `nut`, поскольку обладают сильным сходством с последним. Также объекты данных классов содержатся в наборе данных в небольшом количестве.

После совместного распознавания элементов ВСП нейросетевыми моделями OBJ, BLT и JLV осуществляется обработка полученных прямоугольных областей и выявление отступлений. При обнаружении дефектов рельсового пути выполняется определение основных параметров неисправностей: степени, сроков

устранения, приоритета, размеров, местоположения на железной дороге и других в соответствии с документом [84]. Выявленные отступления и их характеристики передаются в систему РЖД ЕК АСУИ (Единая корпоративная автоматизированная система управления инфраструктурой).

Анализ дефектов и их основных параметров осуществляется при помощи разработанной автором программы. В Приложении Е приводится свидетельство о регистрации данной программы в государственном реестре.

3.4 Выводы по третьей главе

1. Определён способ контроля состояний элементов верхнего строения пути. Диагностический комплекс инфраструктуры осуществляет проезд по участку рельсового пути и выполняет съёмку компонентов ВСП при помощи линейных камер. Сформированные изображения обрабатываются тремя моделями нейронных сетей в реальном времени или сохраняются в специальные файлы для последующее анализа.

2. Сформированы наборы данных для обучения трёх моделей нейросетевых детекторов. Датасеты включают в себя изображения ВСП и xml-файлы, в которых содержится информация о присутствующих в кадре объектах и их классах. Выделение областей произведено в программе Labelmg. Выполнена коррекция классов и размеров неправильно размеченных объектов, очистка датасетов от лишних данных.

3. Произведено обучения трёх детекторов: основной модели OVI для распознавания всех объектов ВСП и дополнительных моделей JLV и BLT для более точного распознавания объектов в рельсовых стыках и на рельсовых накладках соответственно. После тренировки нейронных сетей выполнена оценка качества их работы на главных метриках задач обнаружения прямоугольных областей: mAP, mAR, F1. Выполнено построение матрицы ошибок для каждой из моделей, полученной по результатам работы детектора на кадрах валидационной выборки. Все нейросети показали хорошие результаты при оценке качества распознавания объектов.

4 ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПУТЕВЫХ БРИГАД НА УСТРАНЕНИЕ ДЕФЕКТОВ НА ЛИНЕЙНОМ УЧАСТКЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

4.1 Модель обслуживающей инфраструктуры линейного участка железной дороги

В соответствии с проведённой в главе 1 формализацией процесса технического обслуживания рельсового пути и построенной онтологий предметной области в главе 2 формулируется базовая задача назначений рабочих бригад. Для постановки оптимизационной задачи выполнен ряд упрощений. Это позволяет сократить набор переменных и условий по сравнению с обозначенной ранее формализацией. Осуществление упрощений даёт возможность уменьшить размерность оптимизационной задачи и гарантировать её разрешимость. Основы рассматриваемой постановки были представлены в работах [76, 77].

Для постановки задачи назначений рабочих бригад сделаны следующие предположения.

1. Рассматривается один линейный участок LP с множеством рабочих отделений $WD = \{wd_j\}, j = \overline{1, J}$. Рабочие отделения располагаются на железнодорожных станциях. Каждое рабочее отделение wd_j имеет координату ρ_j - расстояние от начала линейного участка до j -ого отделения.

2. Линейный участок содержит множество $Section$ перегонов между железнодорожными станциями. При этом $Section = \{S_k\}, k = \overline{1, J+1}$, и границы перегона S_k имеют координаты ρ_{k-1}^S и ρ_k^S .

3. На линейном участке функционируют неотложные бригады $WB = \{wb_n\}, n = \overline{1, N}$. На каждом рабочем отделении находятся две неотложные бригады wb_n и wb_{n+1} . Соответственно, координаты их базирования определяются как:

$$\rho_n^{wb} = \rho_{n+1}^{wb} = \rho_j; n = 2j - 1; \exists j: (wb_n \rightarrow wd_j) \wedge (wb_{n+1} \rightarrow wd_j) \quad (4.1)$$

4. На линейном участке также работают укрупненные бригады $WU = \{wu_p\}, p = \overline{1, P}$, располагающиеся на соответствующих рабочих отделениях с координатами базирования:

$$\rho_p^{wu} = \rho_j, \exists j: wu_p \rightarrow wd_j \quad (4.2)$$

5. В результате прохода вагона-лаборатории по линейному участку с помощью искусственной нейронной сети обнаружено и классифицировано множество дефектов $D = \{d_r\}, r = \overline{1, R}$, нумерация которых упорядочивается по координатам от начала линейного участка $LP: \rho_{r-1}^d \leq \rho_r^d \leq \rho_{r+1}^d$.

6. Множество дефектов состоит из трех подмножеств: $D = D^2 \cup D^3 \cup D^4$, включающих соответственно:

а) Дефекты II степени, на которые назначаются только укрупненные бригады wu_p .

б) Дефекты III степени, устраняемые неотложной wb_n или укрупненной wu_p бригадой

в) Дефекты IV степени, устраняемые только неотложной бригадой wb_n .

Обозначим подмножества упорядоченных номеров дефектов на линейном участке следующим образом: I_2 – номера дефектов II степени, I_3 – номера дефектов III степени и I_4 – номера дефектов IV степени. Тогда

$$|I_2| + |I_3| + |I_4| = R \quad (4.3)$$

Для обеспечения обслуживания всех дефектов должны выполняться следующие условия:

$$|D^3| + |D^4| \leq N \quad (4.4)$$

$$|D^2| \leq P \quad (4.5)$$

7. Дефект d_r находится только на одном перегоне S_k :

$$\exists! k \in \{1, \dots, J + 1\}: \rho_{k-1}^S \leq \rho_r^d < \rho_k^S \quad (4.6)$$

8. Для устранения дефекта d_r выделяется только одно технологическое окно длительностью T_r^O , в течение действия которого движение на перегоне S_k с дефектом запрещено.

Описанная модель линейного участка железной дороги графически представлена на рисунке 4.1.

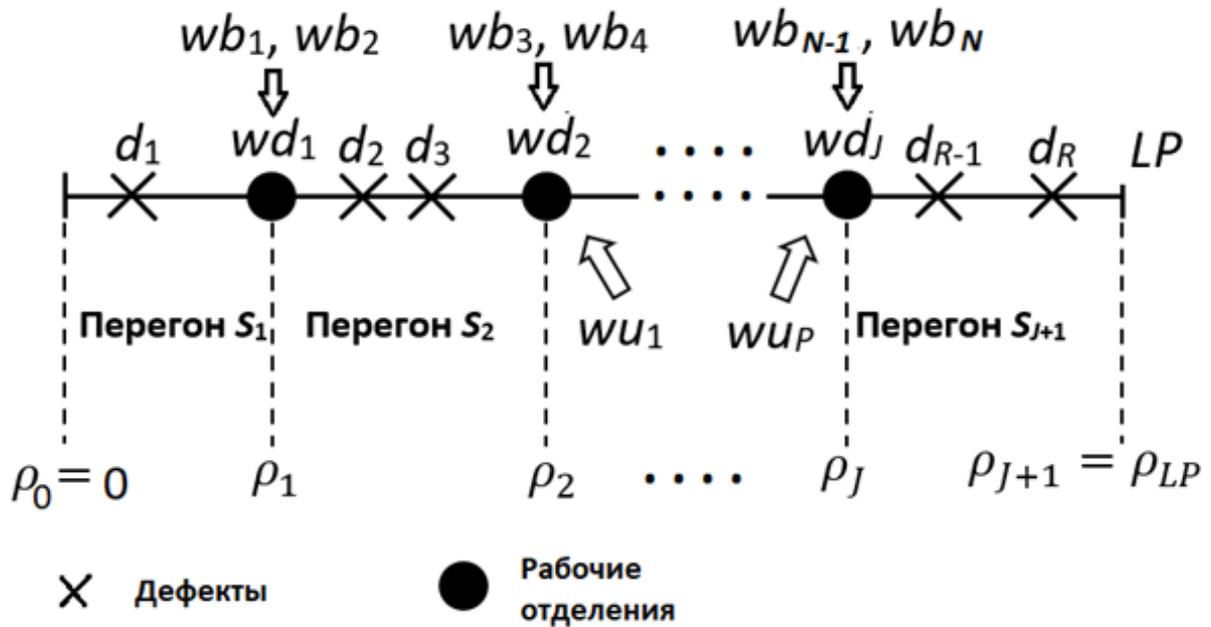


Рисунок 4.1 – Модель обслуживания линейного участка железной дороги

4.2 Постановка задачи оптимального назначения рабочих бригад на устранение дефектов

В соответствии с разработанной моделью обслуживания линейного участка рельсового пути (рисунок 4.1) определяется булева переменная задачи целочисленного программирования, определяющая принцип назначений:

а) для случая для $r \in I_3 \cup I_4; n = \overline{1, N}$

$$x_{rn} = \begin{cases} 1, & \text{если для устранения дефекта } d_r \\ & \text{назначена неотложная бригада } wb_n; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4.7)$$

б) для случая $r \in I_2 \cup I_3; n = \overline{N+1, N+P}$

$$x_{rn} = \begin{cases} 1, & \text{если для устранения дефекта } d_r \\ & \text{назначена укрупнённая бригада } wu_n; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4.8)$$

При формулировании задачи оптимальных назначений в качестве целевой функции выбрано минимальное время устранения всех R дефектов на линейном участке LP :

$$T^D = \min \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^{N+P} t_{rn}^W x_{rn}, \quad (4.9)$$

где t_{rn}^W - время, которое затратит бригада n на ремонт дефекта d_r .

Значение переменной t_{rn}^W зависит от степени отступления и типа рабочей бригады:

- для дефектов IV степени

$$t_{rn}^W = t_{rn}^{wb} + t_r, \quad (4.10)$$

где t_{rn}^{wb} – время прибытия неотложной бригады к месту дефекта, t_r – время выполнения работ по устранению дефекта; $r \in I_4$;

- для дефектов III степени

$$t_{rn}^W = \min\{t_{rn}^{wb}, t_{rn}^{wu}\} + t_r, \quad (4.11)$$

где t_{rn}^{wu} – суммарное время прибытия бригады wu_p и убытия ее до границы перегона с дефектом III степени; $r \in I_3$;

- для дефектов II степени:

$$t_{rn}^W = t_{rn}^{wu} + t_r, \quad (4.12)$$

где t_{rn}^{wu} – суммарное время прибытия бригады wu_p и убытия ее до границы перегона с дефектом II степени; $r \in I_2$.

Для разрешимости и конечности оптимизационной задачи на систему ТО рельсового пути наложены следующие ограничения.

1. Для устранения каждого дефекта d_r III или IV степени на пути назначается только одна неотложная бригада wb_n :

$$\sum_{n=1}^N x_{rn} = 1, r \in I_3 \cup I_4 \quad (4.13)$$

2. Ни одна неотложная бригада wb_n не участвует в ремонте ни одного дефекта II степени:

$$\sum_{n=1}^N x_{rn} = 0, r \in I_2 \quad (4.14)$$

3. Каждая неотложная бригада wb_n либо назначается на работу только с одним дефектом III или IV степени, либо не участвует в работах, если таких дефектов меньше числа бригад:

$$\sum_{r \in I_3 \cup I_4} x_{rn} \leq 1, n = \overline{1, N} \quad (4.15)$$

4. На дефекты II степени не назначается ни одной неотложной бригады:

$$\sum_{r \in I_2} x_{rn} = 0, n = \overline{1, N} \quad (4.16)$$

5. Для устранения каждого дефекта d_r II или III степени на пути назначается только одна укрупненная бригада wu_n :

$$\sum_{n=N+1}^{N+P} x_{rn} = 1, r \in I_2 \cup I_3 \quad (4.17)$$

6. Ни одна укрупненная бригада wu_n не участвует в ремонте ни одного дефекта IV степени:

$$\sum_{n=N+1}^{N+P} x_{rn} = 0, r \in I_4 \quad (4.18)$$

7. Каждая укрупненная бригада wu_n либо назначается на работу с только одним дефектом II или III степени, либо не участвует в работах, если таких дефектов меньше числа бригад:

$$\sum_{r \in I_2 \cup I_3} x_{rn} \leq 1, n = \overline{N+1, N+P} \quad (4.19)$$

8. На дефекты IV степени не назначается ни одной укрупненной бригады:

$$\sum_{r \in I_4} x_{rn} = 0, n = \overline{N+1, N+P} \quad (4.20)$$

9. Длительность технологического окна должна быть не менее суммарного времени на перемещение бригад t_{rn}^W к месту дефекта и времени t_r устранения дефекта:

$$(t_{rn}^W + t_r)x_{rn} \leq T_r^0, r = \overline{1, R}, n = \overline{1, N+P} \quad (4.21)$$

В зависимости от типа бригады время перемещения t_{rn}^W может быть определено следующим образом.

➤ Для дефекта IV степени $d_r, r \in I_4, n = \overline{1, N}$, время передвижения бригады wb_n по автомобильной дороге вдоль железнодорожного пути равно

$$t_{rn}^W = t_{rn}^{wb} = (|\rho_r^d - \rho_n^{wb}|) / v_n, \quad (4.22)$$

где v_n – скорость движения бригады.

➤ Для дефекта II степени $d_r, r \in I_2, n = \overline{N+1, N+P}$, время прибытия бригады wu_n и убытия ее по перегону с дефектом при передвижении по железнодорожному пути равно

$$t_{rn}^W = t_{rn}^{wu} = \left(\frac{|\rho_r^d - \rho_n^{wu}| + |\rho_r^d - \rho_r^S|}{v_n} \right), \quad (4.23)$$

где ρ_r^S – координата ближайшей границы перегона с дефектом.

➤ Для дефекта III степени $d_r, r \in I_3, n = \overline{1, N+P}$, время $t_{rn}^W = \min\{t_{rn}^{wb}, t_{rn}^{wu}\}$ равно минимуму от времени t_{rn}^{wu} прибытия бригады wu_n и убытия ее по перегону с дефектом и времени t_{rn}^{wb} перемещения к дефекту неотложной бригады wb_n .

10. Вводится ограничение на суммарную стоимость поведения работ:

$$\sum_{n=1}^{N+P} C_{rn} x_{rn} \leq C_r^g, r = \overline{1, R}, \quad (4.24)$$

где C_m – затраты бригады номер n на устранение дефекта d_r , C_r^g – допустимое значение затрат на дефект d_r .

4.3 Пример решения задачи оптимального назначения ремонтов пути

Для демонстрации процесса поиска оптимальных решений использован линейный участок длиной 50 км с четырьмя станциями и перегонами. Каждое рабочее отделение содержит по 2 неотложные бригады, а укрупнённые бригады расположены в отделениях с номерами 2 и 4.

В таблице 4.1 приводится описание классов дефектов, выявленных на перегонах рассматриваемого в примере линейного участка. Она включает в себя название неисправности и её степень.

Таблица 4.1 — Описание классов выявленных дефектов

| Номер m класса дефекта | Степень дефекта d_r | Название дефекта |
|--------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| 1 | II | Нарушение эюры шпал |
| 2 | III | Трещина в железобетонной шпале |
| 3 | III | Смятие на поверхности катания рельса |
| 4 | IV | Отсутствие рельсового скрепления |
| 5 | IV | Излом рельса |

Исходные данные по выявленным дефектам представлены в таблице 4.2. Для каждой неисправности указываются класс и степень, координата обнаружения, требуемое на устранение время и допустимая стоимость работ ремонтных работ.

Таблица 4.2 — Исходные данные по выявленным дефектам в рассматриваемом примере

| Номер r дефекта d_r | Номер m класса дефекта | Степень дефекта d_r | Координаты: ρ_r^d , дефекта ρ_{k-1}^s, ρ_k^s — границ перегона с дефектом, км | Время t_r устранения дефекта, час | Технолог. окно T_r^o , час | Допустимая стоимость C_r^g работ по дефекту класса m , тыс. руб. |
|-------------------------|--------------------------|-----------------------|--|-------------------------------------|------------------------------|--|
| 1 | 4 | IV | 3; [0, 4] | 0,55 | 1 | 5 |
| 2 | 1 | II | 6; [4, 16] | 3 | 4 | 30 |
| 3 | 3 | III | 15; [4, 16] | 1,5 | 2 | 12 |
| 4 | 2 | III | 19; [16, 27] | 2 | 3 | 10 |
| 5 | 5 | IV | 29; [27, 41] | 4 | 6 | 400 |
| 6 | 3 | III | 31; [27, 41] | 1,5 | 3 | 12 |
| 7 | 4 | IV | 42; [41, 50] | 0,55 | 2 | 5 |
| 8 | 2 | III | 48; [41, 50] | 2 | 3 | 10 |

Таблица 4.3 содержит информацию по рабочим бригадам. Для каждой из таких бригад задаются относительная координата на линейном участке, номер отделения, тип (неотложная или укрупнённая) и скорость передвижения, а также стоимость работ по устранению дефектов каждого из классов.

