

На правах рукописи



**Ефимушкин Николай Андреевич**

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

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации,  
статистика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2026

Работа выполнена на кафедре «Информатика и вычислительная техника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара

**Научный руководитель:** **Орлов Сергей Павлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информатика и вычислительная техника» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара

**Официальные оппоненты:** **Бессмертный Игорь Александрович**, доктор технических наук, профессор, профессор факультета программной инженерии и компьютерной техники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург

**Головнин Олег Константинович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Медицинская физика, математика и информатика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет», г. Самара

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж

Защита состоится «4» июня 2026 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета 24.2.377.02 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, ауд. 200.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, ФГБОУ ВО «СамГТУ», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.02. Тел. (846) 337-04-43, e-mail: d24237702@samgtu.ru. В отзыве просим указывать почтовый адрес, номер телефона, электронную почту, наименование организации, должность, шифр и наименование научной специальности.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ» и на сайте диссертационного совета 24.2.377.02 <https://d24237702.samgtu.ru/>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.377.02  
к.ф.-м.н., доцент



М.Н. Саушкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**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, и зарубежных исследователей K.Heldman, H.Kerzner, G.J.Klir, Y. Shoham, K. Leyton-Brown, M. Mesarovic, Y.Takahara и другие.

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, B. Le, J. Sheng, D. Prescott и другие.

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 и другие.

**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».

**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 [1, 7, 8, 12], для распознавания дефектов рельсовых скреплений [3, 10], для распознавания элементов инфраструктуры контактной сети железной дороги [2, 9]; постановка и решение задачи оптимального назначения рабочих бригад на ремонт рельсового пути [4, 11].

**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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* обоснована актуальность темы исследования, определены цели и задачи исследования, сформулирована научная новизна полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

*В первой главе* выполнен системный анализ процессов управления техническим обслуживанием железнодорожных путей. Рассмотрена организационная структура железной дороги и выявлены проблемы при проведении технического обслуживания и ремонта верхнего строения пути (ТОиР ВСП). Изучены существующие методы и модели управления производственно-транспортными системами, оптимизации длительности технологических окон, определения оптимальных процедур с точки зрения минимизации затрат на ТОиР.

На основе выполненного системного анализа проведено формальное описание организационной структуры системы технического обслуживания рельсового пути, которое включает следующие положения. На эксплуатационном участке находится множество линейных участков  $LP = \{lp_i\}$ ,  $i = \overline{1, I}$ , и  $RM = \{rm_i\}$  – множество дорожных мастеров линейных участков. Каждый линейный участок  $lp_i$  характеризуется длиной  $LP_i$ , а эксплуатационный участок – длиной  $L^{OS}$ , при этом величина  $LP_i$ , не может превышать  $L^{OS}$ :  $LP_i \leq L^{OS}$ . На  $i$ -м линейном участке расположено множество рабочих отделений  $WD = \{wd_{ij}\}$ ,  $j = \overline{1, J}$ . Множество рабочих бригад включает в себя две группы: неотложные бригады и укрупненные бригады: а)  $WB = \{wb_{ijn}\}$ ,  $n = \overline{1, N}$  – множество неотложных бригад, приписанных к  $j$ -му рабочему отделению на  $i$ -м линейном участке и  $mb_{ijn}$  – число монтеров в составе  $n$ -ой неотложной рабочей бригады в  $j$ -ом рабочем отделении на  $i$ -ом линейном участке; б)  $WU = \{wu_p\}$ ,  $p = \overline{1, P}$  – множество укрупнённых бригад, выполняющих планово-предупредительные и крупные по объёму первоочередные работы, и  $mu_p$  – число монтеров пути в составе  $p$ -ой укрупнённой бригады.

Выполнен анализ основных характеристик дефектов рельсового пути и показано, что главной задачей является оперативное распознавание наличия неисправностей и классификация типов дефектов. Рассмотрены известные подходы к использованию методов искусственного интеллекта для обнаружения и классификации дефектов рельсового пути.

На основе проведенного анализа сформулированы задачи построения системы поддержки принятия решений, обеспечивающей оперативное управление устранением неисправностей пути с помощью рабочих бригад с учетом имеющихся ресурсов. Предложена обобщенная структура системы управления ТОиР рельсового пути с разрабатываемой СППР (рисунок 1). На

рисунке 1 показаны 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,  $T^o$  – технологические окна,  $X$  – выходные данные СППР,  $w_1, \dots, w_n$  – бригады, назначенные для обслуживания пути.

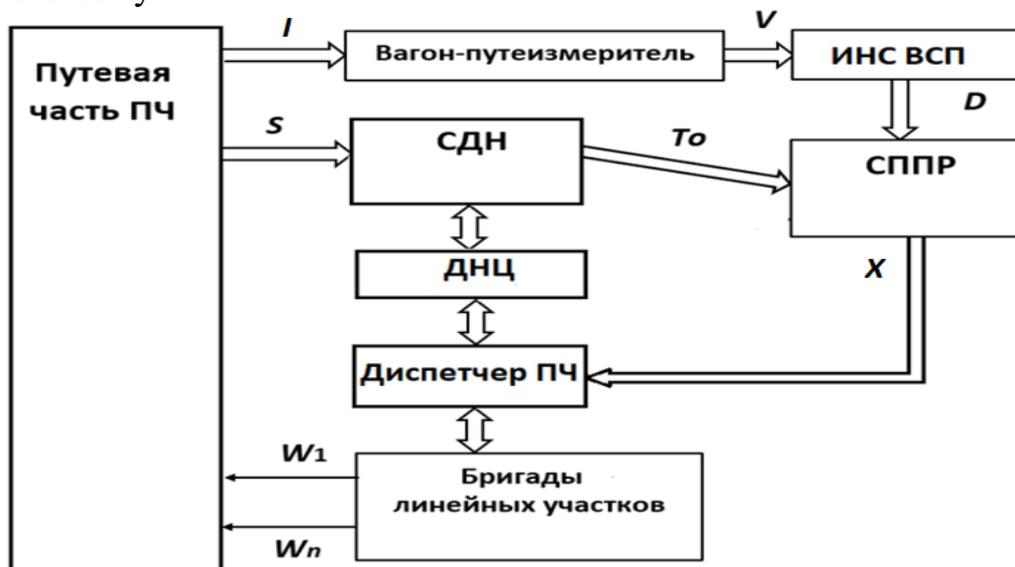


Рисунок 1 – Структура системы управления техническим обслуживанием и ремонтом верхнего строения пути: СППР – система поддержки принятия решений, ИНС ВСП – искусственная нейронная сеть системы распознавания элементов верхнего строения пути, СДН – система дистанционного наблюдения за составами, ДНЦ – поездной диспетчер

Таким образом, определены основные задачи создания СППР: а) разработка онтологии производственного процесса ТОиР и базы знаний, б) разработка интеллектуального классификатора для автоматического выявления дефектов рельсового пути, в) формулирование и решение задачи оптимизации распределения рабочих бригад на работы по ТОиР.

**Во второй главе** разработана онтология и семантическая модель процесса технического обслуживания рельсового пути линейного участка. 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.

В диссертационной работе использован редактор Protégé для построения онтологии технического обслуживания и ремонта рельсового пути.

Главным понятием онтологии, от которого наследуются все остальные, служит класс «ТОиР\_рельсового\_пути». От него 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. На рисунке 2 приведен пример диаграммы понятия «Рельсовый путь».

Выполнено определение связей между основными понятиями онтологии, и сформированы высказывания в виде триплетов «Субъект – Предикат – Объект». Сформированная онтология использована для получения новых знаний в области ТОиР рельсового пути на основе заданных исходных данных. С этой целью в неё заложены аксиомы и правила вывода.