Таблица 4.3 — Исходные данные по неотложным и укрупненным бригадам в рассматриваемом примере

| Номер n бригады | Номер рабочего отделения | Тип бригады | Координата ρ_n базирования бригады, км | Средняя скорость v_n передвижения бригады, км/час | Стоимость работ по устранению дефекта класса t , тыс. руб. | | | | |
|-------------------|--------------------------|-------------|---|---|--|----|----|---|-----|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 1 | Неотл. | 4 | 35 | 20 | 12 | 12 | 4 | 300 |
| 2 | 1 | Неотл. | 4 | 40 | 40 | 11 | 10 | 6 | 350 |
| 3 | 2 | Неотл. | 16 | 50 | 24 | 9 | 14 | 3 | 400 |
| 4 | 2 | Неотл. | 16 | 30 | 30 | 11 | 15 | 4 | 500 |
| 5 | 3 | Неотл. | 27 | 26 | 36 | 8 | 9 | 8 | 450 |
| 6 | 3 | Неотл. | 27 | 24 | 24 | 15 | 10 | 2 | 600 |
| 7 | 4 | Неотл. | 41 | 42 | 30 | 10 | 8 | 7 | 500 |
| 8 | 4 | Неотл. | 41 | 54 | 20 | 7 | 14 | 2 | 500 |
| 9 | 2 | Укрупн. | 16 | 90 | 40 | 11 | 12 | 4 | 300 |
| 10 | 4 | Укрупн. | 41 | 100 | 30 | 9 | 11 | 6 | 350 |

Целевая функция минимизации времени работ (4.9) и связанные с ней ограничения (4.13 - 4.21) и (4.24) задаются при помощи программы для решения задач линейного целочисленного программирования LPSolve [130]. Запись выражений для поиска оптимальных назначений осуществляется в текстовом редакторе LPSolve IDE [131].

При использовании LPSolve для решения оптимизационной задачи каждому варианту назначения x_{rn} ставится в соответствие значение 0 или 1 в соответствии с формулами (4.7) и (4.8). Для записи выражений в программе осуществляется преобразование x_{rn} в одномерную переменную x_a :

$$x_{rn} \rightarrow x_a \quad (4.25)$$

Переход (4.25) осуществляется путём перебора всех возможных значений сначала переменной n , а затем переменной r . Каждому возможному назначению x_{rn} ставится в соответствие ровно одно x_a , которое также равно 0 или 1. Например, по формуле (4.25) комбинация первый дефект и четвёртая бригада (x_{14})

преобразуется в переменную x_4 , а комбинация третий дефект и восьмая бригада (x_{38}) – в переменную x_{28} .

При решении оптимизационной задачи формируется вектор X_{OPT} , содержащий в себе значения x_a , удовлетворяющие целевой функции минимизации времени работ (4.9) и заданным ограничениям (4.13 - 4.21) и (4.24). В таблице 4.4 представлена сформированная матрица назначений для рассматриваемого примера. Для полученного решения вектор X_{OPT} имеет вид ($x_1, x_{20}, x_{29}, x_{35}, x_{43}, x_{56}, x_{68}, x_{77}$). Время работ по устранению всех дефектов составило 16,498 часов.

Таблица 4.4 — Матрица оптимальных назначений

| Номер дефекта | Номер бригады | | | | | | | | | |
|---------------|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Анализ целевой функции (4.9) и ограничений (4.13 – 4.21) и (4.24) показал, что при использовании данной модели в СППР можно реализовать следующие операции.

1. Выбор необходимого числа неотложных и укрупнённых бригад в зависимости от ожидаемых на горизонте планирования степеней и классов дефектов на данном линейном участке пути.

2. Определение координат расположения укрупнённых бригад в зависимости от мест наиболее вероятного появления дефектов II степени.

3. Определение допустимых параметров рабочих бригад: скорости передвижения, стоимости работ по устранению дефекта, числа монтеров пути в

бригаде и т.п. для обеспечения ТОиР при различных наборах ожидаемых дефектов пути.

4. Определение допустимой разницы между требуемым для устранения неисправности временем и продолжительностью технологического окна.

5. Определение необходимого времени для достижения места выявления дефекта неотложными и укрупнёнными бригадами и времени отбытия после ремонта в отделение укрупнёнными бригадами.

1.6 Выводы по четвёртой главе

1. Построена модель линейного участка рельсового пути. Определены и приведены основные характеристики, необходимые для постановки оптимизационной задачи.

2. Выполнена постановка задачи назначений рабочих на ремонтные работы на линейном участке рельсового пути. Определена целевая функция для поиска оптимального решения. Она направлена на минимизацию времени работ по устранению выявленных дефектов. Обозначен перечень накладываемых при решении оптимизационной задачи ограничений. Их введение позволило чётко определить область определения переменных и сделать проблему разрешимой.

3. Получено оптимальное решение задачи назначений на примере линейного участка длиной 50 км. Для этого были заданы необходимые параметры по имеющимся рабочим бригадам и выявленным дефектам. По полученному решению сформированы матрица и вектор оптимальных назначений. Минимальное время ремонтных работ составило 16,498 часов.

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

5.1 Распознавание дефектов на участке Куйбышевской железной дороги с помощью установленной на ДКИ искусственной нейронной сети

С целью проверки качества работы основного детектора ОВJ и его производительности в реальных условиях выполнен прогон диагностического комплекса инфраструктуры по участку Самара-Кинель Куйбышевской железной дороги. Вагон выполнил съёмку верхнего строения пути и записал отснятые по каждой камере кадры в специальные файлы.

Скорость работы нейросети оценивалась при запуске модели на процессоре Intel Core i7. Стоит отметить, что запуск детектора осуществлялся не под версией библиотеки Tensorflow для CPU, а под специальной библиотекой OpenVINO производства компании Intel. Использование OpenVINO позволяет ускорить работу моделей нейронных сетей при запуске на процессорах Intel. Для возможности использования такого подхода осуществлена конвертация детектора из формата Tensorflow в формат OpenVINO. Быстродействие достигается за счёт упрощения и оптимизации архитектуры и существующих в сети связей без ущерба для качества работы модели [132]. В результате прогона ДКИ по рельсовому пути скорость работы детектора в формате OpenVINO составила примерно 2 мс на кадр. Это позволяет проводить анализ состояния элементов ВСП при движении вагона со скоростью до 190 км/ч. Полученные результаты исследования производительности являются очень хорошими. Они позволяют эффективно использовать выбранный метод анализа состояний элементов пути.

Проверка качества работы модели ОВJ осуществлена по изображениям, отснятым ДКИ. Для проведения оценки были подготовлены и размечены эталонные кадры. Использовались данные со всех четырёх камер, полученные при сплошной съёмке ВСП. Для анализа выбран фрагмент линейного участка длиной 8 км. Для удобства получения последовательных изображений кадры были извлечены из файлов со снимками пути. Они приведены к размерам 1000x1000 по

описанному в главе 3 принципу. После подготовки эталонной разметки кадры были пропущены через модель ОВJ.

В таблице 5.1 приводится информация о классах и количестве их областей, реально присутствующих в эталонных данных. Полученные результаты распознавания были сравнены с ожидаемыми по метрике F1 (таблица 5.2). Также для оценки качества работы детектора ОВJ выполнено построение матрицы ошибок (рисунок 5.1). При формировании результатов для улучшения читабельности этой матрицы выведена информация только по тем классам, которые реально присутствуют на эталонных кадрах.

Таблица 5.1 — Описание тестовой выборки для модели ОВJ

| Имя класса | Количество объектов в тестовой выборке |
|---------------------|---|
| 14_buks | 44 |
| bind_missing | 11 |
| bolt_unscrewed | 259 |
| concr_crack | 24 |
| concr_crossing | 12 |
| fp_end | 949 |
| frog | 10 |
| hole_square | 714 |
| joint | 466 |
| joint_dhr | 71 |
| kb | 44489 |
| kb_defect2 | 703 |
| kb_no_bracket | 591 |
| mlv_add | 142 |
| mlv_base | 142 |
| nut | 90643 |
| platform | 43 |
| plug_ropе | 411 |
| rail | 25166 |
| rail_switch | 27 |
| tie_concr | 48501 |
| tie_concr_break | 6 |
| tie_concr_destroyed | 160 |
| tongue_end | 9 |

Таблица 5.2 — Значения меры F1, полученные для классов модели ОВJ на тестовой выборке

| Имя класса | Точность F1 | Достоверность, при которой достигнута точность F1 |
|---------------------|-------------|---|
| 14_buks | 0,51 | 0,5 |
| bind_missing | 0,8 | 0,4 |
| bolt_unscrewed | 0,567 | 0,6 |
| concr_crack | 0,31 | 0,35 |
| concr_crossing | 0,76 | 0,65 |
| fp_end | 0,96 | 0,45 |
| frog | 1 | 0,5 |
| hole_square | 0,91 | 0,45 |
| joint | 0,88 | 0,4 |
| joint_dhr | 0,65 | 0,6 |
| kb | 0,99 | 0,5 |
| kb_defect2 | 0,94 | 0,55 |
| kb_no_bracket | 0,92 | 0,45 |
| mlv_add | 0,82 | 0,50 |
| mlv_base | 0,84 | 0,6 |
| nut | 0,99 | 0,4 |
| platform | 0,94 | 0,6 |
| plug_ropе | 0,83 | 0,5 |
| rail | 1 | 0,45 |
| rail_switch | 0,98 | 0,55 |
| tie_concr | 0,99 | 0,4 |
| tie_concr_break | 0,35 | 0,6 |
| tie_concr_destroyed | 0,63 | 0,55 |
| tongue_end | 0,89 | 0,5 |

В результате проведённого исследования можно отметить, что модель научилась очень качественно выявлять большую часть классов даже на данных, которые сеть ранее не видела. Полученные точности F1 имеют небольшие значения только для классов `concr_crack` и `tie_concr_break` (таблица 5.2). Первый из них является трудно детектируемым только при малой ширине трещин. Такие случаи допускаются и не представляют существенной опасности [84, 87], поэтому можно считать, что модель хорошо справляется с классом `concr_crack`. `tie_concr_break` уже показывает неплохие результаты, хотя объектов для данной метки в датасете довольно мало, и недефектных шпал в сотни раз больше.

Полученная матрица ошибок для модели ОВJ на тестовом фрагменте пути также показывает высокое качество работы детектора и позволяет выявить интересные зависимости. Число неверных распознаваний первого и второго рода

чётко прослеживается по первым строке и столбцу матрицы (рисунок 5.1). При этом доля таких ошибок составляет не более 5 % от общего числа предсказаний, что удовлетворяет требованиям к модели. Стоит отметить, что класс `bolt_unscrewed` часто принимается детектором за `nut` (и наоборот) в связи с сильным визуальным сходством и сильным числа объектов для этих классов. Можно также отметить интересный факт о том, что `kb` иногда берётся как `nut` или `nut` распознаётся как `kb`. В данном случае можно предположить, что возникновение мелких ошибок в детекции связано с близким расположением данных классов друг другу и их перекрытию на изображении. Также имеет смысл проверить набор данных на наличие ошибок с разметкой для меток `kb` и `nut`. Возникшая проблема может быть связана именно с этим.

| | -background | -14_buks | -bind_missing | -bolt_unscrewed | -concr_crack | -concr_crossing | -fp_end | -frog | -hole_square | -joint | -joint_dhr | -kb | -kb_defect2 | -kb_no_bracket | -mlv_add | -mlv_base | -nut | -platform | -plug_ropе | -rail | -rail_switch | -tie_concr | -tie_concr_break | -tie_concr_destroyed | -tongue_end |
|---------------------|-------------|----------|---------------|-----------------|--------------|-----------------|---------|-------|--------------|--------|------------|-------|-------------|----------------|----------|-----------|-------|-----------|------------|-------|--------------|------------|------------------|----------------------|-------------|
| background | 0 | 0 | 3 | 1 | 23 | 6 | 32 | 0 | 1 | 88 | 21 | 203 | 0 | 3 | 29 | 14 | 225 | 0 | 55 | 8 | 1 | 26 | 2 | 25 | 1 |
| 14_buks | 23 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| bind_missing | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| bolt_unscrewed | 4 | 0 | 0 | 199 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 253 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| concr_crack | 18 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| concr_crossing | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| fp_end | 47 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 950 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| frog | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| hole_square | 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 695 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| joint | 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 448 | 71 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| joint_dhr | 48 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| kb | 473 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 44255 | 29 | 0 | 1 | 0 | 280 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| kb_defect2 | 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 660 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| kb_no_bracket | 45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 520 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| mlv_add | 24 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 125 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| mlv_base | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 112 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| nut | 1385 | 0 | 0 | 243 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | 224 | 0 | 0 | 0 | 0 | 89430 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| platform | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| plug_ropе | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 352 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| rail | 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25154 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| rail_switch | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 27 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| tie_concr | 144 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48375 | 22 | 3 | 0 | 0 |
| tie_concr_break | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| tie_concr_destroyed | 76 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 83 | 0 | 0 |
| tongue_end | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 |

Рисунок 5.1 – Матрица ошибок, полученная в результате обработки моделью ОВJ тестовой выборки

5.2 Решение задачи назначений

В результате решения задачи оптимизации (4.9) с наложенными ограничениями (4.13 - 4.21) и (4.24) определяется вектор X_{OPT} назначений бригад на дефекты, обеспечивающий минимум суммарного времени ремонта, который представляет собой функцию от нескольких параметров:

$$T_{min} = f_1(X_{OPT}, D, R, N, P, V, C), \quad (5.1)$$

где V - скорости передвижения бригад;

C – стоимости работ.

Кроме того, для полученного вектора X_{OPT} в соответствии с выражением (4.24) определяется суммарная стоимость ремонтных работ для оптимального назначения:

$$C_m = f_2(X_{OPT}, D, V, C) \quad (5.2)$$

Каждый выявленный дефект может быть представлен, как вектор параметров $d_r = (Degree_r, Class_r, \rho_r, C_r)$, где $Degree_r$ – степень дефекта и $Class_r$ – класс дефекта; $r = \overline{1, R}$.

С целью проведение эксперимента был решен набор задач оптимизации для разных сочетаний описанных в формулах (5.1) и (5.2) параметров и выполнено построение графиков зависимостей T_{min} и C_m от различных значений этих параметров.

В проводимом исследовании один из рассматриваемых параметров принят качестве аргумента. Он пробегает диапазон значений при постоянных значениях двух других характеристик. В качестве аргумента используется число R выявленных дефектов. Параметрами исследуемых зависимостей T_{min} и C_m приняты значения число рабочих бригад $PR1$ и число дефектов II степени $PR2$.

Эксперименты по решению задачи оптимизации были проведены на линейном участке Самара-Кинель Куйбышевской железной дороги длиной 40,4 км. В качестве точек базирования рабочих отделений рассматривались четыре станции, расположенные между начальной и конечной станциями этого участка: Безымянка, Зубчаниновка, Смышляевка, Алексеевская. Структура рассматриваемого сегмента

пути приведена в таблице 5.3. Координаты станций в нём указаны как относительно начала Куйбышевской ЖД, так и относительно начала линейного участка.

Таблица 5.3 — Структура линейного участка пути Самара-Кинель Куйбышевской железной дороги

| Название станции | Координата на Куйбышевской ЖД, км | Относительная координата, км |
|-------------------------|--|-------------------------------------|
| Самара | 1097,8 | 0 |
| Безымянка | 1108,7 | 10,9 |
| Зубчаниновка | 1115,6 | 17,8 |
| Смышлявека | 1119,4 | 21,6 |
| Алексеевская | 1127,7 | 29,9 |
| Кинель | 1138,2 | 40,4 |

В таблице 5.4 приведены исходные данные о функционирующих на участке неотложных и укрупнённых бригадах, а в таблице 5.5 – исходные данные о выявленных на участке дефектах и выделенных для их устранения технологических окнах. Номера классов дефектов указаны в соответствии с таблицей 4.1.

В рамках проведения эксперимента был решён набор задач оптимизации для исследования зависимостей времени работ от числа дефектов и стоимости работ от числа дефектов. При этом в качестве параметра использовано число бригад: 6, 8 или 10. Количество укрупнённых бригад во всех экспериментах равно 2, а неотложными являются все остальные бригады (4, 6 или 8). В случае, когда число дефектов меньше приведённого в таблице 5.5, используются первые r значений. Аналогичное правило применяется и для рабочих бригад.

Таблица 5.4 — Исходные данные по неотложным и укрупненным бригадам в проводимом наборе экспериментов

| Номер n бригады | Номер рабочего отделения | Тип бригады | Координата ρ_n базирования бригады, км | Средняя скорость v_n передвижения бригады, км/час | Стоимость работ по устранению дефекта класса m , тыс. руб. | | | | |
|----------------------|--------------------------------|----------------|---|---|---|----|----|---|-----|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 1 | Неотл. | 10,9 | 35 | 20 | 12 | 12 | 4 | 300 |
| 2 | 1 | Неотл. | 10,9 | 40 | 40 | 11 | 10 | 6 | 350 |
| 3 | 2 | Неотл. | 17,8 | 50 | 24 | 9 | 14 | 3 | 400 |
| 4 | 2 | Неотл. | 17,8 | 30 | 30 | 10 | 15 | 4 | 500 |
| 5 | 3 | Неотл. | 21,6 | 26 | 36 | 8 | 9 | 8 | 450 |
| 6 | 3 | Неотл. | 21,6 | 24 | 24 | 15 | 10 | 2 | 600 |
| 7 | 4 | Неотл. | 29,9 | 42 | 30 | 10 | 8 | 3 | 500 |
| 8 | 4 | Неотл. | 29,9 | 54 | 20 | 7 | 14 | 2 | 400 |
| 9 | 2 | Укрупн. | 17,8 | 90 | 20 | 11 | 12 | 4 | 300 |
| 10 | 4 | Укрупн. | 29,9 | 100 | 30 | 9 | 11 | 6 | 350 |

Таблица 5.5 — Исходные данные по выявленным дефектам (1 дефект II степени) в проводимом наборе экспериментов

| Номер r дефекта d_r | Номер m класса дефекта | Степень дефекта d_r | Координаты: ρ_r^d дефекта, ρ_{k-1}^s, ρ_k^s — границ перегона с дефектом, км | Время t_r устранения дефекта, час | Технолог. окно T_r^0 , час | Допустимая стоимость C_r^g работ по дефекту класса m , тыс. руб. |
|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|---|--|------------------------------------|---|
| 1 | 4 | IV | 2,317 [0;10,9] | 0,55 | 1 | 5 |
| 2 | 1 | II | 7,845 [0;10,9] | 3 | 4 | 30 |
| 3 | 3 | III | 15,092 [10,9;17,8] | 1,5 | 2 | 12 |
| 4 | 2 | III | 22,687 [21,6;29,9] | 2 | 3 | 10 |
| 5 | 5 | IV | 33,451 [29,9;40,4] | 4 | 6 | 400 |
| 6 | 3 | III | 39,982 [29,9;40,4] | 1,5 | 3 | 12 |

Результаты проводимого набора экспериментов оформляются в таблицы 5.7 и 5.8. По полученным данным построены зависимости минимального времени работ T_{min} от числа дефектов и бригад для одного дефекта второй степени (рисунок 5.2) и двух дефектов второй степени (рисунок 5.3). Во втором случае новый дефект присутствует на месте неисправности с номером 4 из таблицы 5.5 (таблица 5.6).