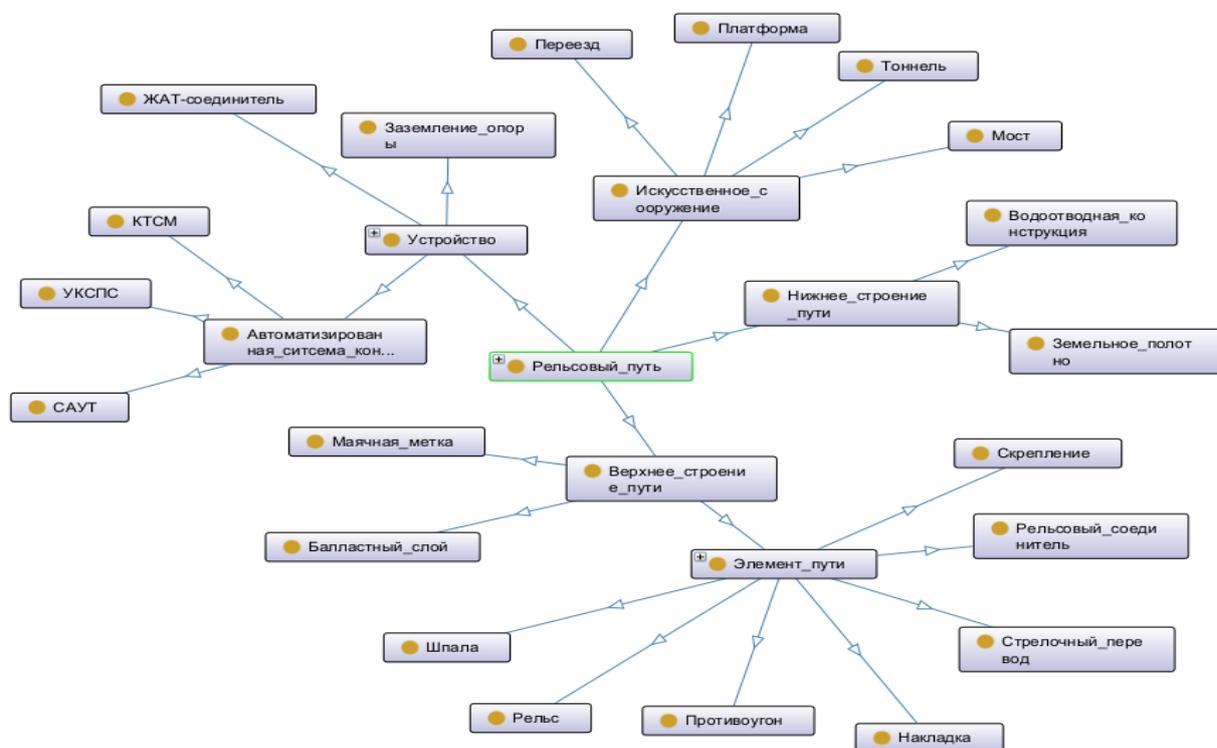


Рисунок 2 – OWL-диаграмма понятия «Рельсовый путь»

Для понятий области технического обслуживания железной дороги в диссертации был определен набор высказываний. В качестве примера ниже приведены несколько основных высказываний:

1. «Неотложная\_бригада отвечает\_за\_безопасность **only** Линейный\_участок» – только линейный участок является областью работ неотложной бригады.

2. «Рабочая\_отделение **inverse (базируется\_в) max 2** Неотложная\_бригада» – определяет, что в рабочем отделении может базироваться максимум 2 неотложные бригады.

3. «Технологическое\_окно действует\_на **only** Перегон» – показывает, что окно может действовать только на перегоны.

4. «Рабочая\_отделение отвечает\_за\_безопасность **some** Линейный\_участок» – обозначает зону ответственности рабочего отделения в виде как минимум одного линейного участка.

5. «Монтёр работает\_в **exactly 1** (Неотложная\_бригада **or** Укрупнённая\_бригада)» – монтёр пути работает ровно в одной неотложной или укрупнённой бригаде.

Помимо аксиом используются более сложные SWRL-правила вывода (Semantic Web Rule Language). С целью получения новых знаний по ТОиР рельсового пути для разработанной онтологии введён ряд SWRL-правил. В качестве примеров ниже приведены следующие SWRL-правила:

- Правило 1: технологическое окно может быть выделено на перегон, если его длительность не меньше времени устранения дефекта, выявленного на этом перегоне

$$\begin{aligned} & \text{Технологическое\_окно}(?w) \wedge \text{Неисправность}(?d) \wedge \\ & \text{Перегон}(?p) \wedge \text{расположен\_на}(?d, ?p) \wedge \\ & \text{требуется\_времени}(?d, ?dtime) \wedge \\ & \text{имеет\_продолжительность}(?w, ?wtime) \wedge \\ & \text{lessThanOrEqualTo}(?dtime, ?wtime) \rightarrow \\ & \rightarrow \text{действует\_на}(?w, ?p) \end{aligned}$$

- Правило 2: дефект устраняется в течение технологического окна, выделенного для перегона с этим дефектом:

$$\begin{aligned} & \text{Технологическое\_окно}(?w) \wedge \text{Неисправность}(?d) \wedge \\ & \text{Перегон}(?p) \wedge \text{расположен\_на}(?d, ?p) \wedge \\ & \text{действует\_на}(?w, ?p) \rightarrow \\ & \rightarrow \text{устраняется\_в}(?d, ?w) \end{aligned}$$

Для реализации поиска знаний в ПО Protégé были созданы экземпляры ряда определённых классов, определенных при проектировании онтологии. Разработанные OWL-аксиомы и SWRL-правила позволяют получить новые знания в соответствии с определёнными исходными данными. Получение новых данных о ТОиР в диссертации осуществлялось путём запуска механизма вывода Protégé Reasoner Pellet. Он реализует дескриптивную логику для проверки согласованности онтологии и автоматической классификации классов, свойств и индивидов.