Аналогичным образом, по данным из таблицы 5.8 построены графики зависимости стоимости работ C_m от числа дефектов и бригад для одного дефекта второй степени (рисунок 5.4) и двух дефектов второй степени (рисунок 5.5).

В результате выполнения экспериментов получены назначения бригад, представленные в таблицах 5.9 и 5.10.

Таблица 5.6 — Корректировка исходных данных по выявленным дефектам (замена дефекта под номером 4 на второй дефект II степени)

| Номер r дефекта d_r | Номер m класса дефекта | Степень дефекта d_r | Координаты: ρ_r^d дефекта, ρ_{k-1}^s, ρ_k^s — границ перегона с дефектом, км | Время t_r устранения дефекта, час | Технолог. окно T_r^o , час | Допустимая стоимость C_r^g работ по дефекту класса m , тыс. руб. |
|-------------------------|--------------------------|-----------------------|---|-------------------------------------|------------------------------|--|
| 4 | 1 | II | 22,687 [21,6;29,9] | 3 | 4 | 30 |

Таблица 5.7 — Результаты вычислений минимального времени работ T_{min} , ч.

| Число дефектов R | Параметры | | | | | |
|--------------------|------------------------------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|
| | PR2 – один дефект II степени | | | PR2 - два дефекта II степени | | |
| | Параметр PR1 | | | Параметр PR1 | | |
| | 6 | 8 | 10 | 6 | 8 | 10 |
| 1 | 0,795 | 0,795 | 0,795 | 0,795 | 0,795 | 0,795 |
| 2 | 3,94 | 3,94 | 3,94 | 3,94 | 3,94 | 3,94 |
| 3 | 5,545 | 5,545 | 5,545 | 5,545 | 5,545 | 5,545 |
| 4 | 7,628 | 7,587 | 7,587 | 8,628 | 8,628 | 8,628 |
| 5 | 11,941 | 11,9 | 11,653 | 12,941 | 12,941 | 12,694 |
| 6 | 13,626 | 13,505 | 13,258 | 15,454 | 15,148 | 14,434 |

Таблица 5.8 — Результаты вычислений стоимости работ C_m , тыс. руб.

| Число дефектов R | Параметры | | | | | |
|--------------------------|------------------------------|-----|-----|------------------------------|-----|-----|
| | PR2 – один дефект II степени | | | PR2 - два дефекта II степени | | |
| | Параметр PR1 | | | Параметр PR1 | | |
| | 6 | 8 | 10 | 6 | 8 | 10 |
| 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| 3 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 | 34 |
| 4 | 43 | 42 | 42 | 64 | 64 | 64 |
| 5 | 443 | 442 | 442 | 464 | 464 | 464 |
| 6 | 454 | 453 | 453 | 476 | 473 | 472 |

Таблица 5.9 — Векторы назначений рабочих бригах, полученные в исследовании с одним дефектом II степени

| Номер эксперимента | Число дефектов | Число бригад | Вектор назначений $X_{ОРТ}$ |
|--------------------|----------------|--------------|-----------------------------|
| 1 | 1 | 6 | x1 |
| 2 | 2 | 6 | x1, x11 |
| 3 | 3 | 6 | x1, x11, x14 |
| 4 | 4 | 6 | x1, x11, x14, x24 |
| 5 | 5 | 6 | x1, x11, x14, x24, x27 |
| 6 | 6 | 6 | x1, x11, x14, x22, x27, x36 |
| 7 | 1 | 8 | x1 |
| 8 | 2 | 8 | x1, x15 |
| 9 | 3 | 8 | x1, x15, x18 |
| 10 | 4 | 8 | x1, x15, x18, x29 |
| 11 | 5 | 8 | x1, x15, x18, x29, x35 |
| 12 | 6 | 8 | x1, x15, x18, x29, x35, x48 |
| 13 | 1 | 10 | x1 |
| 14 | 2 | 10 | x1, x19 |

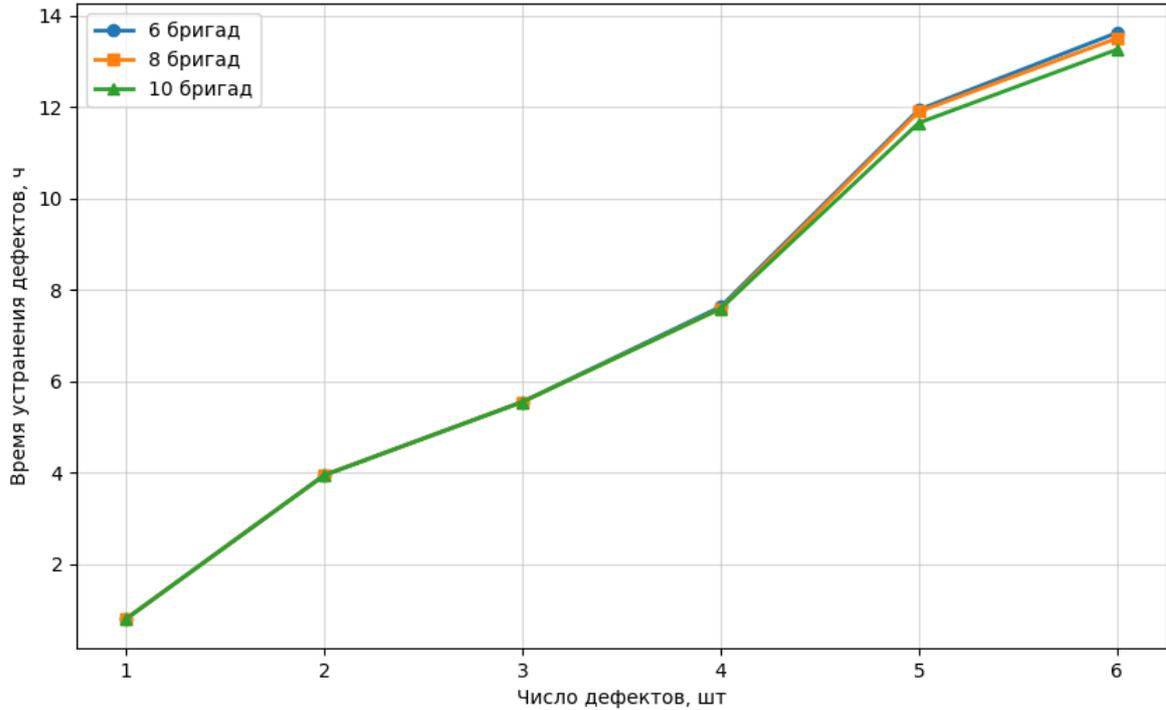
Продолжение таблицы 5.9

| | | | |
|----|---|----|-----------------------------|
| 15 | 3 | 10 | x1, x19, x22 |
| 16 | 4 | 10 | x1, x19, x22, x35 |
| 17 | 5 | 10 | x1, x19, x22, x35, x48 |
| 18 | 6 | 10 | x1, x19, x22, x35, x48, x60 |

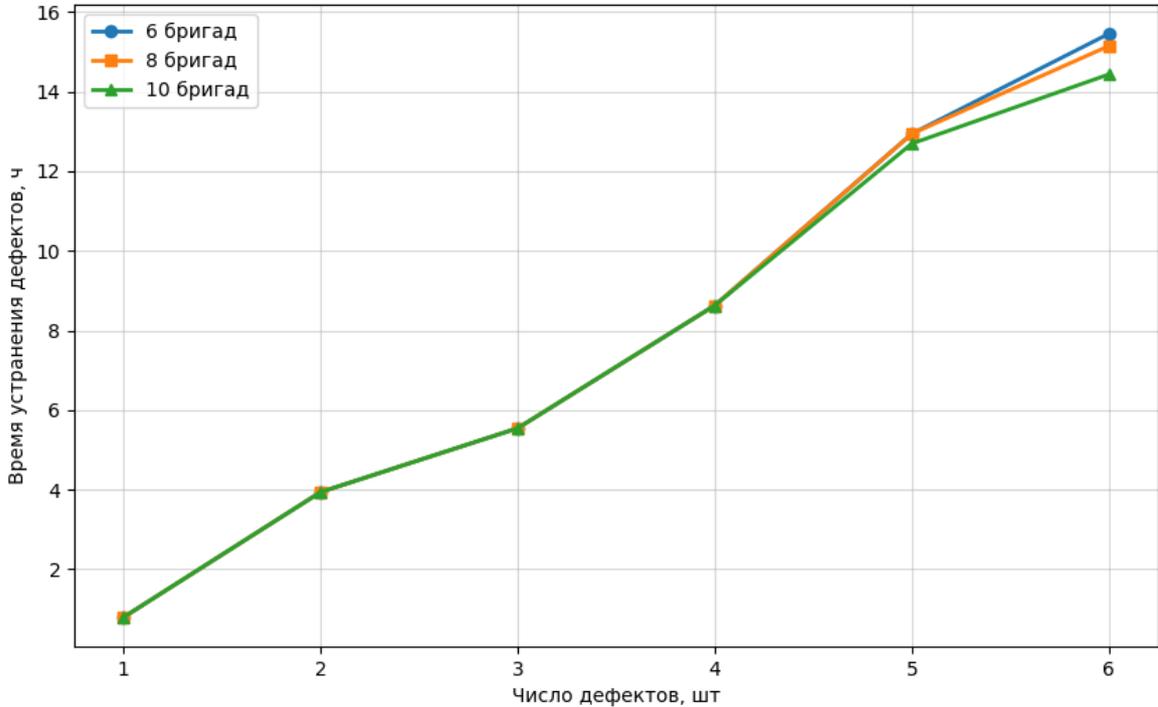
Таблица 5.10 — Векторы назначений рабочих бригах, полученные в исследовании с двумя дефектами II степени

| Номер эксперимента | Число дефектов | Число бригад | Вектор назначений $X_{ОРТ}$ |
|--------------------|----------------|--------------|-----------------------------|
| 1 | 1 | 6 | x1 |
| 2 | 2 | 6 | x1, x11 |
| 3 | 3 | 6 | x1, x11, x14 |
| 4 | 4 | 6 | x1, x11, x14, x24 |
| 5 | 5 | 6 | x1, x11, x14, x24, x27 |
| 6 | 6 | 6 | x4, x11, x13, x24, x27, x32 |
| 7 | 1 | 8 | x1 |
| 8 | 2 | 8 | x1, x15 |
| 9 | 3 | 8 | x1, x15, x18 |
| 10 | 4 | 8 | x1, x15, x18, x32 |
| 11 | 5 | 8 | x1, x15, x18, x32, x35 |
| 12 | 6 | 8 | x1, x15, x18, x32, x35, x45 |
| 13 | 1 | 10 | x1 |
| 14 | 2 | 10 | x1, x19 |
| 15 | 3 | 10 | x1, x19, x22 |
| 16 | 4 | 10 | x1, x19, x22, x40 |
| 17 | 5 | 10 | x1, x19, x22, x40, x48 |
| 18 | 6 | 10 | x1, x19, x22, x40, x48, x57 |

Зависимость минимального времени устранения дефектов от их количества (1 дефект II степени)

Рисунок 5.2 – Зависимости минимального времени работ T_{min} от числа дефектов и бригад при наличии одного дефекта второй степени

Зависимость минимального времени устранения дефектов от их количества (2 дефекта II степени)

Рисунок 5.3 – Зависимость минимального времени работ T_{min} от числа дефектов и бригад при наличии двух дефектов второй степени

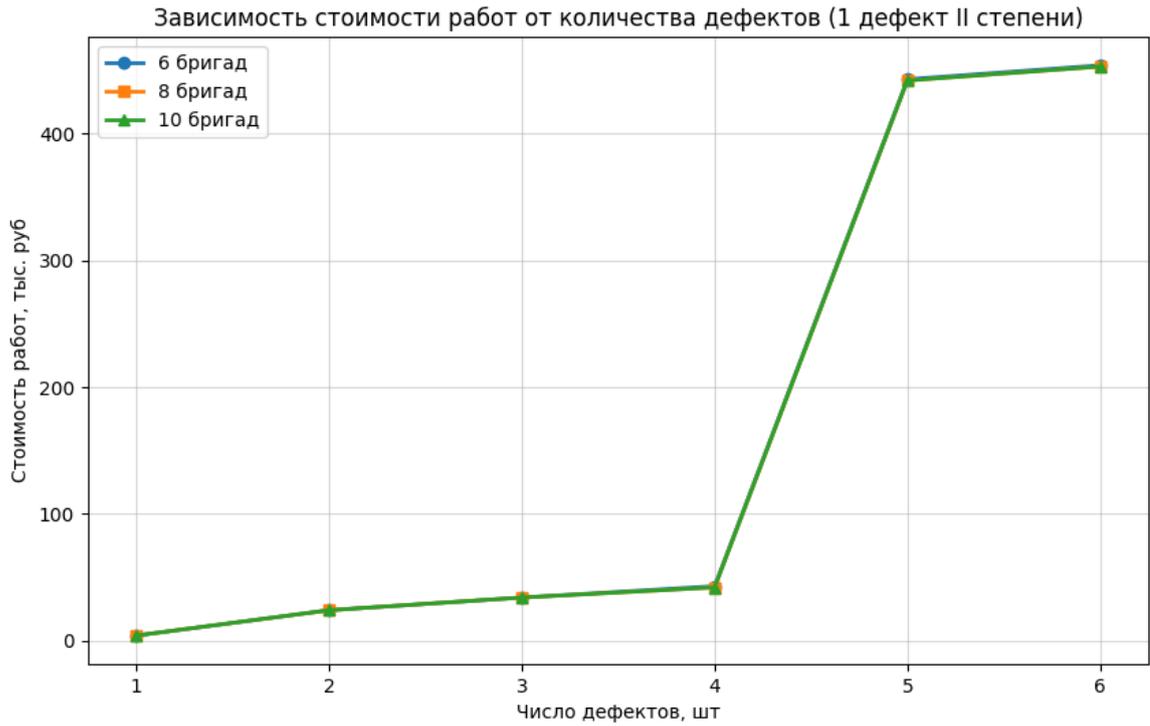


Рисунок 5.4 – Зависимость стоимости работ C_m от числа дефектов и бригад при наличии одного дефекта второй степени

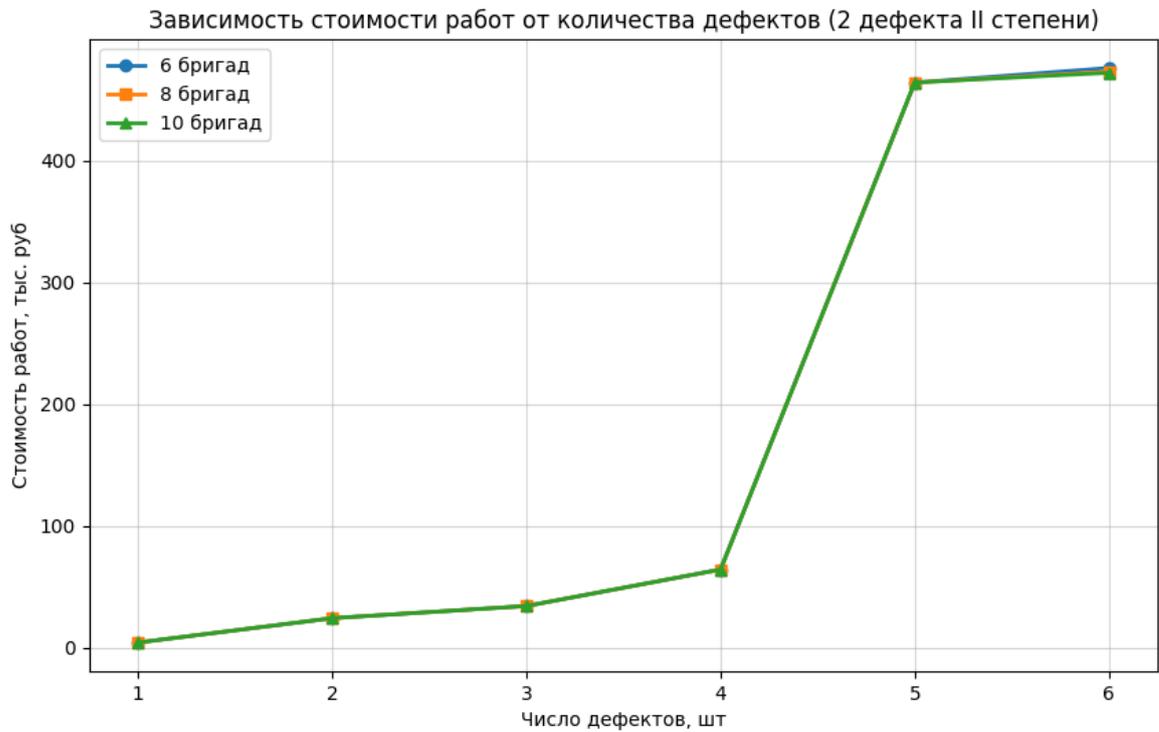


Рисунок 5.5 – Зависимость стоимости работ C_m от числа дефектов и бригад при наличии двух дефектов второй степени

Проведённые исследования показывают, что при небольшом количестве дефектов (1-3) минимальное время ремонта и стоимость работ совпадают для любого количества неотложных бригад (рисунки 5.2-5.5). Различия возникают с ростом числа отступлений. При большом числе дефектов (4-6) наблюдается умеренное снижение минимального времени работ с ростом количества неотложных бригад (рисунок 5.2 и рисунок 5.3). Такой результат связан со скоростью устранения дефектов бригадами. Например, при наличии 6 рабочих бригад для устранения 6 дефектов будут задействованы все имеющиеся ресурсы, а при наличии 10 бригад – только те бригады, которые смогут быстрее устранить неисправности. Стоимость ремонтных работ для одного набора отступлений остаётся примерно одинаковой для любого числа бригад (рисунок 5.4 и рисунок 5.5). Это связано с заданными значениями на затраты по устранению классов дефектов для каждой из бригад (таблица 5.4).

Описанные выше зависимости минимального времени ремонтных работ и их стоимости наблюдаются для набора неисправностей как с одним, так и с двумя дефектами II степени. Однако замена одного из типов отступлений вносит некоторые изменения при поиске оптимальных назначений. Появление второго дефекта II степени на четвёртой позиции (таблица 5.6) приводит к росту как минимального времени работ (рисунок 5.3), так и их стоимости (рисунок 5.5). Это связано с особенностями устранения таких дефектов. Неисправности II степени могут ремонтировать только укрупнённые бригады. Обе такие бригады обязательно должны быть задействованы при сложившихся обстоятельствах. Результат исследования показывает, что при наличии одного дефекта II степени назначения были другими, и неисправность с номером 4 не устранялась неотложной бригадой (таблица 5.9). Добавление большего числа таких неисправностей привело бы к более сильным различиям минимального времени работ и их стоимости относительно тех значений, что были получены в таблицах 5.7 и 5.8.

5.3. Применение искусственной нейронной сети для контроля состояния инфраструктуры контактной сети

Помимо рельсового пути в состав железной дороги входят и другие подсистемы, которые необходимо поддерживать в исправном и надёжном состоянии. Только комплексное ТОиР всей инфраструктуры позволяет поддерживать функционирование всей системы и обеспечивать безопасное движение поездов.

Одной из важнейших подсистем железной дороги выступает контактная сеть. Её инфраструктура так же, как и элементы рельсового пути нуждается в регулярной диагностике. В связи с успешным внедрением нейросетевых технологий для распознавания компонентов ВСП предложено использование искусственного интеллекта для контроля состояния КС. Разработана и обучена модель для обнаружения дефектов в таких элементах, как фиксаторы и провода. Результаты проведённых исследований были представлены в работах [74, 75]. Для решения задачи обнаружения элементов КС также используется предварительно обученная модель SSD Mobilenet v3 Small COCO. Распознавание объектов производится на кадрах с матричного видео (формат RGB) с разрешением 1920x1080. Камеры устанавливаются на корпус вагона сверху. Для контроля элементов контактной сети по железной дороге перемещается вагон испытания контактной сети (ВИКС) [90]. Разметка областей также производится в программе Labeling (рисунок 5.6). В таблице 5.11 приводится описание классов из датасета элементов контактной сети.

После завершения обучения модели для распознавания элементов КС осуществлена оценка качества работы детектора по метрике F1. Полученные результаты приведены в таблице 5.12. Также выполнено построение матрицы ошибок для валидационной выборки этого набора данных. Полученные результаты представлены на рисунке 5.7.

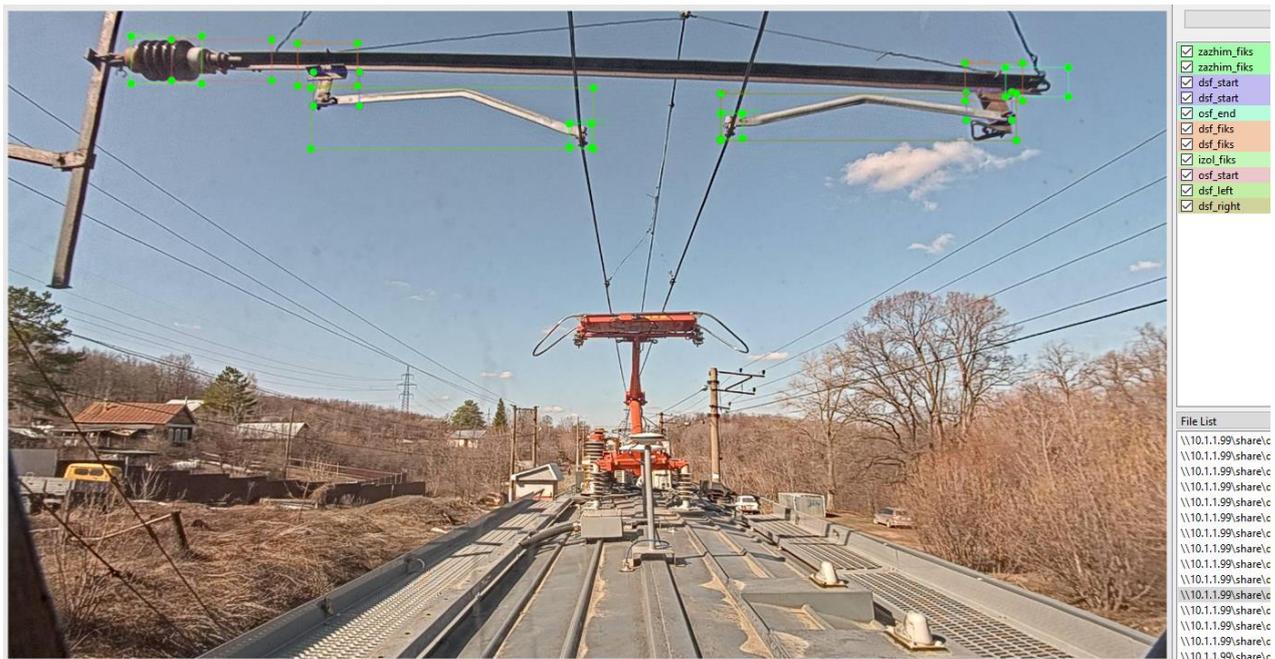


Рисунок 5.6 – Пример разметки кадра из набора данных элементов КС

Таблица 5.11 — Описание классов из датасета элементов КС

| Имя класса | Значение класса | Количество объектов в датасете |
|------------|--|--------------------------------|
| osf_start | Начало стержня основного фиксатора (место перехода между изолятором и стержнем) | 472 |
| osf_end | Конец стержня основного фиксатора | 494 |
| izol_fiks | Изолятор основного фиксатора, выполненного в форме металлического стержня | 326 |
| isol_fiks3 | Изолятор основного фиксатора, выполненного в форме троса | 408 |
| dsf_fiks | Место соединения стержня основного фиксатора с дополнительным стержнем | 654 |
| dsf_left | Дополнительный фиксатор, начало которого расположено слева от его зажима | 700 |
| dsf_right | Дополнительный фиксатор, начало которого расположено справа от его зажима | 700 |
| dsf_start | Начало дополнительного фиксатора при основном фиксаторе в форме металлического стержня | 660 |

| | | |
|-------------|--|------|
| dsf_start2 | Начало дополнительного фиксатора при тросовом основном фиксаторе | 696 |
| zazhim_fiks | Зажим дополнительного фиксатора | 3028 |
| struna | Струна | 571 |
| zazhim_str | Зажим струны | 320 |
| nakladka | Ограничительная накладка | 234 |
| uppvvs | Устройство подъема проводов на воздушных стрелках (УППВС) | 167 |

Таблица 5.12 — Значения меры F1, полученные для классов модели с элементами КС

| Имя класса | Точность F1 | Достоверность, при которой достигнута точность F1 |
|-------------|-------------|---|
| osf_start | 0,99 | 0,5 |
| osf_end | 0,92 | 0,4 |
| izol_fiks | 0,9 | 0,5 |
| isol_fiks3 | 0,95 | 0,4 |
| dsf_fiks | 0,97 | 0,5 |
| dsf_left | 0,97 | 0,45 |
| dsf_right | 0,96 | 0,45 |
| dsf_start | 0,94 | 0,4 |
| dsf_start2 | 0,99 | 0,6 |
| zazhim_fiks | 0,87 | 0,45 |
| struna | 0,69 | 0,25 |
| zazhim_str | 0,14 | 0,2 |
| nakladka | 0,33 | 0,45 |
| uppvvs | 1 | 0,4 |

Полученные значения меры F1 показывают высокое качество работы обученной модели. По матрице ошибок также видно, что модель хорошо справляется с распознаванием элементов КС. Из рисунка 5.7 видно, что детектор совершает много ошибок первого и второго рода для класса zazhim_str в связи с размерами областей и малым числом объектов для него. Небольшие неточности можно наблюдать для метки zazhim_fiks. Данный класс также имеет небольшие размеры, но имеет хороший объём выборки, в связи с чем модель ошибается очень редко. Большое число ошибок для класса struna связано с малым числом областей в датасете.

Confusion matrix of VICS_SURV for validation data

| | background | dsf_fiks | dsf_left | dsf_right | dsf_start | dsf_start2 | izol_fiks | izol_fiks3 | nakladka | osf_end | osf_start | struna | uppvvs | zazhim_fiks | zazhim_str |
|-------------|------------|----------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|------------|----------|---------|-----------|--------|--------|-------------|------------|
| background | 0 | 0 | 2 | 2 | 3 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 24 | 23 |
| dsf_fiks | 4 | 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| dsf_left | 0 | 0 | 34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| dsf_right | 1 | 0 | 0 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| dsf_start | 1 | 0 | 0 | 0 | 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| dsf_start2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| izol_fiks | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| izol_fiks3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| nakladka | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| osf_end | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| osf_start | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| struna | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 |
| uppvvs | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 |
| zazhim_fiks | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 122 | 0 |
| zazhim_str | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 |

Рисунок 5.7 – Матрица ошибок, полученная в результате обработки валидационной выборки набора данных по элементам КС

5.4 Выводы по пятой главе

1. Выполнено исследование скорости и качества работы модели ОВJ на экспериментальном фрагменте линейного участка Самара-Кинель Куйбышевской железной дороги. Модель показала высокую эффективность при выявлении дефектов ВСП на тестовых данных. Она может применяться в реальных условиях для анализа состояний элементов рельсового пути при движении вагонов-путеизмерителей со скоростью до 190 км/ч.

2. Решён набор задач оптимизации для исследования зависимостей времени работ от числа дефектов и стоимости работ от числа дефектов. Параметрами в эксперименте выступили число рабочих бригад и количество неисправностей второй степени. В результате проведения исследования получены выводы о влиянии на время ремонтных работ числа рабочих бригад для большого количества дефектов. При этом зависимость выражена ярче при двух отступлениях II степени.

Выявлено незначительное влияние числа рабочих бригад на стоимость работ при любом количестве дефектов.

3. Показаны возможности применения предварительно обученной нейронной сети для решения задачи распознавания элементов контактной сети – другой важнейшей подсистемы железной дороги. В результате тренировки модели получены качественные результаты обнаружения объектов инфраструктуры КС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен системный анализ существующих методов управления при техническом обслуживании верхнего строения пути железной дороги. Рассмотрены основные проблемы и задачи, решаемые в области технического ремонта и обслуживания. Показано, что наиболее эффективно вопросы диагностики решаются с использованием средств искусственного интеллекта. Выполнено формальное описание процесса ТОиР. Определены основные направления исследований.

2. Предложена онтология процесса технического обслуживания и ремонта верхнего строения пути. Сформулированы аксиомы и семантические правила для получения новых знаний о состоянии рельсового пути и формирования базы знаний. Произведена апробация полученных результатов на базе средств редактора онтологий Protégé. Эти исследования положены в основу построения системы поддержки принятия решения по операциям ТОиР.

3. Разработаны три модели искусственных нейронных сетей для детекции и классификации дефектов рельсового пути. Они использованы в штатном программном обеспечении диагностических комплексов инфраструктуры (ДКИ) производства АО НПЦ ИНФОТРАНС для обработки в реальном времени видеоданных о состоянии элементов верхнего строения железнодорожного пути и распознавания дефектов. В результате натурных экспериментов для основной модели детектора OBJ получены следующие характеристики: средневзвешенная точность mean average precision (mAP) при intersection over union (IoU) равном 0,5 $mAP_{IoU=0,5} = 0,61$, mean average recall (mAR) для 10 самых достоверных объектов $mAR_{10} = 0,51$, мера F1 = 0,71. При этом производительность нейронных сетей обеспечивала анализ состояния элементов ВСП при движении вагона со скоростью до 190 км/ч.

4. Поставлена и решена задача целочисленного линейного программирования с булевыми переменными оптимального назначения рабочих бригад на устранение выявленных дефектов рельсового пути. Ограничения задачи

учитывают наличие трудовых ресурсов, территориальное размещение рабочих бригад, скорости их перемещения к месту устранения дефектов и выделенные технологические окна для перегонов с неисправностями. Решение задачи обеспечило снижение времени на ТОиР в среднем на 12% по сравнению с временными затратами на аналогичные работы в предыдущие периоды времени.

5. Разработана система поддержки принятия решений при управлении техническим обслуживанием и ремонтом. В состав СППР входят разработанные новые модули: а) модуль онтологии процесса ТОиР, база знаний и база правил продукционного вывода, б) интеллектуальный классификатор на основе искусственной нейронной сети, в) модуль оптимизации назначений рабочих бригад. Опытный образец системы поддержки принятия решений был использован в функциональном модуле ИИС КСИ и показал сокращение стоимостных затрат на устранение дефектов.

В качестве перспективных направлений развития работы можно отметить следующие:

- Улучшение качества распознавания элементов ВСП наборов за счёт расширения набора данных для классов с малым числом объектов и балансировки числа областей по дефектным и недефектным классам.
- Изменение параметров расширения данных при обучении, применение других подходов к расширению данных при обучении моделей.
- Обучение новых версий модели нейросетей и сравнение их качества работы с детекторами, обученными на предыдущих итерациях.
- Тестирование разработанной СППР по ТОиР рельсового пути на других линейных участках и железных дорогах.
- Разработка СППР для ТОиР контактной сети железной дороги.
- Применение нейросетевых детекторов для отслеживания положения контактного провода.
- Применение рекуррентных нейронных сетей для вибродиагностики рельсового пути.

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

ВСП – верхнее строение (рельсового) пути;

ВИКС – вагон испытания контактной сети;

ДИ – дирекция инфраструктуры;

ДКИ – диагностический комплекс инфраструктуры;

ДНЦ – поездной диспетчер;

ДСП – дежурный по станции;

ИИС – информационно измерительная система;

ИНС – искусственная нейронная сеть;

ИС – интеллектуальная система;

КС – контактная сеть;

КСИ – контроль станционной инфраструктуры;

НСП – нижнее строение (рельсового) пути;

ПО – программное обеспечение;

ПЧ – путевая часть (дистанция пути);

СППР – система поддержки принятия решений;

ТО – техническое обслуживание;

ТОиР – техническое обслуживание и ремонт;

УКСПС - устройство контроля схода подвижного состава;

ЭС – экспертная система;

ЭУ – эксплуатационный участок (пути).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акинфиев, В.К. Оптимизационно-имитационные методы выбора инвестиционных решений в крупномасштабных системах / В.К. Акинфиев, А.Д. Цвиркун // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2017): материалы X международной конференции. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова; Российская академия наук; Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – М.: Издательство: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва), 2017. – С. 12-17.
2. Бокучава, И.Т. Оптимизация функционирования и структурного построения сложных систем / И.Т. Бокучава, А.Д. Цвиркун, В.К. Акинфиев, С.П. Орлов, З.Г. Георгобиани. – Тбилиси: «Мецниереба», 1989. – 72 с.
3. Бурков, В.Н. Введение в теорию управления организационными системами/ В.Н. Бурков, Н.А. Коргин, Д.А. Новиков / Под ред. чл.-корр. РАН Д.А. Новикова. – М.: Либроком, 2009. – 264 с.
4. Бурков, В.Н. Модели и методы управления организационными системами / В.Н. Бурков, В.А. Ириков. – М.: Наука, 1994. – 270 с.
5. Бурковский, В.Л. Основы моделирования в среде GPSS: Учеб. пособие / В.Л. Бурковский, О.Я. Кравец, С.Л. Подвальный. – Воронеж: ВГТУ, 1994. – 80с.
6. Васильев, В.И. Интеллектуальные системы управления. Теории и практика: учебное пособие / В.И. Васильев, Б.Г. Ильясов. – М.: Радиотехника, 2009. – 392 с.
7. Воронин, А.А. Математические модели организаций: Учебное пособие / А.А. Воронин, М.В. Губко, С.П. Мишин, Д.А. Новиков. – М.: ЛЕНАНД, 2008. – 360 с.
8. Воропаев, Г.В. Методы системного анализа в проблемах рационального использования водных ресурсов. Т. 2 / Г.В. Воропаев, В.Г. Киселев, В.Т. Пряжинская [и др.]. Под ред. Н.Н. Моисеева. – М.: Б.и., 1976. – 502 с.
9. Гончар, Д.Р. Параллельный алгоритм планирования групп вычислительных работ на основе метода ветвей и границ // Управление развитием

крупномасштабных систем (MLSD'2020): материалы XIII международной конференции. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова; Российская академия наук; Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – М.: Издательство: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва). – 2020. – С. 12-17.