На основе результатов онтологического проектирования и определения основных правил вывода и особенностей функционирования изучаемой предметной области разработана СППР для назначения рабочих бригад на устранение выявленных дефектов пути. На рисунке 3 приведена предлагаемая в диссертации структура СППР.

Общий алгоритм работы СППР состоит из следующих этапов.

1. Для получения исходных данных об элементах рельсового пути используется система видеоконтроля. Съёмка компонентов ВСП осуществляется при помощи камер, установленных на вагон-путеизмеритель.

2. Сформированные изображения элементов пути заносятся в базу данных.

3. После съёмки и предобработки кадров с компонентами ВСП они передаются на вход ИНС в режиме реального времени.

4. Модель ИНС распознаёт объекты на изображениях и выявляет неисправности. Используя базу знаний, система продукционного вывода определяет характеристики и параметры выявленных отступлений.

5. После обработки и классификации всех обнаруженных дефектов выполняется оптимальное распределение рабочих бригад для устранения

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

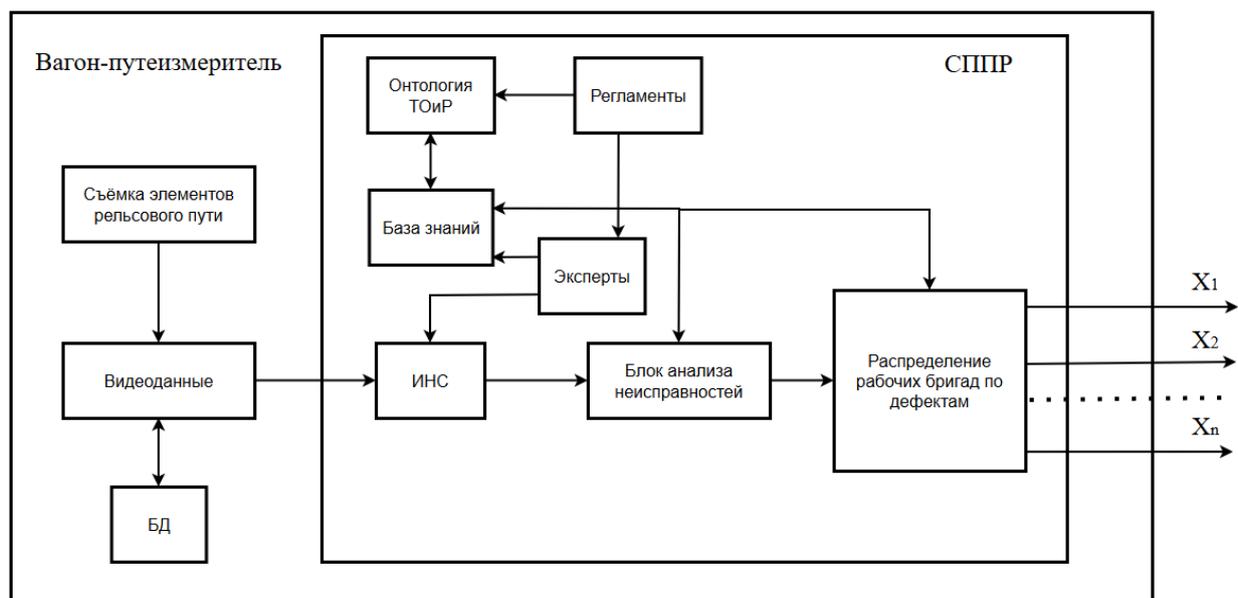


Рисунок 3 – Структура СППР для планирования ремонтных работ на рельсовом пути:  
БД – база данных видеосъёмки, ИНС – искусственная нейронная сеть,  $(X_1, \dots, X_n)$  – вектор назначения бригад

**В третьей главе** разработан интеллектуальный классификатор на трех искусственных нейронных сетях для автоматического анализа состояний элементов верхнего строения пути. Основной является первая сеть (модель OBJ), которая предназначена для распознавания всех компонент ВСП. Две другие сети (JLV и BLT) выполняют функции детекторов и предназначены соответственно для анализа состояний рельсовых стыков и накладок, а также окружающих их элементов. Они имеют архитектуру SSD. Она обладает хорошим сочетанием скорости работы и качества распознавания объектов. Из линейки моделей SSD для обучения выбрана самая быстрая из существующих модификаций – SSD Mobilenet v3 Small COCO.

Сбор изображений с элементами пути осуществляется при помощи диагностического комплекс инфраструктуры (ДКИ), который 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 последующего анализа.

Для обучения нейронных сетей сформированы наборы данных для обучения трёх моделей нейросетевых детекторов. Датасеты включают в себя изображения верхнего строения пути. Выделение областей произведено в программе Labelmg. Выполнена проверка корректности нанесённой разметки и удаление лишних данных.

Модель SSD Mobilenet v3 Small COCO дообучается для решения задачи распознавания элементов ВСП, рельсовых стыков и накладок. Процесс включает в себя тонкую настройку весов заданной архитектуры сети. В диссертации

выполнена оценка качества работы детекторов по основным метрикам: средневзвешенной точности mean average precision ( $mAP$ ), средневзвешенному отклику mean average recall ( $mAR$ ) и мере  $F1$ . На рисунке 4 представлены графики зависимостей, полученные по метрике  $mAP$  для нейросети OBJ.

Анализ характеристик детекторов выполнен на валидационных выборках соответствующих датасетов.

Ключевыми метриками оценки качества работы моделей выбраны:

- mean average precision при intersection over union ( $IoU$ ) равном 0,5  $mAP_{IoU=0,5}$ ;
- mean average recall для 10 самых достоверных объектов  $mAR_{10}$ ;
- среднее по классам значение меры  $F1$ .

В результате обучения для модели OBJ получены следующие показатели:  $mAP_{IoU=0,5} = 0,61$ ,  $mAR_{10} = 0,51$  и  $F1 = 0,71$ . Для детектора JLV метрики составили:  $mAP_{IoU=0,5} = 0,61$ ,  $mAR_{10} = 0,53$  и  $F1 = 0,74$ . Для модели BLT получены показатели:  $mAP_{IoU=0,5} = 0,83$ ,  $mAR_{10} = 0,64$  и  $F1 = 0,81$ .

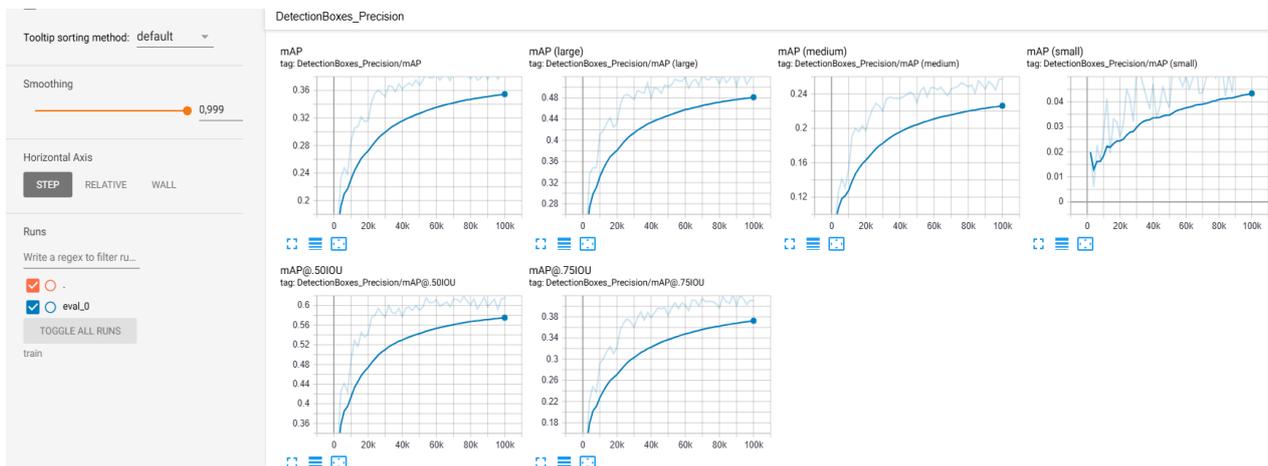


Рисунок 4 – Значения  $mAP$ , полученные в результате обучения детектора OBJ

Для моделей JLV и BLT построены матрицы ошибок, позволяющие выявить количество ошибок первого и второго рода. Исследование матриц ошибок моделей JLV и BLT показало хорошее качество распознавания различных видов рельсовых стыков и накладок. Возникающие проблемы связаны с малым числом объектов по каким-либо классам, малыми размерами прямоугольных областей или визуальным сходством объектов дефектного и не дефектного класса.

**В четвертой главе** выполнена постановка и решение оптимизационной задачи назначения рабочих бригад на ремонтные работы по устранению дефектов, выявленных и классифицированных с помощью разработанной ИНС.