10. Губко, М.В. Математические модели оптимизации иерархических структур / М.В. Губко. – М.: ЛЕНАНД, 2006. – 264 с.

11. Губко, М.В. Построение комплексных механизмов управления организационным поведением / М.В. Губко // Проблемы управления. – М.: Издательство: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва). – 2020. – №3. – С. 14-25.

12. Долинина О.Н., Кушников В.А. Методы и технологии обеспечения качества интеллектуальных систем принятия решения // Программная инженерия. – 2021. – Т. 12. – № 4. – С. 189-199.

13. Ириков, В.А. Распределенные системы принятия решений / В.А. Ириков, В.Н. Тренев. – М.: Наука, 1999.

14. Ковалев, С.П. Цифровая платформа для реализации автоматизированных систем управления распределенными энергоресурсами / С.П. Ковалев, А.А. Небера, М.В. Губко // Проблемы управления. – М.: Издательство: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва). – 2020. – №6. – С. 57–70.

15. Кульба, В.В. Модели и методы информационной поддержки принятия управленческих решений на различных этапах жизненного цикла малого предприятия / В.В. Кульба, П.В. Красицкий, Л.М. Красицкая. – М.: ИПУ РАН, 2007. – 63 с.

16. Липаев, В.В. Распределение ресурсов в вычислительных системах / В.В. Липаев. – М.: Статистика, 1979. – 247 с.

17. Мазур, И.И. Управление проектами: Учебное пособие / И.И. Мазур, В.Д. Шапиро, Н.Г. Ольдерогге. Под общ. ред. И.И. Мазура. – 2-е изд. – М.: Омега-Л, 2004. – 664 с.

18. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем: Пер. с англ. / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. Под ред. И.Ф. Шахнова. Предисл. чл.-корр. АН СССР Г.С. Поспелова. – М.: Мир, 1973. – 344 с.

19. Моисеев, Н.Н. Введение в теорию иерархических систем управления / Н.Н. Моисеев, Ю.Б. Гермейер // Math. Operationsforsch. und Statist. – 1973. – V. 4. – № 2. – P. 133-154.

20. Новиков, Д.А. Математические модели формирования и функционирования команд / Д.А. Новиков. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2008. – 184 с.

21. Новиков, Д.А. Методы оптимизации структуры иерархических систем / Д.А. Новиков, М.В. Губко // Управление развитием крупномасштабных систем. – М.: Издательство: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва). – 2015. – С. 359 – 37.

22. Новиков, Д.А. Сетевые структуры и организационные системы / Д.А. Новиков. – М.: ИПУ РАН (научное издание), 2003. – 102 с.

23. Новиков, Д.А. Теория управления организационными системами / Д.А. Новиков. – М.: МПСИ, 2005. – 584 с.

24. Помогаев В.М. Мониторинг технического состояния сельскохозяйственных машин и качества выполнения технологических операций // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2023. – № 2 (50). – С. 143-152.

25. Ростсельмаш. Зерноуборочные комбайны TORUM 785. URL: <https://rostselmash.com/products/combine/torum-785/> (дата обращения: 20.12.2025).

26. Рыбаков В.Н., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю. Концепция построения виртуальной лаборатории испытаний ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – № 3(27). – С. 326-331.

27. Семенова, В.А. Алгоритмизация формирования и прагматической трансформации ограничений существования свойств предметной области / В.А.

Семенова, С.В. Смирнов // *Онтология проектирования*. – 2020. – Т.10. – №3(37). – С.361-379.

28. Сусарев С.В. Модели оценки эффективности технического обслуживания роботизированных транспортных средств // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. – 2020. – С. 62-76.

29. Сусарев С.В., Орлов С.П., Бизюкова Е.Е., Учайкин Р.А. Применение моделей на сетях Петри при организации технического обслуживания автономных агротехнических транспортных средств // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*». – 2021. – Вып. № 58(84). – С. 98-104.

30. Цвиркун, А.Д. Задачи стратегического управления в крупномасштабных проектах (на примере ракетно-космической отрасли) / А.Д. Цвиркун, А.А. Чурсин, Ф.И. Ерешко // *Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016): материалы IX международной конференции*. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – М.: Издательство: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва), 2016. – С. 130-138.

31. Щербаков М. В., Сай Ван К. Архитектура системы предсказательного технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции Индустрии 4.0 // *Программные продукты и системы*. – 2020. – № 2. – С. 186-194.

32. Charnes, A. Measuring the Efficiency of Decision Making Units / A. Charnes, W.W. Cooper, E. Rhodes // *Europ. J. of Operational Research*. – 1978. – №2.– P. 429-444.

33. Cooper, W.W. Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software / W.W. Cooper, L.M. Seiford, K. Tone. – (Springer –Verlag US), 2007. – 492 p.

34. Cooper, W.W. Data Envelopment Analysis: History, Models, and Interpretations. Handbook on Data Envelopment Analysis / W.W. Cooper, L.M. Seiford, J. Zhu. – Boston, MA.: Springer, 2011. – P. 1-39.

35. Jensen, K. Colored Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems / K. Jensen, L.M. Kristensen. – Berlin / Heidelberg, Germany: Springer, 2009. – 382 p.
36. Kerzner, H. Project management: a system approach to planning, scheduling, and controlling / H. Kerzner. – 10th ed. – Hoboken, NJ.: J. Wiley, cop., 2009. – 1094 p.
37. Klir, G.J. Uncertainty and Information. Foundations of Generalized Information Theory / G.J. Klir. – Hoboken, NJ.: John Wiley, 2005. – 499 p.
38. Shoham, Y. Multi-agent systems: algorithmic, game-theoretic and logical bases / Y. Shoham, K. Leyton-Brown. – Publishing house of the Cambridge University, 2009. – 496 p.
39. Le B., Andrews J. Petri net modelling of bridge asset management using maintenance-related state conditions // Structure and Infrastructure Engineering. 2016. Vol. 12. Issue 6. Pp.730–751.
40. Le B., Andrews J., Fecarotti C. A Petri net model for railway bridge maintenance//Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability. 2017. Vol. 231(3). Pp. 306-323.
41. Orlov S.P., Susarev S.V. Application of DEA models in efficiency evaluation of the KAMAZ vehicle robotic system. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
42. Orlov S.P., Susarev S.V., Gubanov N.G., Sidorenko K.V., Morev A.S. Intelligent Model-Based Diagnostic System for an Agricultural Robotic Vehicle System//In: Proc. of the 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019) (Tomsk, Russia). Tomsk: TPU Publishing House. 2019. P. 469-474.
43. Orlov S.P., Susarev S.V., Morev A.S. Simulation of the automated motion of a robotic agricultural vehicle. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
44. Orlov S.P., Susarev S.V., Uchaikin R.A. Application of hierarchical colored petri nets for technological facilities' maintenance process evaluation // Applied Sciences, MDPI, Basel, Switzerland, 2021. Vol. 11, N.11, 5100.
45. Orlov, S., Susarev, S., Pugachev, A. Intelligent Diagnostic System of KAMAZ Robotic Vehicle Units // Proceedings – 2019 21st International Conference

"Complex Systems: Control and Modeling Problems", CSCMP 2019. IEEE Xplore, 2020. P. 307-310.

46. Sheng J., Prescott D. A colored Petri net framework for modeling aircraft fleet maintenance with cannibalization // Reliability Engineering & System Safety. 2019. Vol. 189. P. 67-88.

47. Sheng, J.; Prescott, D. A hierarchical coloured Petri net model of fleet maintenance with cannibalisation. Reliab. Eng. Syst. Saf. 2017, 168, pp. 290-305.

48. Балакирев В. С. Надежность и диагностика автоматизированных систем: Учебное пособие для вузов / В. С. Балакирев, А. А. Большаков. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 144 с.

49. Большаков А.А., Слободянюк Л.А., Шашихина О.Е., Ковальчук Я.А. Системный анализ, математическое моделирование и оптимизация процесса формирования производственного расписания обработки металлоконструкций // Вестник Технологического университета. – 2021. – Т. 24. – № 7. – С. 84-92.

50. Грищенко М.А., Дородных Н.О., Коршунов С.А., Юрин А.Ю. Разработка диагностических интеллектуальных систем на основе онтологий // Онтология проектирования. – 2018. – Т. 8. – №.2(28). – С. 265-284.

51. Губанов Н.Г., Михеев Ю.В., Одинцов В.П., Ахтямов Р.Н., Морев А.С. Архитектура системы диагностики и прогнозирования технического состояния роботизированного транспортного средства // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XXI международной конференции. – Самара: Офорт. 2019. – С.171-174.

52. Дородных Н.О., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Использование онтологических шаблонов содержания при построении баз знаний для технического обслуживания и ремонта авиационной техники // Онтология проектирования. – 2022. – Т.12. – № 2(44). – С.158-171.

53. Задиран К.С., Щербаков М.В., Сай Ван Квонг. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования в условиях малой выборки данных // Управление большими системами: сборник трудов. – 2023. – № 102. – С. 99-113.

54. Орлов С.П., Учайкин Р. А. Автоматизированное управление использованием средств вычислительной техники на машиностроительном предприятии// Материалы конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ». – Саратов, 2019. – С. 81-87.

55. Офицеров, В.П. Оптимизация при ограничении числа проектных переменных / В.П. Офицеров, С.В. Смирнов // Онтология проектирования. – 2021. – Т.11. – №2(40). – С. 227–238.

56. Поспелов, Г.С. Процедуры и алгоритмы формирования комплексных программ / Г.С. Поспелов, В.А. Ириков, А.Е. Курилов. – М.: Наука, 1985. – 424 с.

57. Прангишвили, И.В. Системный подход и повышение эффективности управления / И.В. Прангишвили. – М.: Издательство «Наука», 2005. – 422 с.

58. Трахтенгерц, Э.А. Компьютерные методы реализации экономических и информационных управленческих решений. В 2-х томах. Том 1. Методы и средства / Э.А. Трахтенгерц. – М.: СИНТЕГ, 2009. – 172 с.

59. Хелдман, К. Профессиональное управление проектом [Электронный ресурс] / К. Хелдман. Пер. с англ. А.В. Шаврина. – 5-е изд. (электронное). – М.: Бином. Лаб. знаний, 2012. – 728 с.

60. Иванчина, О. В. Экономическая оценка организации путевых ремонтных работ на железнодорожном транспорте: специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством»: диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Иванчина Ольга Викторовна. – Москва, 2007. – 149 с. – EDN NOLQNH.

61. Панормов В.В. Комплексный анализ сбалансированности и направления повышения эффективности функционирования производственно-транспортных систем: специальность 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пармонов Владимир Валерьевич. – Самара, 2006. – 193 с. – EDN NONKZP.

62. Уманский В.И. Автоматизация управления технологическими процессами железнодорожного транспорта на базе интеграции методов

высокоточного спутникового позиционирования и инерциальной навигации: специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Уманский Владимир Ильич. – Москва, 2012. – 340 с. – EDN OPUXGK.

63. Коваленко А.Н. Техничко-экономическое обоснование выбора рациональной структуры ремонтов путевого комплекса в условиях его реорганизации: специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством»: диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Коваленко Алексей Николаевич. – Москва, 2005. – 166 с. – EDN NNRQDR.

64. Прохоров В.М. Применение показателей интенсивности расстройств рельсовой колеи при организации технического обслуживания пути: специальность 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Прохоров Владимир Михайлович. – Москва, 2003. – 192 с. – EDN NMLNCN.

65. Рубченко Д.С. Управление затратами при организации ремонта и реконструкции объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта на основе нормативного метода: специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством»: диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Рубченко Дмитрий Сергеевич. – Москва, 2017. – 155 с. – EDN RHEVFA.

66. Дворников А.В. Выявление нестабильных участков пути и прогнозирование их состояния: специальность 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Дворников Андрей Владимирович. – Москва, 2008. – 146 с. – EDN NQIJQR.

67. Баронайте Р.А. Определение перспективной потребности в проведении путевых работ на краткосрочный и среднесрочный период в зависимости от условий эксплуатации пути: специальность 2.9.2 «Железнодорожный путь,

изыскание и проектирование железных дорог»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Баронайте Рената Арвидасовна. – Москва, 2024. – 213 с. – EDN ВСХАХJ.

68. Орлов С.П., Ефимушкин Н.А., Ефимушкина Н.В. Глубокая нейронная сеть для диагностики элементов железнодорожного рельсового пути / Ефимушкин Орлов С.П., Ефимушкин Н.А., Ефимушкина Н.В. // «Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки», – 2022. – Том 30. – № 1. – С.63-74.

69. Efimushkin N., Efimushkina N., Orlov S. Intelligent System for Railway Joint Diagnostics / Efimushkin N., Efimushkina N., Orlov S. // Studies in Systems, Decision and Control / Society 5.0. Cyber-Solutions for Human-Centric Technologies – 2023. – Vol. 437. – P. 199-211.

70. Ефимушкин Н.А. Классификация состояний рельсовых стыков с помощью предварительно обученной глубокой нейронной сети // ХС Международные научные чтения памяти Н.П. Дубинина (18 октября 2020 г., г. Москва) / отв. ред. А.А. Сукиасян. - Москва: Научная артель, 2020. – С. 10-14.

71. Ефимушкин Н.А., Ефимушкина Н.В., Орлов С.П. Интеллектуальная система диагностики рельсовых стыков железнодорожного пути / Ефимушкин Н.А., Ефимушкина Н.В., Орлов С.П // «Математические методы в технологиях и технике». – 2022. – №1. – С. 97-103.

72. Орлов С.П., Ефимушкин Н.А., Ефимушкина Н.В. Система диагностики рельсовых скреплений на высокоскоростных железных дорогах на основе глубокой нейронной сети / Орлов С.П., Ефимушкин Н.А., Ефимушкина Н.В. // Вестник Тамбовского Государственного технического университета. Рубрика «Автоматика. Информатика. Управление. Приборы». – 2024. – Том 30. – № 4. – С. 581-593.

73. Орлов С.П., Ефимушкин Н.А., Ефимушкина Н.В. Интеллектуальная система контроля состояний рельсовых скреплений на высокоскоростных железных дорогах / Орлов С.П., Ефимушкин Н.А., Ефимушкина Н.В. // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – № 1. – С. 7-12.

74. Ефимушкин Н.А., Орлов С.П. Интеллектуальная система контроля инфраструктуры контактной сети железной дороги / Ефимушкин Н.А., Орлов С.П // Системы управления и информационные технологии. – 2023. – №3 (93). – С. 60-65.

75. Ефимушкин Н.А., Ефимушкина Н.В. Система контроля состояния контактной сети РЖД/ Ефимушкин Н.А., Ефимушкина Н.В. // Информационные системы и технологии (ИСТ 2023) [Электронный ресурс]: Труды научно-технической конференции с международным участием / под ред. С.А. Прохорова. — Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2023. – С. 164-168.

76. Ефимушкин Н.А., Орлов С.П. Организация системы технического обслуживания рельсового пути с использованием искусственной нейронной сети/ Ефимушкин Н.А., Орлов С.П. // Математические методы в технологиях и технике. – 2025. – № 5. – С. 102-108.

77. Ефимушкин Н.А., Орлов С.П. Управление техническим обслуживанием железнодорожного рельсового пути с применением искусственной нейронной сети / Ефимушкин Н.А., Орлов С.П. // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2025. – №74(100). – С. 95-100.

78. Диагностический комплекс инфраструктуры «ЭРА+» [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — Инфотранс. – Режим доступа: <https://infotrans-logistic.ru/dki> (дата обращения: 08.09.2025).

79. Дальневосточная железная дорога [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — РЖД. – Режим доступа: <https://dvzd.rzd.ru/ru/2174> (дата обращения: 08.09.2025).

80. Куйбышевская железная дорога [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — РЖД. – Режим доступа: <https://kbsh.rzd.ru/ru/3404> (дата обращения: 29.12.2025).

81. Распоряжение ОАО РЖД от 13.12.2013 № 2758р Об утверждении и введении в действие «Положения об участковой системе текущего содержания пути» [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — Система нормативных документов «Меганорм». – Режим доступа:

https://meganorm.ru/mega_doc/norm/perechen/2/polozhenie_ob_uchastkovoy_sisteme_tekushchego_soderzhaniya.html (дата обращения: 10.09.2025).

82. Структурная форма организационного построения дистанции пути [Электронный ресурс] // Vuzlit. – Режим доступа: https://vuzlit.com/1186225/strukturnaya_forma_organizatsionnogo_postroeniya_distant_sii_puti#789 (дата обращения: 08.09.2025).