Использование разработанной онтологии и базы знаний ТОиР позволило вывести следующие условия для постановки задачи назначений рабочих бригад.

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  $\rho_j$  – 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  $\rho_{k-1}^S$  и  $\rho_k^S$ .

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:

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

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

$$\rho_p^{wu} = \rho_j, \exists j: wu_p \rightarrow wd_j \quad (2)$$

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  $D$  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:  $I_2$  – подмножество номеров дефектов II степени,  $I_3$  – подмножество номеров дефектов III степени и  $I_4$  – подмножество номеров дефектов IV степени. Тогда

$$|I_2| + |I_3| + |I_4| = R \quad (3)$$

Для обеспечения устранения всех дефектов должны выполняться следующие условия:

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

$$|D^2| \leq P \quad (5)$$

7. Дефект  $d_r$  находится только на одном перегоне  $S_k$ :

$$\exists! k \in \{1, \dots, J+1\}: \rho_{k-1}^S \leq \rho_r^d < \rho_k^S \quad (6)$$

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 5.

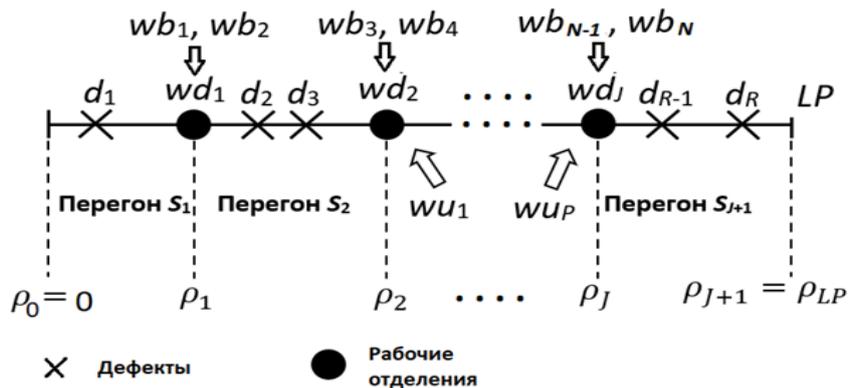


Рисунок 5 – Модель обслуживания линейного участка железной дороги

В соответствии с разработанной моделью обслуживания линейного участка рельсового пути (рисунок 5) введена булева переменная задачи целочисленного программирования:

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

$$x_{rn} = \begin{cases} 1, & \text{если для устранения дефекта } d_r \\ & \text{назначена неотложная бригада } wb_n; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (7)$$

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

$$x_{rn} = \begin{cases} 1, & \text{если для устранения дефекта } d_r \\ & \text{назначена укрупненная бригада } wu_n; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (8)$$

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

$$T^D = \min \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^{N+P} t_{rn}^W x_{rn}, \quad (9)$$

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

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

- для дефектов IV степени

$$t_{rn}^W = t_{rn}^{wb} + t_r, \quad (10)$$

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

- для дефектов III степени

$$t_{rn}^W = \min\{t_{rn}^{wb}, t_{rn}^{wu}\} + t_r, \quad (11)$$

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:

$$t_{rn}^W = t_{rn}^{wu} + t_r, \quad (12)$$

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 предлагаемой оптимизационной задачи на систему ТОиР рельсового пути наложены следующие ограничения:

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

$$\sum_{n=1}^N x_{rn} = 1, r \in I_3 \cup I_4 \quad (13)$$

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

$$\sum_{n=1}^N x_{rn} = 0, r \in I_2 \quad (14)$$

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:

$$\sum_{r \in I_3 \cup I_4} x_{rn} \leq 1, n = \overline{1, N} \quad (15)$$

4. На устранение дефектов II степени не назначается ни одна неотложная бригада:

$$\sum_{r \in I_2} x_{rn} = 0, n = \overline{1, N} \quad (16)$$

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

$$\sum_{n=N+1}^{N+P} x_{rn} = 1, r \in I_2 \cup I_3 \quad (17)$$

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

$$\sum_{n=N+1}^{N+P} x_{rn} = 0, r \in I_4 \quad (18)$$

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:

$$\sum_{r \in I_2 \cup I_3} x_{rn} \leq 1, n = \overline{N+1, N+P} \quad (19)$$

8. На устранение дефектов IV степени не назначается ни одна укрупненная бригада:

$$\sum_{r \in I_4} x_{rn} = 0, n = \overline{N+1, N+P} \quad (20)$$

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

$$(t_{rn}^W + t_r)x_{rn} \leq T_r^0, r = \overline{1, R}, n = \overline{1, N+P} \quad (21)$$

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

а) 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

$$t_{rn}^W = t_{rn}^{wb} = (|\rho_r^d - \rho_n^{wb}|)/v_n, \quad (22)$$

где  $v_n$  – скорость движения бригады.