83. Приложение № 10 к Инструкции по движению поездов и маневровой работе на железнодорожном транспорте Российской Федерации. Организация работы ДНЦ [Электронный ресурс] // Orgperevozok. – Режим доступа: <https://orgperevozok.ru/idp/prilozhenie-10-organizaciya-raboty-dnc.html> (дата обращения: 10.09.2025).

84. Распоряжение филиала ОАО РЖД «Центральная дирекция инфраструктуры» от 21.06.2023 № 558р О совершенствовании порядка контроля и оценки технического состояния элементов верхнего строения пути, путевых устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. – 2023. – 119 с.

85. Неисправности пути. [Электронный ресурс] // Helpiks. – Режим доступа: <https://helpiks.org/7-21838.html> (дата обращения: 10.09.2025).

86. Диок А.В. Осмотр железнодорожного пути – степени неисправностей [Электронный ресурс] / А.В. Диок // Сайты Google. – Режим доступа: <https://sites.google.com/view/npuspk-kontrol/главная/грк/степени-неисправностей> (дата обращения: 10.09.2025).

87. Распоряжение ОАО РЖД от 29.11.2019 № 2675р Об утверждении Положения об организации комплексного обслуживания объектов инфраструктуры хозяйства пути и сооружений. – М., 2019. – 171 с.

88. Беседина А.Р., Медведева Е.М. Виды работ при организации текущего содержания пути / А.Р. Беседина, Е.М. Медведева // Научный Лидер. Рубрика «Технические науки». – 2021. – № 42 (44). URL: <https://scilead.ru/article/1264-vidi-rabot-pri-organizatsii-tekushchego-soder>.

89. Распоряжение ОАО РЖД от 12.12.2017 № 2580р О вводе в действие Регламента взаимодействия работников, связанных с движением поездов, с

работниками локомотивных бригад при возникновении аварийных и нестандартных ситуаций на путях общего пользования инфраструктуры ОАО РЖД [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — Информационно-правовой портал Гарант. — Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71754780/> (дата обращения: 14.09.2025).

90. Вагон испытания контактной сети (ВИКС) [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — Инфотранс. — Режим доступа: <https://infotrans-logistic.ru/viks> (дата обращения: 14.01.2026).

91. Распоряжение ОАО РЖД от 14.11.2016 № 2288р Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути. — 2016. — 236 с.

92. Распоряжение ОАО РЖД от 14.12.2016 № 2544р Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. — 2016. — 185 с.

93. Распоряжение ОАО РЖД от 25.02.2019 № 348р Инструкция о порядке планирования, разработки, предоставления и использования технологических «окон» для ремонтных и строительно-монтажных работ на железных дорогах ОАО РЖД [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — Система нормативных документов «Меганорм». — Режим доступа: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/akt_forma/0/instruktsiya_o_poryadke_planirovaniya_razrabotki.html (дата обращения: 10.09.2025).

94. Real-Time Obstacle Detection Over Railway Track using Deep Neural Networks / Fahim Ur Rahmana, Md. Tanvir Ahmeda, Md. Mehedi Hasana, Nusrat Jahanb // *Procedia Computer Science*. — 2022. — Vol. 215, № 3. — P. 289-298.

95. Online Rail Fastener Detection Based on YOLO Network / Jun Li, Xinyi Qiu, Yifei Wei¹, Mei Song, Xiaojun Wang // *Computers, Materials & Continua*. — 2022. — Vol. 72, № 3. — P. 5955-5967.

96. Rail fastener detection of heavy railway based on deep learning / Yuan Cao, Zihao Chen, Tao Wen, Clive Roberts et al. // *High-speed Railway*. — 2023. — Vol. 1, № 1. — P. 63-69.

97. Yongzhi Min, Jiafeng Li, Yaxing Li. Rail Surface Defect Detection Based on Improved UPerNet and Connected Component Analysis / Yongzhi Min, Jiafeng Li, Yaxing Li // Computers, Materials & Continua. – 2023. – Vol. 77, № 1. – P. 941-962.

98. Орлов С.П., Сусарев С.В. Система поддержки принятия решений при управлении техническим обслуживанием автономных транспортных средств / Орлов С.П., Сусарев С.В. // Онтология проектирования. – 2023. – Т.12, №1. – С. 117-128. DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-1-117-128.

99. В.П. Димитров, Л.В. Борисова, Б.Б. Жмайлов Построение онтологии технического сервиса в агропромышленном комплексе / В.П. Димитров, Л.В. Борисова, Б.Б. Жмайлов // Вестник ДГТУ. – 2011. – Т.11, №10. – С. 1771-1779.

100. OWL — Web Ontology Language [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — Онтограф. Системы организации знаний. – Режим доступа: <https://ontograph.ru/owl> (дата обращения: 14.01.2026).

101. Устройство верхнего строения железнодорожного пути [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — Металл. – Режим доступа: <https://e-metall.ru/blog/ustroystvo-verkhnego-stroeniya-zheleznodorozhnogo-puti> (дата обращения: 14.01.2026).

102. Нижнее строение пути. Классификация искусственных сооружений и основные принципы их строительства [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — Уральская железнодорожная компания. О железной дороге. – Режим доступа: <http://rail.uzdk.ru/stroenie-puti/nizhnee-stroenie-puti-klassifikaciya-iskusstvennyh-sooruzhenij-i-osnovnye-principy-ih-stroitelstva> (дата обращения: 14.01.2026).

103. Щербаков В.В. Исследование мобильного лазерного сканера «Сканпуть» при определении геопространственного положения железнодорожного пути / Щербаков В.В. // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Том 25, № 2. – С.98-108. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-2-98-108.

104. Ультразвуковой контроль рельсового полотна [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — НТД Контроль. – Режим доступа: <https://ndt->

control.ru/2018/05/19/ultrazvukovoj-kontrol-relsovogo-polotna (дата обращения: 14.01.2026).

105. Виды ремонта железнодорожных путей верхнего строения ЖД пути [Электронный ресурс] // Промпутьснабжение. – Режим доступа: https://promputs nab.ru/company/articles/zheleznaya_doroga/970 (дата обращения: 08.09.2025).

106. Виды путевых инструментов [Электронный ресурс] // Промпутьснабжение. – Режим доступа: https://promputs nab.ru/company/articles/stati_o_mvsp/949 (дата обращения: 15.01.2026).

107. W3C Recommendation 10 February 2004 Resource Description Framework (RDF): Concepts and Abstract Syntax [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — W3C. – Режим доступа: <https://www.w3.org/TR/rdf10-concepts> (дата обращения: 15.01.2026).

108. Class Expression Syntax [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — Protégé 5 Documentation. – Режим доступа: <https://www.w3.org/TR/rdf10-concepts> (дата обращения: 16.01.2026).

109. Правила логического вывода SWRL, SPIN, SHACL [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — Тринидата. – Режим доступа: https://trinidad.ru/tech_swrl.htm (дата обращения: 16.01.2026).

110. Илья Морозов Анализ и сравнение работы различных Reasoner'ов в Protégé [Электронный ресурс] / Илья Морозов // Academia - Режим доступа: https://www.academia.edu/9280798/Анализ_и_сравнение_работы_различных_Reasoner_ов_в_Protégé (дата обращения: 17.01.2026).

111. Детекция объектов в компьютерном зрении (CV) [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — Data Light. – Режим доступа: <https://data-light.ru/blog/detekciya-obektov-v-kompyuternom-zrenii> (дата обращения: 20.01.2026).

112. Куцев Роман Десять лучших опенсорсных инструментов аннотирования 2021 года для Computer Vision [Электронный ресурс] / Куцев Роман // Хабр. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/665684> (дата обращения: 20.01.2026).

113. Joseph Nelson LabelImg for Labeling Object Detection Data [Электронный ресурс] / Joseph Nelson // Roboflow. – Режим доступа: <https://blog.roboflow.com/labelimg> (дата обращения: 20.01.2026).

114. TensorFlow 1 Detection Model Zoo [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — Github. – Режим доступа: https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/g3doc/tf1_detection_zoo.md (дата обращения: 22.01.2026).

115. Jacob Solawetz An Introduction to the COCO Dataset [Электронный ресурс] / Jacob Solawetz // Roboflow. – Режим доступа: <https://blog.roboflow.com/coco-dataset> (дата обращения: 22.01.2026).

116. Китов В.В. Модель YOLO [Электронный ресурс] / Китов В.В. // Машинное и глубокое обучение. Онлайн-учебник. – Режим доступа: <https://deeplearning.ru/docs/Neural-networks/Object-detection/YOLO> (дата обращения: 22.01.2026).

117. Гетманская Александра, Кустикова Валентина Методы глубокого обучения и примеры их практического применения для решения задач компьютерного зрения [Электронный ресурс] / Гетманская Александра, Кустикова Валентина. — Электрон. текстовые данные. — Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского – Режим доступа: https://hpc-education.unn.ru/files/courses/intel-dl-cv-course/Rus/Lectures/Presentations/04_ObjectDetection_Rus_pptx.pdf (дата обращения: 22.01.2026).

118. Китов В.В. Модель SSD [Электронный ресурс] / Китов В.В. // Машинное и глубокое обучение. Онлайн-учебник. – Режим доступа: <https://deeplearning.ru/docs/Neural-networks/Object-detection/SSD> (дата обращения: 22.01.2026).

119. Dmytro Panchenko MobileNet: меньше, быстрее, точнее [Электронный ресурс] / Dmytro Panchenko // Хабр. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/352804> (дата обращения: 22.01.2026).

120. TensorFlow Object Detection API [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — Github. — Режим доступа: https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/README.md (дата обращения: 22.01.2026).

121. Adrian Rosebrock Object detection: Bounding box regression with Keras, TensorFlow, and Deep Learning [Электронный ресурс] / Adrian Rosebrock // pyimagesearch. — Режим доступа: <https://pyimagesearch.com/2020/10/05/object-detection-bounding-box-regression-with-keras-tensorflow-and-deep-learning> (дата обращения: 22.01.2026).

122. Raúl Gombu Understanding Categorical Cross-Entropy Loss, Binary Cross-Entropy Loss, Softmax Loss, Logistic Loss, Focal Loss and all those confusing names [Электронный ресурс] / Raúl Gombu // Raúl Gómez blog. — Режим доступа: https://gombu.github.io/2018/05/23/cross_entropy_loss (дата обращения: 22.01.2026).

123. Khiyati Top 7 Loss Functions to Evaluate Regression Models [Электронный ресурс] / Khiyati // Analytics Vidhya. — Режим доступа: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2019/08/detailed-guide-7-loss-functions-machine-learning-python-code> (дата обращения: 22.01.2026).

124. Реализуем и сравниваем оптимизаторы моделей в глубоком обучении [Электронный ресурс] // SkillFactory. Школа Computer Science. - Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/skillfactory/blog/525214> (дата обращения: 22.01.2026).

125. Трансферное обучение и тонкая настройка [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — Tensorflow. — Режим доступа: https://www.tensorflow.org/tutorials/images/transfer_learning?hl=ru (дата обращения: 22.01.2026).

126. TensorBoard: набор инструментов для визуализации TensorFlow. [Электронный ресурс] // TensorFlow. - <https://www.tensorflow.org/tensorboard> (дата обращения: 22.01.2026).

127. COCO Object Detection Evaluation Metrics [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — COCO – Common Objects in Context. — Режим доступа: <https://cocodataset.org/#detection-eval> (дата обращения: 23.01.2026).

128. Sovit Ranjan Rath Evaluation Metrics for Object Detection [Электронный ресурс] / Sovit Ranjan Rath // Debugger Cafe. – Режим доступа: <https://debuggercafe.com/evaluation-metrics-for-object-detection> (дата обращения: 22.01.2026).

129. Основные метрики задач классификации в машинном обучении [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — Webiomed. – Режим доступа: <https://webiomed.ru/blog/osnovnyie-metriki-zadach-klassifikatsii-v-mashinnom-obuchenii> (дата обращения: 24.01.2026).

130. Lp_solve 5.5.2.5 reference guide [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — Massachusetts Institute of Technology. – Режим доступа: <https://web.mit.edu/lpsolve/doc> (дата обращения: 13.01.2026).

131. LPSolve IDE [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — Massachusetts Institute of Technology. – Режим доступа: <https://web.mit.edu/lpsolve/doc/IDE.htm> (дата обращения: 13.01.2026).

132. Feature Overview - OpenVINOTM documentation [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные. — OpenVINO. – <https://docs.openvino.ai> (дата обращения: 24.01.2026).

ПРИЛОЖЕНИЕ А
ФРАГМЕНТЫ ОНТОЛОГИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
РЕЛЬСОВОГО ПУТИ

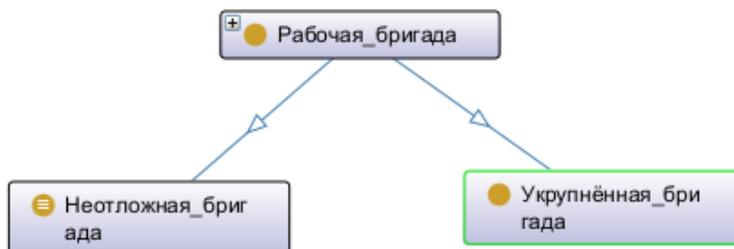


Рисунок ПА.1 – OWL-диаграмма понятия «Персонал»



Рисунок ПА.2 – OWL-диаграмма понятия «Эксплуатационный участок»

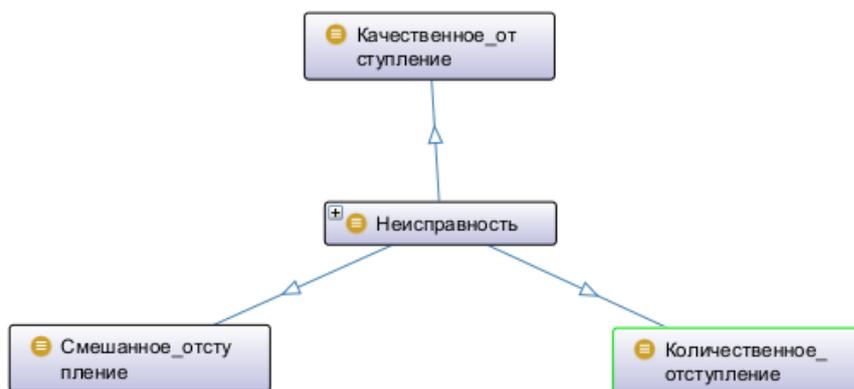


Рисунок ПА.3 – OWL-диаграмма понятия «Неисправность»

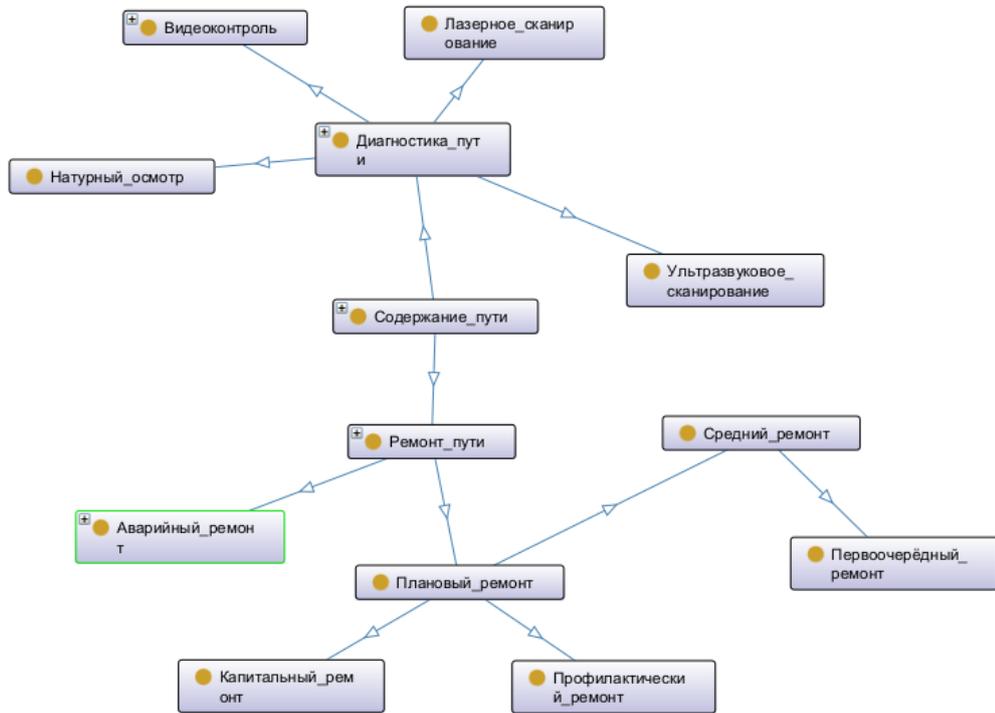


Рисунок ПА.4 – OWL-диаграмма понятия «Содержание пути»