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

$$t_{rn}^W = t_{rn}^{wu} = \left( \frac{|\rho_r^d - \rho_n^{wu}| + |\rho_r^d - \rho_r^s|}{v_n} \right), \quad (23)$$

где  $\rho_r^s$  – координата ближайшей границы перегона с дефектом.

с) 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 минимальному из времен:  $t_{rn}^{wu}$  – прибытия бригады  $wu_n$  и убытия ее по перегону с дефектом и  $t_{rn}^{wb}$  – перемещения к дефекту неотложной бригады  $wb_n$ .

10. Ограничение на суммарную стоимость поведения работ имеет вид:

$$\sum_{n=1}^{N+P} C_{rn} x_{rn} \leq C_r^g, r = \overline{1, R}, \quad (24)$$

где  $C_{rn}$  – затраты  $n$ -й бригады на устранение дефекта  $d_r$ ,  $C_r^g$  – допустимое значение затрат на дефект  $d_r$ .

Таким образом, ограничения (13) – (24) соответствуют пространственно-временной структуре организации ТООР на линейном участке железнодорожного пути и учитывают трудовые и материальные ресурсы. Модуль оптимизационной задачи в составе СППР может работать в двух основных режимах: а) оперативное распределение бригад на ремонтные работы при получении данных о выявленных дефектах рельсового пути при проходе вагона-путеизмерителя, б) планирование видов и количества рабочих бригад и мест их размещения на линейном участке на долгосрочный период по результатам статистических данных об ожидаемых дефектах.

Для решения сформулированной задачи оптимизации использован метод ветвей и границ, реализованный в библиотеке LPSolve.

**В пятой главе** описаны экспериментальные исследования, выполненные по результатам проходов вагона-путеизмерителя с ДКИ по линейному участку Самара–Кинель Куйбышевской железной дороги. Полученные кадры рельсового пути были обработаны моделью OBJ с целью проверки скорости и качества её работы.

Детектор работал на процессоре CPU вычислителя, установленного на ДКИ. Модель OBJ была сконвертирована в формат OpenVINO для ускорения работы на процессорах Intel. В результате время распознавания моделью составило 2 мс, что позволило анализировать состояние элементов ВСП при движении вагона со скоростью до 190 км/ч.

Для оценки качества работы модели на отснятых изображениях была построена матрица ошибок для модели OBJ, которая подтвердила высокое

качество работы детектора. Доля ошибок первого и второго рода составила не более 5 % от общего числа предсказаний, что удовлетворяет требованиям к модели. Возникающие при детекции проблемы обычно связаны либо с малым числом объектов для класса, либо с дисбалансом дефектных и не дефектных примеров.

В диссертации также выполнены эксперименты по оптимизации распределения рабочих бригад на линейном участке Самара–Кинель Куйбышевской железной дороги длиной 40,4 км. Рабочие отделения базируются на четырех станциях: Безымянка, Зубчаниновка, Смышляевка, Алексеевская. Параметрами в эксперименте являлись число рабочих бригад и количество неисправностей второй степени (таблица 1).

Таблица 1 – 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

В результате решения задачи получены выводы о влиянии на время и стоимость ремонтных работ числа рабочих бригад для большого количества дефектов на линейном участке. Использование задачи оптимального назначения рабочих бригад сократило время на техническое обслуживание и ремонт дефектов рельсового пути в среднем на 12% по сравнению с распределением бригад в предыдущие периоды времени без использования СППР.

**В заключении сформулированы основные выводы и результаты, полученные в работе:**

1. Проведен системный анализ существующих методов управления при техническом обслуживании верхнего строения пути железной дороги. Показано, что наиболее эффективно вопросы диагностики решаются с использованием средств искусственного интеллекта. Выполнено формальное описание процесса ТОиР.

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. Эти исследования положены в основу построения системы поддержки принятия решения по операциям ТОиР.