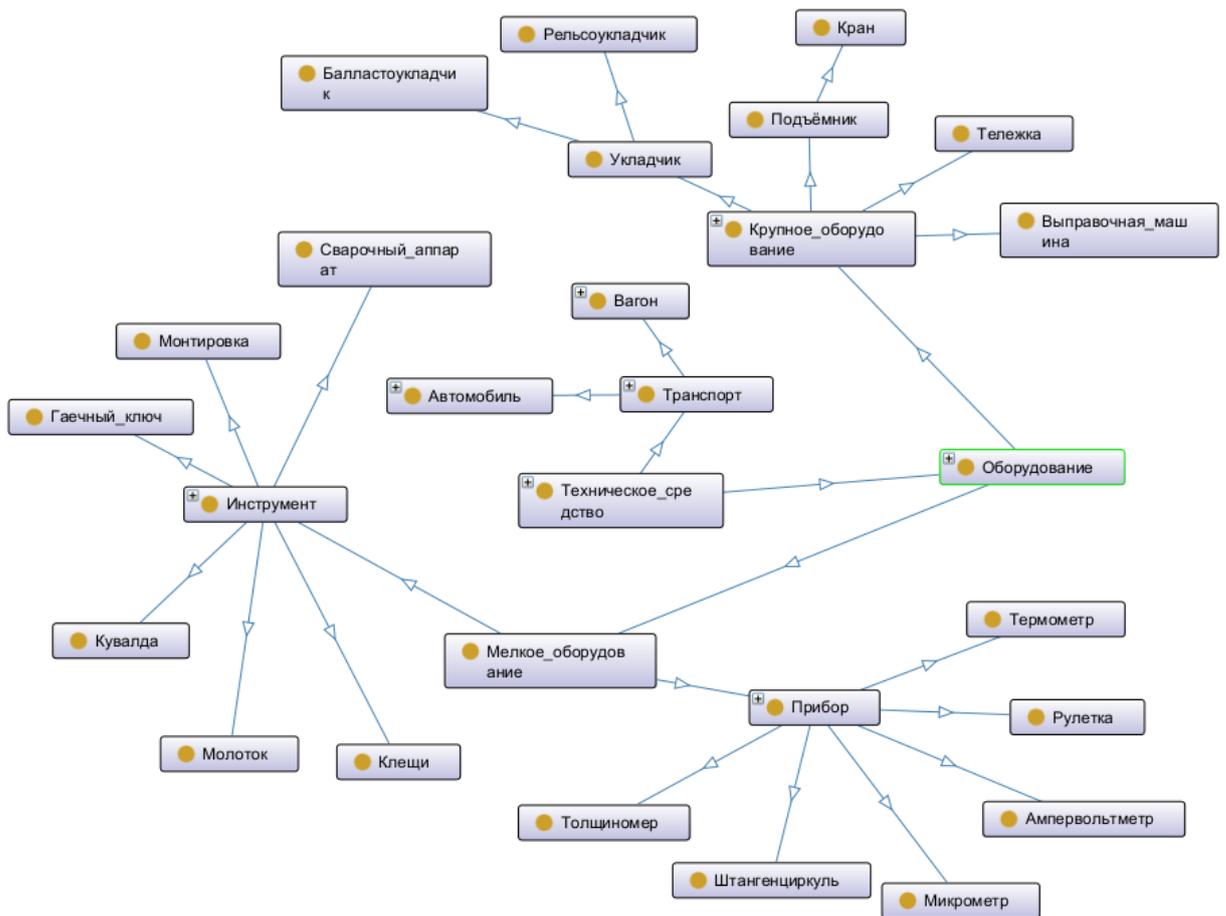


Рисунок ПА.5 – OWL-диаграмма понятия «Техническое средство»

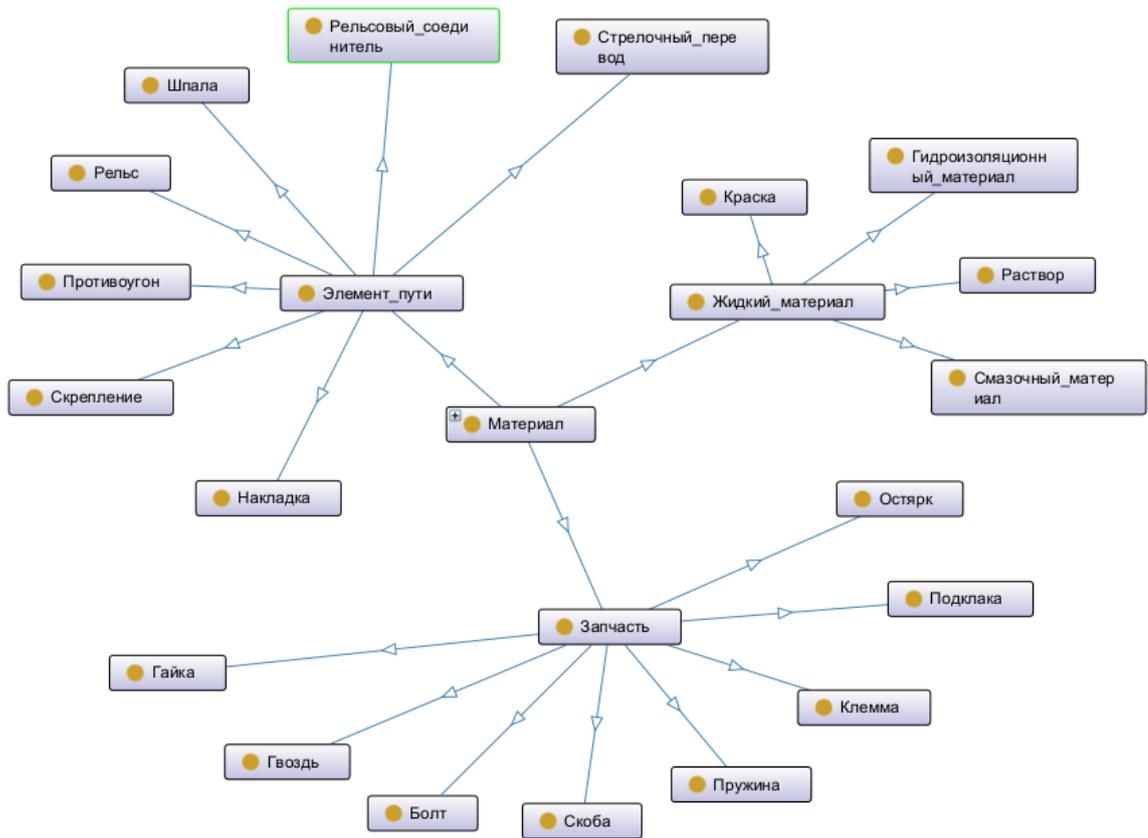


Рисунок ПА.6 – OWL-диаграмма понятия «Материал»

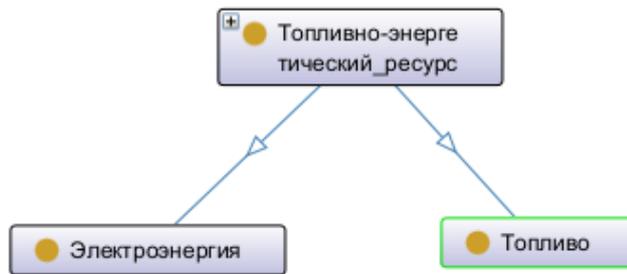


Рисунок ПА.7 – OWL-диаграмма понятия «Топливо-энергетический ресурс»

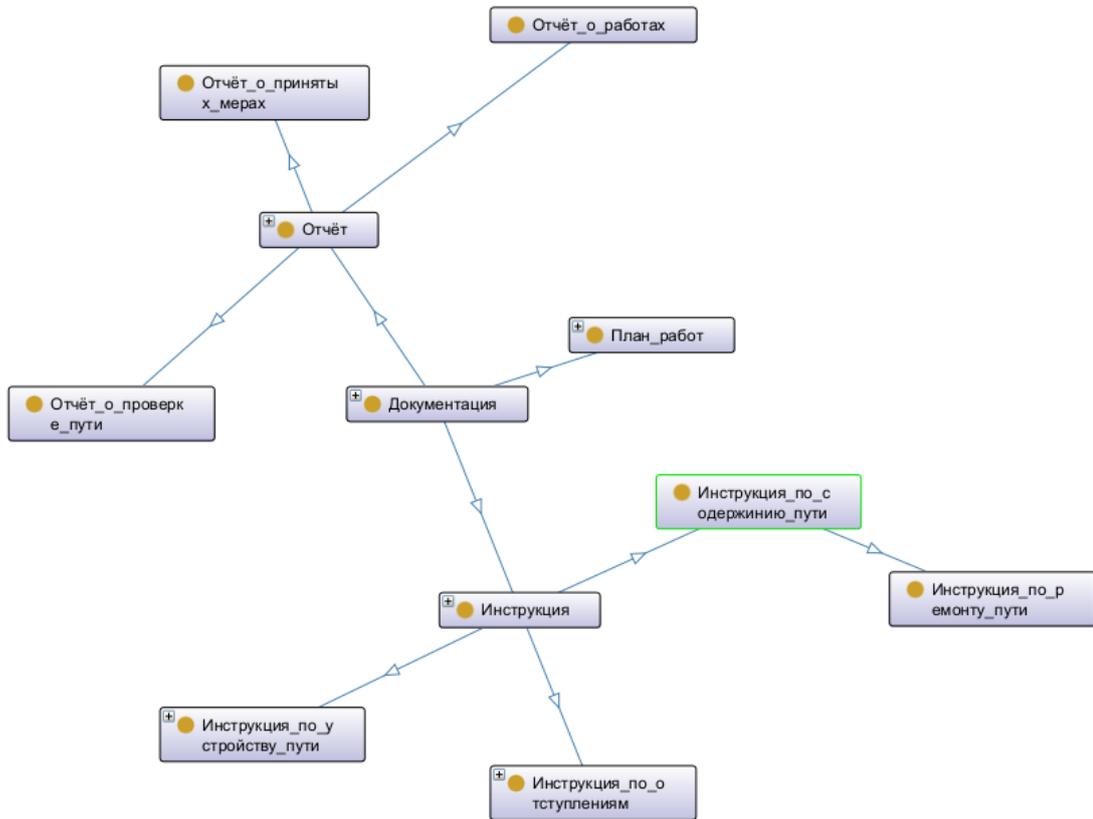


Рисунок ПА.8 – OWL-диаграмма понятия «Документация»

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
ОПИСАНИЕ НАБОРОВ ДАННЫХ МОДЕЛЕЙ НЕЙРОСЕТЕВЫХ
ДЕТЕКТОРОВ

Таблица ПБ.1 — Описание датасета модели ОВJ

| Имя класса | Значение класса | Количество объектов в датасете |
|-----------------------|---|---------------------------------------|
| 14_buks | Пробуксовка рельса | 319 |
| 20_1 | Выкол головки рельса | 3132 |
| ars_mono | Монорегулятор скрепления АРС | 2085 |
| ars_no_mono | Отсутствие монорегулятора скрепления АРС | 3271 |
| bind_missing | Отсутствующее скрепление без типа | 1271 |
| bolt_unscrewed | Раскрученная гайка на болте скрепления КБ | 159 |
| bracket_box | Обратная скоба заземления опоры | 42 |
| concr_crack | Трещина в железобетонной шпале | 1128 |
| concr_crossing | Железобетонный железнодорожный переезд | 186 |
| concr_small_crack | Маленькая трещина в железобетонной шпале | 603 |
| crutch | Противоугол | 243 |
| dhr | Дефект поверхности катания | 575 |
| do | Скрепление ДО | 869 |
| fp_crack | Излом накладки | 28 |
| fp_crack_side | Надрыв торца накладки | 32 |
| fp_end | Торец накладки | 2776 |
| frog | Крестовина стрелочного перевода | 1840 |
| frog_mov | Крестовина автоматического стрелочного перевода | 221 |
| hole_do | Отсутствие костыля в скреплении ДО | 526 |
| hole_square | Отсутствие болта в скреплении КБ | 594 |
| jack_balk | Отбойный брус | 399 |
| jbr_bracket | Скоба скрепления ЖБР | 4371 |
| jbr_bracket_unscrewed | Раскрученная гайка на болте скобы скрепления ЖБР | 83 |
| jbr_plate | Отсутствующее скрепление ЖБР | 231 |
| joint | Рельсовый стык | 2164 |
| joint_dhr | Дефект поверхности катания рельса в области стыка | 777 |
| kb | Скрепление КБ | 13757 |
| kb105 | Скрепление КБ с клеммой ОП-105 | 1198 |
| kb105_defect | Отсутствие клеммы ОП-105 | 72 |
| kb_defect2 | Отсутствие болта в скреплении КБ | 531 |
| kb_no_bracket | Отсутствие клеммы у скрепления КБ | 1746 |
| kb_twist | Разворот подкладки | 96 |
| kd65 | Скрепление КД65 | 131 |

| | | |
|---------------------|--|-------|
| mlv_add | Дополнительная риска маячной метки | 5524 |
| mlv_base | Основная риска маячной метки | 6030 |
| nail_pulled | Поддёрнутый костыль скрепления ДО | 86 |
| nut | Болт с гайкой | 37801 |
| pandrol | Скрепление Пандрол | 2024 |
| pandrol_missing | Отсутствие клеммы у скрепления Пандрол | 202 |
| pandrol_no_cap | Отсутствие прижимного изолятора у скрепления Пандрол | 107 |
| platform | Платформа | 383 |
| plug_ropе | Штепсель с проводом | 1300 |
| rail | Рельс | 26901 |
| rail_switch | Рельс в стрелочном переводе | 1838 |
| rope_half | Частично порванный провод | 164 |
| rope_shift | Провод, уходящий под рельс | 73 |
| rope_soil | Провод, уходящий в землю | 91 |
| sb3 | Скрепление СБЗ | 3627 |
| sb3_missing | Отсутствие клеммы у скрепления СБЗ | 139 |
| sb3_plate | Пластина скрепления СБЗ | 2956 |
| spring | Пружинная клемма | 6889 |
| spring_reversed | Развёрнутая пружинная клемма | 71 |
| tie_concr | Железобетонная шпала | 48714 |
| tie_concr_break | Разрушенная железобетонная шпала | 68 |
| tie_concr_destroyed | Скол на железобетонной шпале | 2362 |
| tie_concr_split | Раскол железобетонной шпалы | 47 |
| tie_wood | Деревянная шпала | 2078 |
| tie_wood_destroyed | Разрушенная деревянная шпала | 55 |
| tongue_end | Остряк стрелочного перевода | 2940 |
| ucspс | УКСПС | 52 |
| vossloh | Скрепление Фосло | 6146 |
| vossloh_defect | Отсутствие болта у скрепления Фосло | 162 |
| vossloh_reversed | Развёрнутая на 180° клемма скрепления Фосло | 115 |
| vossloh_twist | Повёрнутая клемма скрепления Фосло | 59 |
| wood_crack | Трещина в деревянной шпале | 1365 |

Таблица ПБ.2 — Описание датасета модели JLV

| Имя класса | Значение класса | Количество объектов в датасете |
|--------------|--|--------------------------------|
| 10_1 | Отслоение поверхности рельса в зоне стыка | 22 |
| 10_2 | Отслоение поверхности рельса | 45 |
| 14 | Пробуксовка рельса | 20 |
| 17_1 | Выкашивание поверхности рельса в зоне стыка | 1250 |
| 17_1_vics | Выкашивание поверхности рельса в зоне стыка | 40 |
| 17_2 | Выкашивание поверхности рельса | 108 |
| 18_1 | Смятие рельса в зоне стыка | 321 |
| 18_2 | Смятие рельса | 9 |
| 20_1 | Выкол головки рельса в зоне стыка | 10 |
| 20_2 | Выкол головки рельса | 91 |
| broken_spike | Растрёпанный провод рельсового соединителя | 226 |
| conn_cut | Оторванный с одного конца рельсовый соединитель | 1203 |
| conn_missing | Отсутствующий рельсовый соединитель | 963 |
| conn_normal | Нормальный рельсовый соединитель | 1592 |
| conn_no_rope | Отсутствие одного из концов или провода у рельсового соединителя | 264 |
| isolation | Изолирующий стык | 1338 |
| rail | Рельс | 20979 |
| rail_weld | Зона рельса у сварного стыка | 1496 |
| sub_joint | Стык на подошве рельса | 5623 |
| weld | Сварной стык | 1456 |

Таблица ПБ.3 — Описание датасета модели BLT

| Имя класса | Значение класса | Количество объектов в датасете |
|----------------|---|--------------------------------|
| bolt | Шляпка болта | 23971 |
| bolt_crack | Шляпка болта со сколотым участком | 131 |
| bolt_stick_out | Поддёрнутая шляпка болта | 190 |
| check_crack | Излом рельсовой накладке | 175 |
| crack | Трещина в рельсовой накладке | 375 |
| fp | Рельсовая накладке | 10783 |
| half_crack | Надрыв торца рельсовой накладке | 174 |
| hole | Дырка в рельсовой накладке | 10451 |
| nut | Гайка с болтом на рельсовой накладке | 24096 |
| two_nut | Двойная гайка с болтом на рельсовой накладке | 35 |
| unscrewed_nut | Раскрученная гайка с болтом на рельсовой накладке | 381 |

ПРИЛОЖЕНИЕ В
ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАБОТЫ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ПО
МЕТРИКЕ F1