3. Разработан интеллектуальный классификатор дефектов на искусственных нейронных сетях для обнаружения дефектов рельсового пути. Нейронные сети 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 ОВJ получены следующие характеристики: средневзвешенная точность равна  $mAP_{IoU=0,5} = 0,61$ , mean average recall для 10 самых достоверных объектов равна  $mAR_{10} = 0,51$ , 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. В качестве целевой функции выбрано время устранения дефектов на заданном участке пути. Ограничения задачи учитывают наличие трудовых ресурсов, территориальное размещение рабочих бригад, скорости их перемещения к месту устранения дефектов и выделенные технологические окна для перегонов. 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: модуль онтологии процесса ТОиР, база знаний и база правил продукционного вывода, интеллектуальный классификатор на основе искусственной нейронной сети, модуль оптимизации назначений рабочих бригад. Опытный образец системы поддержки принятия решений использован в функциональном модуле ИИС КСИ в вагоне-путеизмерителе и показал сокращение стоимостных затрат на устранение дефектов.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

### Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Орлов, С. П. Глубокая нейронная сеть для диагностики элементов железнодорожного рельсового пути / С. П. Орлов, **Н. А. Ефимушкин**, Н. В. Ефимушкина // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. Т. 30, № 1(73). С. 63-74. DOI 10.14498/tech.2022.1.4. EDN DVWYBS. **(ВАК)**

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

3. Орлов, С. П. Система диагностики рельсовых креплений на высокоскоростных железных дорогах на основе глубокой нейронной сети / С. П. Орлов, **Н. А. Ефимушкин**, Н. В. Ефимушкина // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2024. Т. 30, № 4. С. 581-593. DOI 10.17277/vestnik.2024.04. pp.581-593. EDN JMKUYB. **(ВАК)**

4. Ефимушкин, Н. А. Управление техническим обслуживанием железнодорожного рельсового пути с применением искусственной нейронной сети / **Н. А. Ефимушкин**,

С. П. Орлов // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2025. № 74. С. 95-100. DOI 10.36807/1998-9849-2025-74-100-95-100. EDN KSSYTZ. **(ВАК)**

#### **Свидетельства о государственной регистрации базы данных**

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665401 Российская Федерация. Программа анализа прогресса обучения нейросетевых детекторов изображений: № 2024663694: заявл. 17.06.2024: опублик. 01.07.2024 / **Н. А. Ефимушкин**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Самарский государственный технический университет”. EDN UOJIFY.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025663666 Российская Федерация. Программа формирования инцидентов верхнего строения рельсового пути: заявл. 20.05.2025: опублик. 29.05.2025 / **Н. А. Ефимушкин**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет». EDN AXZVMY.

#### **Публикации в других научных изданиях**

7. Ефимушкин, Н. А. Классификация состояний рельсовых стыков с помощью предварительно обученной глубокой нейронной сети / **Н. А. Ефимушкин** // ХС международные научные чтения (памяти Н.П. Дубинина): сборник статей Международной научно-практической конференции, Москва, 18 октября 2020 года. М.: Издательство "Научная артель", 2020. С. 10-14. EDN DOVVBL.

8. Ефимушкин, Н. А. Интеллектуальная система диагностики рельсовых стыков железнодорожного пути / **Н. А. Ефимушкин**, Н. В. Ефимушкина, С. П. Орлов // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 1. С. 97-103. DOI 10.52348/2712-8873\_MMTT\_2022\_1\_97. EDN SDXTVX.

9. Ефимушкин, Н. А. Система контроля состояния контактной сети РЖД / **Н. А. Ефимушкин**, Н. В. Ефимушкина // Информационные системы и технологии (ИСТ 2023): Труды научно-технической конференции с международным участием, Самара, 19–21 июня 2023 года. Самара: Самарский научный центр РАН, 2023. С. 164-168. EDN FTFVDG.

10. Орлов, С. П. Интеллектуальная система контроля состояний рельсовых креплений на высокоскоростных железных дорогах / С. П. Орлов, **Н. А. Ефимушкин**, Н. В. Ефимушкина // Математические методы в технологиях и технике. 2024. № 5. С. 99-106. EDN EJHSVX.

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

12. Efimushkin, N. Intelligent System for Railway Joint Diagnostics / **N. Efimushkin**, N. Efimushkina, S. Orlov // In: Kravets, A.G., Bolshakov, A.A., Shcherbakov, M.V. (eds) Society 5.0. Studies in Systems, Decision and Control, vol 437. Cham: Springer, 2023. Pp. 199-211. DOI 10.1007/978-3-031-35875-3\_16.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (протокол № 3 от «26» марта 2026 г.)

Заказ № 44 . Формат 60x84 1/16 Усл. печ. л. 1.25. Тираж 100 экз.  
Отпечатано в типографии Самарского государственного технического университета.  
Отдел типографии и оперативной печати  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.