Таблица ПВ.1 — Значения меры F1, полученные для классов модели OBJ

| Имя класса | Точность F1 | Достоверность, при которой достигнута точность F1 |
|-----------------------|--------------------|--|
| 14_buks | 0,53 | 0,4 |
| 20_1 | 0,06 | 0,3 |
| ars_mono | 0,86 | 0,4 |
| ars_no_mono | 0,96 | 0,6 |
| bind_missing | 0,97 | 0,45 |
| bolt_unscrewed | 0,33 | 0,55 |
| bracket_box | 0,1 | 0,3 |
| concr_crack | 0,36 | 0,3 |
| concr_crossing | 1 | 0,6 |
| concr_small_crack | 0,11 | 0,2 |
| crutch | 0,59 | 0,4 |
| dhr | 0,03 | 0,15 |
| do | 0,95 | 0,55 |
| fp_crack | 0,29 | 0,3 |
| fp_crack_side | 0,25 | 0,3 |
| fp_end | 0,91 | 0,45 |
| frog | 0,98 | 0,5 |
| frog_mov | 1 | 0,35 |
| hole_do | 0,19 | 0,45 |
| hole_square | 0,91 | 0,5 |
| jack_balk | 0,87 | 0,45 |
| jbr_bracket | 0,91 | 0,5 |
| jbr_bracket_unscrewed | 0,53 | 0,55 |
| jbr_plate | 0,82 | 0,55 |
| joint | 0,7 | 0,5 |
| joint_dhr | 0,04 | 0,45 |
| kb | 0,93 | 0,55 |
| kb105 | 0,64 | 0,45 |
| kb105_defect | 0,28 | 0,6 |
| kb_defect2 | 0,94 | 0,45 |
| kb_no_bracket | 0,97 | 0,4 |
| kb_twist | 0,56 | 0,6 |
| kd65 | 0,69 | 0,7 |
| mlv_add | 0,66 | 0,6 |
| mlv_base | 0,93 | 0,5 |
| nail_pulled | 0,13 | 0,5 |
| nut | 0,92 | 0,5 |
| pandrol | 0,95 | 0,55 |
| pandrol_missing | 0,96 | 0,45 |
| pandrol_no_cap | 0,88 | 0,6 |

| | | |
|---------------------|------|------|
| platform | 0,98 | 0,65 |
| plug_rope | 0,8 | 0,6 |
| rail | 0,99 | 0,5 |
| rail_switch | 0,99 | 0,5 |
| rope_half | 0,01 | 0,35 |
| rope_shift | 0 | 0 |
| rope_soil | 0 | 0 |
| sb3 | 0,99 | 0,7 |
| sb3_missing | 0,89 | 0,45 |
| sb3_plate | 0,77 | 0,6 |
| spring | 0,96 | 0,5 |
| spring_reversed | 0,86 | 0,45 |
| tie_concr | 0,97 | 0,6 |
| tie_concr_break | 0,22 | 0,4 |
| tie_concr_destroyed | 0,52 | 0,4 |
| tie_concr_split | 0,14 | 0,35 |
| tie_wood | 0,94 | 0,5 |
| tie_wood_destroyed | 0,1 | 0,3 |
| tongue_end | 0,96 | 0,45 |
| ucsp | 0,6 | 0,55 |
| vossloh | 0,89 | 0,45 |
| vossloh_defect | 0,32 | 0,45 |
| vossloh_reversed | 0,90 | 0,5 |
| vossloh_twist | 0,36 | 0,3 |
| wood_crack | 0,3 | 0,45 |

Таблица ПВ.2 — Значения меры F1, полученные для классов модели JLV

| Имя класса | Точность F1 | Достоверность, при которой достигнута точность F1 |
|-------------------|--------------------|--|
| 10_1 | 0,4 | 0,45 |
| 10_2 | 0,46 | 0,35 |
| 14 | 0 | 0 |
| 17_1 | 0,41 | 0,5 |
| 17_1_vics | 0,4 | 0,55 |
| 17_2 | 0,52 | 0,35 |
| 18_1 | 0,64 | 0,6 |
| 18_2 | 0 | 0 |
| 20_1 | 0 | 0 |
| 20_2 | 0,57 | 0,35 |
| broken_spike | 0,71 | 0,4 |
| conn_cut | 0,92 | 0,45 |
| conn_missing | 0,91 | 0,35 |
| conn_normal | 0,86 | 0,5 |
| conn_no_rope | 0,88 | 0,55 |
| isolation | 0,96 | 0,5 |
| rail | 1 | 0,5 |
| rail_weld | 0,99 | 0,45 |
| sub_joint | 0,9 | 0,5 |
| weld | 0,99 | 0,45 |

Таблица ПВ.3 — Значения меры F1, полученные для классов модели BLT

| Имя класса | Точность F1 | Достоверность, при которой достигнута точность F1 |
|-------------------|--------------------|--|
| bolt | 0,97 | 0,4 |
| bolt_crack | 0,62 | 0,35 |
| bolt_stick_out | 0,6 | 0,45 |
| check_crack | 0,67 | 0,45 |
| crack | 0,74 | 0,5 |
| fp | 0,92 | 0,4 |
| half_crack | 0,67 | 0,5 |
| hole | 0,98 | 0,65 |
| nut | 0,99 | 0,5 |
| two_nut | 0,83 | 0,35 |
| unscrewed_nut | 0,88 | 0,35 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

ТЕКСТ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ МАТРИЦЫ ОШИБОК

```
from object_detection.utils.label_map_util import get_label_map_dict
from classes_storage import ClassesStorage
from detection_get_labeled import get_detected_objects
from choose_det_score import check_intersection
from extract_data import extract_record
from config_reader import Config
from ie_facade import IEFacade
from PIL import Image
import argparse
import logging
import numpy as np
import shutil
import os
from pprint import pprint
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn
import csv

JPG = '.jpg'
XML = '.xml'

def compute_confusion_matrix(images_root: str, detector: IEFacade, classes: list) -> np.ndarray:
    """Вычисление матрицы путаницы для набора изображений"""
    confusion_matrix = np.zeros(shape=(len(classes) + 1,) * 2, dtype=np.uint32)
    for path, dirs, files in os.walk(images_root):
        dirs.clear()
        for file in files:
            if file.endswith(JPG):
                img_path = os.path.join(images_root, file)
                xml_path = img_path.replace(JPG, XML)
```

```

# получение объектов из xml
ref_objects = []
xml_objects = get_detected_objects(xml_path)
for elem in xml_objects:
    ref_objects.append(elem)

# детектирование изображения
src = Image.open(img_path).convert('L')
img = src.resize((detector_width, detector_height), Image.BILINEAR)
data[0] = img
det_objects = []
for obj in detector.inference(data):
    label_id, score = obj[1:3]
    rect = [int(coord) for coord in obj[-4:]]
    if score > cl_scores[label_id - 1]:
        name = classes[label_id - 1]
        det_objects.append((name, *rect))
# заполняем матрицу найденными объектами
for ref_obj in ref_objects.copy():
    ref_cl = classes.index(ref_obj[0]) + 1
    founded = False
    for det_obj in det_objects.copy():
        det_cl = classes.index(det_obj[0]) + 1
        if check_intersection(ref_obj[1:], det_obj[1:], iou_thres=iou_score):
            confusion_matrix[ref_cl][det_cl] += 1
            founded = True
            det_objects.remove(det_obj)
    if founded:
        ref_objects.remove(ref_obj)
# добавляем пропуски
for obj in ref_objects:
    obj_cl = classes.index(obj[0]) + 1
    confusion_matrix[obj_cl][0] += 1
# добавляем ложные

```

```

for obj in det_objects:
    obj_cl = classes.index(obj[0]) + 1
    confusion_matrix[0][obj_cl] += 1
return confusion_matrix

```

```
def _create_argparser() -> argparse.ArgumentParser:
```

```

parser = argparse.ArgumentParser()
parser.add_argument('--dataset_name', type=str, help='путь к датасету')
parser.add_argument('--source', type=str, choices=['validation', 'test'], help='путь к данным')
parser.add_argument('--iou', type=float, default=0.5, help='intersection over union')
parser.add_argument('--score', type=float, default=0.3, help='пороговая достоверность классов')
parser.add_argument('-glob_scrs', '--use_global_scores', action='store_true',
                    help='использовать достоверности из global.cfg (вместо значения из --scores)')
parser.add_argument('-pref_scrs', '--use_preferred_scores', action='store_true',
                    help='использовать предпочтительные достоверности для модели')
parser.add_argument('--global_config', type=str, default="",
                    help='путь к global.cfg файлу, используется с флагом --use_global_scores')
parser.add_argument('--save_csv', action='store_true', help='сохранить результат в csv-файл')
parser.add_argument('--save_img', action='store_true',
                    help='сохранить результат в виде картинки')
return parser

```

```
if __name__ == '__main__':
```

```

parser = _create_argparser()
args = parser.parse_args()

dataset_name = args.dataset_name
save_path = os.path.join(r'..\%s' % dataset_name, 'confusion_matrix')
os.makedirs(save_path, exist_ok=True)
# источник данных
source = args.source
if source == 'validation':
    images_root = r'..\%s\tf\data_val.record' % dataset_name

```

```

elif source == 'test':
    images_root = r'..\%s\test_data' % dataset_name
else:
    print('Неверный тип источника данных')
    exit(-1)

ref_imgs_root = r'..\%s\%s_data' % (dataset_name, source)
if source == 'validation':
    extract_record(images_root, ref_imgs_root)
    images_root = ref_imgs_root

# получаем классы модели
model_dir = r'..\%s\model' % dataset_name
model_path = os.path.join(model_dir, 'OpenVINO', '%s.xml' % dataset_name)
classes_config = os.path.join(os.path.dirname(model_path), 'classes.pbtxt')
classes = list(get_label_map_dict(classes_config))

# получаем размеры кадра
image_files = os.listdir(images_root)
some_image = os.path.join(images_root, image_files[0])
orig_w, orig_h = Image.open(some_image).size

# достоверности
iou_score = args.iou
glob_score = args.score
use_global_scores = args.use_global_scores
use_preferred_scores = args.use_preferred_scores
if use_global_scores and use_preferred_scores:
    print("Нельзя одновременно использовать достоверности двух типов")
    exit(-1)
elif use_global_scores:
    logging.warning('start')
    cfg_path = args.global_config
    cfg = Config(cfg_path)
    cl_store = ClassesStorage(config=cfg, logger=logging.getLogger())

```

```

cl_scores = []
for cl in classes:
    cl_id = cl_store.get_id(cl)
    props = cl_store.class_properties(cl_id)
    score = props['score']
    cl_scores.append(score)
elif use_preferred_scores:
    scores_path = os.path.join(os.path.dirname(model_path), 'class_scores.txt')
    with open(scores_path) as scores_file:
        cl_data = scores_file.read()
        cl_scores = tuple(map(float, cl_data.split(', ')))
else:
    cl_scores = (glob_score,) * len(classes)

# загружаем модель
detector = IEFacade(model_path, image_shape=(orig_w, orig_h))
detector_height, detector_width = detector.input_shape[2:]

data = np.zeros(shape=(detector.batch_size, 1, detector_height, detector_width), dtype=np.uint8)

# детектируем объекты на изображениях и заполняем матрицу путаницы
confusion_matrix = compute_confusion_matrix(images_root, detector, classes)

# выводим матрицу
classes.insert(0, 'background')
print(', '.join(classes))
pprint(confusion_matrix.tolist())

if args.save_csv:
    # сохранение матрицы в csv-файл
    csv_path = os.path.join(save_path, 'confusion_matrix.csv')
    with open(csv_path, 'w') as csv_file:
        csv_writer = csv.writer(csv_file, delimiter=';', lineterminator='\n')
        csv_writer.writerow(['class_name'] + classes)
        for i, row in enumerate(confusion_matrix):

```

```

csv_writer.writerow([classes[i]] + row.tolist())

if args.save_img:
    # сохранение матрицы в виде тепловой карты
    heatmap_path = os.path.join(save_path, 'confusion_matrix.png')
    n = confusion_matrix.shape[0]
    diag_mask = np.eye(n, dtype=bool)
    off_diag_mask = ~diag_mask

    fig, ax = plt.subplots(figsize=(26, 18))
    vmin, vmax = data.min(), data.max()

    seaborn.heatmap(confusion_matrix, mask=diag_mask, xticklabels=classes, yticklabels=classes,
                    cbar=False, annot=True, linewidths=.5, fmt='d', annot_kws={"size": 16},
                    cmap='coolwarm', center=0, vmin=vmin, vmax=vmax, ax=ax)

    seaborn.heatmap(confusion_matrix, mask=off_diag_mask, xticklabels=classes,
                    yticklabels=classes, cbar=False, annot=True, linewidths=.5, fmt='d',
                    annot_kws={"size": 16}, cmap='YlOrRd', vmin=vmin, vmax=vmax, ax=ax)
    ax.xaxis.tick_top()
    ax.tick_params(axis='x', rotation=90, labelsize=16)
    ax.tick_params(axis='y', rotation=0, labelsize=16)
    ax.set_title(f'Confusion matrix of {dataset_name.upper()} for {source} data', fontsize=26)
    plt.savefig(heatmap_path)

# удаляем распакованные данные
if source == 'validation':
    shutil.rmtree(ref_imgs_root)

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ

| | | |
|---|--|----------|
|  ИНФОТРАНС <small>ОСНОВАН В 1990 ГОДУ</small> | <small>АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР ИНФОРМАЦИОННЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ (АО НПЦ ИНФОТРАНС)</small> | |
| 443001, г. Самара, ул. Полевая, 47 Тел. (846) 337 51 26, факс (846) 337 52 18 E-mail: office@infotrans-logistic.ru www.infotrans-logistic.ru |   | |
| № _____ | на № _____ | от _____ |

УТВЕРЖДАЮ



Первый заместитель генерального
директора АО НПЦ ИНФОТРАНС

О.Б. Симаков

« 28 » января 2026 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Ефимушкина Николая Андреевича
«Интеллектуальная система поддержки принятия решений при
управлении техническим обслуживанием рельсового пути железной
дороги», представленной на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Комиссия в составе заместителя генерального директора Седелкина Ю.А. и начальника департамента разработки информационно-аналитических систем к.т.н. Ефремова Д.В. составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Ефимушкина Н.А. использованы в процессе производственной деятельности организации.

1. Искусственная нейронная сеть, разработанная автором, использована в штатном программном обеспечении диагностических комплексов инфраструктуры (ДКИ) производства АО НПЦ ИНФОТРАНС для обработки в реальном времени видеоданных о состоянии элементов верхнего строения железнодорожного пути и распознавания дефектов. В результате натурных экспериментов для основной модели детектора ОВJ получены следующие характеристики: средневзвешенная точность mean average precision (mAP) при intersection over union (IoU) равном 0,5 $mAP_{IoU=0,5} = 0,61$, средневзвешенный отклик mean average recall (mAR) для 10 самых достоверных объектов $mAR_{10} = 0,51$, мера $F1 = 0,71$.

2. Сформулированная автором задача оптимального назначения рабочих бригад использована в функциональном модуле принятия решений по устранению неисправностей в информационно-измерительной системе контроля станционной инфраструктуры (ИИС КСИ) на подконтрольном

линейном участке Самара—Кинель Куйбышевской железной дороги. Получено сокращение времени на техническое обслуживание и ремонт дефектов рельсового пути в среднем на 12% по сравнению с неавтоматизированным распределением бригад в предыдущие периоды времени.

3. Опытный образец системы поддержки принятия решений в организации работ по техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР) железнодорожного пути использован в функциональном модуле ИИС КСИ при анализе проверок на участках Самара—Кинель, Сызрань I—Новоспасское, Канаевка—Пенза II, Жигулёвское море—Тольятти, Жигули-Новокуйбышевская—Звезда-Чапаевск и показал работоспособность и соответствие требованиям регламента.

Заместитель
генерального директора



Ю.А. Седелкин

Начальник департамента
разработки
информационно-аналитических
систем, к.т.н.



Д.В. Ефремов



Утверждаю:
Первый проректор -
проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «СамГТУ»
д.э.н., доцент
Овчинников Д.Е.

«20» января 2026 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
Ефимушкина Николая Андреевича
«Интеллектуальная система поддержки принятия решений при управлении техническим
обслуживанием рельсового пути железной дороги» в учебном процессе ФГБОУ ВО
«Самарский государственный технический университет»

Комиссия в составе начальника учебного управления к.э.н., доцента Алонцевой Е.А., директора Института автоматизации и информационных технологий д.т.н., профессора Савельева К.В., зав. кафедрой «Информатика и вычислительная техника» к.х.н., доцента Чувакова А.В. составила настоящий акт о том, что результаты, полученные в рамках диссертационной работы Ефимушкина Н.А., использованы в учебном процессе на кафедре «Информатика и вычислительная техника» СамГТУ при подготовке по программам бакалавриата и магистратуры по направлениям 09.03.01 и 09.04.01 - «Информатика и вычислительная техника» и 09.03.04 – «Программная инженерия».

Результаты научных исследований, полученные в виде задач оптимизации ресурсов в системах поддержки принятия решений и методики классификации отступлений элементов рельсового пути на основе искусственных нейронных сетей, использованы в лекционных курсах и проведении практических занятий по дисциплинам «Теория принятия решений», «Машинное и глубокое обучение» и «Системы искусственного интеллекта».

Реализация полученных автором результатов исследований позволила повысить эффективность и качество учебного процесса.

Начальник учебного управления
СамГТУ, к.э.н. доцент

 Е.А. Алонцева

Директор ИАИТ, д.т.н., профессор

К.В. Савельев

Зав. кафедрой «Информатика и
вычислительная техника», к.х.н.,
доцент

А.В. Чуваков

ПРИЛОЖЕНИЕ Е
СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ
ПРОГРАММЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИНЦИДЕНТОВ ВСП

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025663666

**Программа формирования инцидентов верхнего
строения рельсового пути**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический
университет» (RU)**

Автор(ы): **Ефимушкин Николай Андреевич (RU)**

Заявка № **2025662555**

Дата поступления **20 мая 2025 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **29 мая 2025 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 0692e761a2310c1b5442401670cc02026
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов