

Сетевой научно-практический журнал
**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ
ТРАНСПОРТ**

№3(35)
СЕНТЯБРЬ 2025



СТРАТЕГИЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО
РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ
ОТРАСЛИ

ОБЗОРНЫЕ
РАБОТЫ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ
ТРАНСПОРТНЫЕ
СИСТЕМЫ

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ,
ТРАНСПОРТНАЯ,
ИНФОРМАЦИОННАЯ
И КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ
ДВИЖЕНИЯ

ИСКУССТВЕННЫЙ
ИНТЕЛЛЕКТ
И МАШИННОЕ
ОБУЧЕНИЕ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

Издается с 2017 года

Издатель:



АО «НИИАС»

Адрес редакции:

Россия, г. Москва, Орликов переулок, д.5, стр.1 ком. 824 1

Email: journal@vniias.ru

Телефон: +7 (495) 967-77-01

Сайт: <http://www.intelligent-transport.ru/>

Сетевой научно-практический журнал «Интеллектуальный транспорт» публикует основные научные результаты соискателей учёной степени кандидата и доктора наук по следующим специальностям и соответствующим им отраслям науки:

Журнал включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Сетевой научно-практический журнал «Интеллектуальный транспорт» публикует основные научные результаты соискателей учёной степени кандидата и доктора наук по следующим специальностям и соответствующим им отраслям науки:

1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки)

2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки)

2.9.4. Управление процессами перевозок (технические науки)

2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы (технические науки)

Полная или частичная перепечатка, сканирование любого материала текущего номера возможны только с письменного разрешения редакции.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Суханов Андрей Валерьевич

к.т.н., доцент, заместитель начальника Отделения инновационных и интеллектуальных технологий цифровой станции Ростовского филиала АО «НИИАС»

Выпускающий редактор

Левшина Анна Андреевна

Инженер-программист 1 категории Технологического сектора Ростовского филиала АО «НИИАС»

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Розенберг Ефим Наумович

д.т.н., профессор, первый заместитель Генерального директора АО «НИИАС»

Ответственный секретарь

Соловьева Юлия Геннадьевна

Главный специалист Департамента корпоративных коммуникаций АО «НИИАС»

Алиев Вугар Амирович

д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Института физики Республики Азербайджан (Республика Азербайджан)

Бородин Андрей Федорович

д.т.н., профессор, начальник отдела АО «ИЭРТ»

Бочков Константин Афанасьевич

д.т.н., профессор «БелГУТ» (Республика Беларусь)

Броневич Андрей Георгиевич

д.ф.-м.н., главный научный сотрудник АО «НИИАС»

Бутакова Мария Александровна

д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Ростовского филиала АО «НИИАС»

Грибова Валерия Викторовна

чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор, заместитель директора по научной работе ДВО РАН

Гришаев Сергей Юрьевич

к.т.н., заместитель Генерального директора – директор Ростовского филиала АО «НИИАС»

Гуров Юрий Владимирович

к.т.н., начальник Центра разработки программного обеспечения Ростовского филиала АО «НИИАС»

Долгий Игорь Давидович

д.т.н., профессор, Научный руководитель лаборатории РГУПС

Ковалев Сергей Михайлович

д.т.н., профессор, научный руководитель Ростовского филиала АО «НИИАС»

Коваленко Николай Иванович

д.т.н., профессор РУТ (МИИТ)

Котенко Алексей Геннадьевич

д.т.н., профессор, главный научный сотрудник АО «ВНИИЖТ»

Ли Инь

к.ф.-м.н., доцент Харбинского технологического института (КНР)

Матюхин Владимир Георгиевич

д.т.н., председатель Экспертного совета АО «НИИАС»

Ольгейзер Иван Александрович

к.т.н., доцент, первый заместитель директора Ростовского филиала АО «НИИАС»

Папич Любиша

д.т.н., профессор, директор Исследовательского центра DQM (Республика Сербия)

Попов Павел Александрович

к.т.н., заместитель генерального директора – директор Санкт-Петербургского филиала АО «НИИАС»

Сабанов Алексей Геннадьевич

д.т.н., главный эксперт Научно-технического комплекса технологий информационного общества АО «НИИАС»

Соколов Сергей Викторович

д.т.н., профессор РГУПС, главный научный сотрудник АО «НИИАС»

Хабаров Валерий Иванович

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой СГУПС

Хатламаджян Аゴп Ервандович

к.т.н., доцент, заместитель генерального директора АО «НИИАС»

Чжан Даҷчи

Профессор Харбинского технологического института (КНР)

Шабалин Николай Григорьевич

д.т.н., профессор, руководитель Департамента научных исследований, аналитики и совершенствования научно-технической деятельности АО «НИИАС»

Шубинский Игорь Борисович

д.т.н., профессор, главный эксперт Департамента научных исследований, аналитики и совершенствования научно-технической деятельности АО «НИИАС»

Юдин Дмитрий Александрович

к.т.н., старший научный сотрудник, заведующий лабораторией МФТИ

Яковлев Константин Сергеевич

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ФИЦ ИУ РАН

ОГЛАВЛЕНИЕ

СТРАТЕГИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ

Долгий А.И., Хатламаджиян А.Е., Озеров А.В., Бочков А.В.

РОБОТИЗАЦИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ 4

ОБЗОРНЫЕ РАБОТЫ

Шульженко А.А.

ГИБРИДНЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ
ПРОЦЕССАМИ НА ЖД ТРАНСПОРТЕ: ОБЗОР 33

Алиев В.А., Озеров А.В., Бочков А.В.

НАУЧНЫЙ ОБЗОР: ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЕЙ В ЖД ТРАНСПОРТЕ 54

Бушуев С.В., Попов А.Н.

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ 67

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Бушуев С.В. Костров А.А. Ольгейзер И.А.

ЦИФРОВАЯ ЖД СТАНЦИЯ: ПРИМЕР ФОРМАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА
ПРИЕМА ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА 77

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ, ТРАНСПОРТНАЯ, ИНФОРМАЦИОННАЯ И КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Ильченко А.В.

МОДЕЛЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЁМКОСТЬЮ РАДИОСЕТИ
DMR TIER III В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА РЕСУРСА НА ОСНОВЕ СПИСКОВ ДОСТУПА 86

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ

Ярушев С.А., Ануров А.О., Булгаков Г.Г.

OMLS-BENCH: МНОГОУРОВНЕВЫЙ БЕНЧМАРК LLM
ДЛЯ ПРОГРАММНОЙ ИНЖЕНЕРИИ 96

УДК 656.212:681.532

РОБОТИЗАЦИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Долгий Александр Игоревич, к.т.н, Генеральный директор, АО «НИИАС», Москва, Россия,

E-mail: a.dolgijy@vniias.ru

Хатламаджиян Акоп Ервандович, к.т.н, Заместитель Генерального директора, АО «НИИАС», Москва,

Россия, E-mail: a.hatlamadzhiyan@vniias.ru

Озеров Алексей Валерьевич, Начальник Международного управления, АО «НИИАС», Москва, Россия,

E-mail: a.ozerov@vniias.ru

Бочков Александр Владимирович, д.т.н., учёный секретарь, АО «НИИАС», Москва, Россия,

E-mail: a.bochkov@vniias.ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются современные тенденции и перспективы роботизации технологических процессов на железнодорожном транспорте. Анализируются ключевые технологии, такие как искусственный интеллект (ИИ), компьютерное зрение и предиктивная аналитика, которые обеспечивают автоматизацию процессов технического обслуживания, диагностики, строительства и обеспечения безопасности. Особое внимание уделено применению робототехнических комплексов в различных сферах железнодорожного транспорта, включая пассажирский сервис и логистику. Рассмотрены ограничения, связанные с внедрением роботов, и предложены пути их преодоления. Статья основана на анализе международного опыта и актуальных данных за 2024-2025 годы.

Ключевые слова: роботизация, железнодорожный транспорт, искусственный интеллект, компьютерное зрение, предиктивная аналитика, техническое обслуживание, диагностика.

ROBOTIZATION IN RAILWAY TRANSPORT

Alexander I. Dolgy, Ph.D., General Director, JSC «NIIAS», Russia (Moscow), Email: a.dolgijy@vniias.ru

Agop E. Hatlamadzhiyan, Ph.D., Deputy General Director, JSC «NIIAS», Moscow, Russia,

E-mail: a.hatlamadzhiyan@vniias.ru

Aleksey V. Ozerov, Head of the International Department, JSC «NIIAS», Moscow, Russia,

E-mail: a.ozerov@vniias.ru

Alexander V. Bochkov, Doctor of Technical Sciences, Scientific Secretary, JSC «NIIAS», Moscow, Russia,

E-mail: a.bochkov@vniias.ru

ABSTRACT

This article discusses the current trends and prospects of robotizing technological processes in rail transport. Key technologies such as artificial intelligence (AI), computer vision, and predictive analytics are analyzed for their ability to automate maintenance, diagnostics, construction, and safety processes. Particular attention is paid to the use of robotic systems in various areas of rail transportation, including passenger services and logistics. The limitations associated with introducing robots are examined, and solutions are proposed. This article is based on an analysis of international experience and current data from 2024 to 2025.

Keywords: robotization, railway transport, artificial intelligence, computer vision, predictive analytics, maintenance, diagnostics.

Введение

Современный этап развития железнодорожного транспорта характеризуется активным внедрением цифровых технологий и автоматизированных систем, что обусловлено необходимостью повышения эффективности, безопасности и конкурентоспособности отрасли. В условиях стремительного технологического прогресса и растущих требований к качеству транспортных услуг особую актуальность приобретает вопрос роботизации железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава. Последние годы ознаменовались значительным прорывом в области промышленной робототехники, что нашло отражение в увеличении количества внедряемых решений и расширении сфер их применения.

Анализ международного опыта показывает, что ведущие железнодорожные операторы и производители оборудования все чаще обращаются к робототехническим комплексам как к инструменту решения ключевых отраслевых задач. В частности, автоматизированные системы находят применение в таких областях, как техническое обслуживание и диагностика инфраструктуры, строительство и ремонт путей, обеспечение безопасности движения, логистические операции и сервисное обслуживание пассажиров. При этом особое значение приобретает интеграция искусственного интеллекта и машинного обучения, позволяющая создавать интеллектуальные системы, способные к автономной работе и адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации.

Следует отметить, что процесс роботизации железнодорожного транспорта развивается в рамках общей тенденции цифровой трансформации промышленности, известной как «Индустрія 4.0» [1]. Этот процесс сопровождается появлением новых технологических решений, включая коботы (коллаборативные роботы), системы компьютерного зрения, цифровых двойников и предиктивной аналитики. Вместе с тем, масштабное внедрение робототехнических систем сталкивается с рядом вызовов, среди которых можно выделить высокую стоимость разработки и внедрения, необходимость адаптации существующей инфраструктуры, дефицит квалифицированных кадров, а также вопросы стандартизации и нормативного регулирования.

В данном контексте представляется важным всесторонний анализ современных тенденций в области роботизации железнодорожного транспорта, включая оценку эффективности применяемых решений, выявление ключевых технологических трендов и рассмотрение перспектив дальнейшего развития. Особого внимания заслуживает изучение международного опыта, поскольку именно в таких странах, как Китай, Япония, Германия и Южная Корея, уже сегодня реализуются наиболее передовые проекты в этой области. При этом важно учитывать как технологические аспекты, так и экономические, организационные и кадровые факторы, определяющие успешность внедрения робототехнических систем в железнодорожной отрасли.

Настоящая статья ставит своей целью комплексный анализ современных подходов к роботизации железнодорожного транспорта, основанный на изучении актуальных технологических решений, оценке их эффективности и рассмотрении перспектив развития. Особое внимание уделяется практическим примерам внедрения робототехнических систем в различных сферах железнодорожного хозяйства, а также анализу факторов, способствующих или препятствующих их широкому распространению. Полученные результаты могут быть полезны как для специалистов в области железнодорожного транспорта, так и для разработчиков робототехнических систем, заинтересованных в создании эффективных решений для транспортной отрасли.

Исследование основано на анализе данных из отчетов World Robotics (2024), материалов международных выставок (InnoTrans 2024), научных публикаций и технической документации компаний-разработчиков. Использованы методы сравнительного анализа и систематизации информации.

1. Технологии роботизации на железнодорожном транспорте

1.1 Искусственный интеллект и компьютерное зрение

Современные роботизированные системы на железной дороге все чаще используют искусственный интеллект и компьютерное зрение, что существенно увеличивает их функционал и производительность. Внедрение этих технологий в диагностику и техническое обслуживание создает новые возможности для автоматизации процессов, которые раньше требовали больших трудозатрат. В основе таких систем лежат продвинутые алгоритмы машинного обучения, способные обрабатывать визуальные данные в режиме реального времени и принимать решения на основе обнаруженных закономерностей [2].

Применение компьютерного зрения в железнодорожной робототехнике демонстрирует особую эффективность в задачах контроля состояния инфраструктуры. Системы на основе этой технологии, такие как китайские разработки RIIS1005 и Guimu Robot, успешно справляются с обнаружением дефектов рельсового полотна, включая трещины, износ поверхности катания и геометрические отклонения (рис. 1).

Эти роботы оснащены высокоточными сенсорами и камерами, которые позволяют проводить детальный анализ состояния пути с точностью до миллиметра.

Искусственный интеллект в робототехнических комплексах выполняет несколько ключевых функций. Во-первых, алгоритмы глубокого обучения позволяют системам самостоятельно классифицировать обнаруженные дефекты по степени их критичности. Во-вторых, нейронные сети обеспечивают адаптацию работы роботов к изменяющимся условиям эксплуатации. Например, при обнаружении сложного дефекта система может автоматически изменить режим сканирования для получения более детальной информации. В-третьих, технологии предиктивной аналитики на основе ИИ дают возможность прогнозировать развитие выявленных повреждений и рекомендовать оптимальные сроки проведения ремонтных работ.



Рис. 1 – Робот для инспекции железных дорог RIIS1005 выполняет комплексный высокоточный мониторинг состояния железнодорожной инфраструктуры, в первую очередь рельсового полотна

Особого внимания заслуживает опыт применения этих технологий в диагностике подвижного состава. Роботизированные системы, такие как ARGO 2.0 (Италия) и ANYmal (Швейцария), демонстрируют высокую эффективность при осмотре ходовых частей вагонов и локомотивов [3,4]. Их алгоритмы компьютерного зрения способны идентифицировать даже микротрещины и начальные стадии износа деталей, что практически невозможно при

визуальном осмотре человеком. Такие системы способны накапливать и анализировать данные на протяжении длительного времени, что позволяет выявлять закономерности и прогнозировать потенциальные сбои и отказы оборудования.

Развитие технологий искусственного интеллекта способствует совершенствованию автономной навигации и компьютерного зрения в железнодорожной робототехнике. Мобильные роботизированные платформы используют лидары, стереокамеры и алгоритмы SLAM для адаптации к сложной инфраструктуре железных дорог и точного позиционирования. Технологии ИИ и компьютерного зрения совершенствуют алгоритмы обработки изображений с целью повышения точности и скорости анализа обстановки, повышают уровень интеграции с другими перспективными решениями, включая цифровые двойники и компоненты интернета вещей, что позволяет создавать более комплексные системы мониторинга и управления. В этом же ряду разработка унифицированных стандартов обработки и хранения визуальной информации, способствующих формированию масштабных баз знаний для обучения нейронных сетей.

Дополнительно значительное внимание уделяется энергоэффективности подобных систем, поскольку выполнение сложных алгоритмов ИИ требует значительных вычислительных ресурсов.

1.2 Предиктивная аналитика

Внедрение технологий предиктивной аналитики кардинально меняет традиционные подходы к техническому обслуживанию, трансформируя его из планово-предупредительного в прогнозно-прескриптивное. Основу таких систем составляют сложные алгоритмы машинного обучения, обрабатывающие огромные массивы данных от датчиков мониторинга, систем технического зрения и исторических баз ремонтов.

Современные предиктивные системы на железнодорожном транспорте используют комплексный анализ множества параметров, включая вибрационные характеристики подвижного состава, температурные режимы работы узлов и агрегатов, данные о нагрузках и условиях эксплуатации. Например, система AutoScan, разработанная в рамках европейской программы HORIZON 2020, демонстрирует эффективность в выявлении микротрецин рельсов на ранних стадиях их образования. Анализируя данные электромагнитно-акустических датчиков и измерений поля переменного тока, система не только обнаруживает дефекты, но и прогнозирует скорость их развития, что позволяет оптимально планировать ремонтные работы.

Особую ценность предиктивная аналитика представляет для управления ресурсом критически важных элементов инфраструктуры. Алгоритмы, обученные на исторических данных о выходе из строя различных компонентов, способны с высокой точностью определять остаточный ресурс таких элементов, как стрелочные переводы, контактная сеть или колесные пары. Это позволяет отказаться от традиционного подхода с фиксированными межремонтными периодами в пользу индивидуального прогнозирования для каждого конкретного узла. Практический опыт внедрения таких систем показывает снижение затрат на техническое обслуживание на 15-20% при одновременном повышении надежности.

Перспективным направлением является создание цифровых двойников железнодорожной инфраструктуры, позволяющих не только прогнозировать износ, но и моделировать различные сценарии эксплуатации, оценивая их влияние на долговечность оборудования [5]. Пример успешной реализации такого подхода – опыт компании Siemens, где использование цифровых двойников для роботов-сборщиков позволило сократить расход материалов на 40% и повысить точность сборки на 10%.

Важным аспектом внедрения предиктивной аналитики является интеграция с системами планирования ремонтов и управления ЗИП (запасными частями, инструментами и принадлежностями). Современные платформы, такие как разрабатываемые китайским холдингом Cainiao Smart Logistics, объединяют данные предиктивного мониторинга с логистическими системами, что позволяет автоматически формировать заявки на необходимый ЗИП и оптимизировать его доставку к месту будущего ремонта. Такой комплексный подход минимизирует простои оборудования и сокращает складские запасы.

Развитие предиктивной аналитики сталкивается с рядом технологических вызовов, среди которых можно выделить проблему качества и полноты исходных данных, необходимость обработки информации в реальном времени и вопросы кибербезопасности. Особую сложность представляет создание универсальных алгоритмов, способных

адаптироваться к различным условиям эксплуатации и типам оборудования. Решение этих задач требует тесного взаимодействия разработчиков программного обеспечения, производителей железнодорожной техники и эксплуатационных компаний.

1.3 Автономные мобильные и биоморфные роботы

Автономные мобильные роботы представляют собой качественно новый этап развития робототехники для железнодорожного транспорта, сочетающий передовые технологии навигации, искусственного интеллекта и мехатроники. Эти системы способны самостоятельно выполнять сложные задачи в изменяющейся среде без постоянного контроля оператора, что особенно ценно для работы на протяженных объектах железнодорожной инфраструктуры. Современные автономные платформы демонстрируют высокую эффективность в таких областях, как диагностика инфраструктуры, обеспечение безопасности, логистические операции (погрузка, разгрузка и т.п.), показывая при этом надежность и адаптивность к различным условиям эксплуатации [6].

Широкому применению автономных мобильных и биоморфных роботов способствовало развитие сложных систем навигации, способных совместно обрабатывать данные лидаров, стереокамер, инерциальных датчиков и спутниковых систем позиционирования.

Биоморфные роботы представляют собой сложные технические системы, которые повторяют строение и функциональные возможности, присущие животным. Согласно ГОСТ Р 60.2.0.3-2022¹, к ним относятся сервисные роботы, способные воспринимать внешнюю среду, взаимодействовать с внешними объектами, регистрировать и контролировать собственное состояние, анализировать поступающую информацию, принимать решения, передавать информацию, а также использовать различные способы передвижения, характерные для живых организмов. В контексте технологической готовности и социального принятия в ближнесрочной перспективе наибольший практический интерес получают четырехпорные шагающие биоморфные роботы, которые могут использоваться как автономно, так и в колаборативном режиме с человеком. Ярким примером таких решений являются роботы-собаки, которые уже активно демонстрируют свои возможности в различных отраслях, включая железнодорожный транспорт.

По сравнению с традиционными робототехническими устройствами на колесном и гусеничном ходу биоморфные роботы обладают рядом существенных преимуществ, которые определяют их потенциальную ценность для применения в сложных условиях железнодорожной инфраструктуры. К ним относится высокая проходимость на неподготовленной местности, включая каменистые участки, лестницы, корни деревьев и другие неровности, которые часто встречаются вдоль железнодорожных путей. Они способны адаптировать режим движения по сыпучим и хрупким поверхностям, таким как песок, снег и лед, а также сохранять устойчивость при подъеме и спуске. Высокая маневренность позволяет им эффективно обходить или преодолевать препятствия, а компактные размеры делают их пригодными для работы в зонах ограниченного пространства, таких как тоннели, путепроводы, каналы и шахты. Еще одним важным преимуществом является возможность компактного сочетания многозвездных исполнительных механизмов, например манипуляторов, и движителя в едином устройстве, что обеспечивает лучшую маневренность в стесненных условиях. Кроме того, имитация организмов живой природы улучшает психологическое восприятие таких роботов людьми, что особенно важно при их работе в режиме коллaborации, когда требуется тесное взаимодействие с персоналом.

Однако наряду с преимуществами биоморфные роботы имеют и ряд существенных недостатков по сравнению с колесными и гусеничными платформами. К ним относятся высокие затраты на разработку, внедрение и эксплуатацию, что может ограничивать их широкое распространение. Они обладают худшей энергетической эффективностью, требуя больше энергии для передвижения, что сокращает время автономной работы. Скорость их перемещения по ровному грунту, как правило, ниже, а грузоподъемность ограничена. Управление такими роботами является более сложным, особенно в условиях ветровых нагрузок, а их конструкция часто более уязвима к повреждениям.

¹ ГОСТ Р 60.2.0.3-2022 Роботы и робототехнические устройства. Сервисные роботы. Биоморфные роботы. Термины и определения

Ремонт биоморфных систем отличается сложностью и продолжительностью, а для работы в экстремальных условиях может требоваться дополнительная подготовка и адаптация.

Несмотря на эти недостатки, биоморфные роботы уже находят практическое применение в железнодорожной отрасли. Например, в вагоноремонтном депо Майнц-Бишофсхайм проходит тестирование роботов Spot компании Boston Dynamics, который был дооснащен оборудованием для идентификации грузовых вагонов, определения их местоположения на путях депо и инспектирования состояния осей колесных пар (рис. 2).

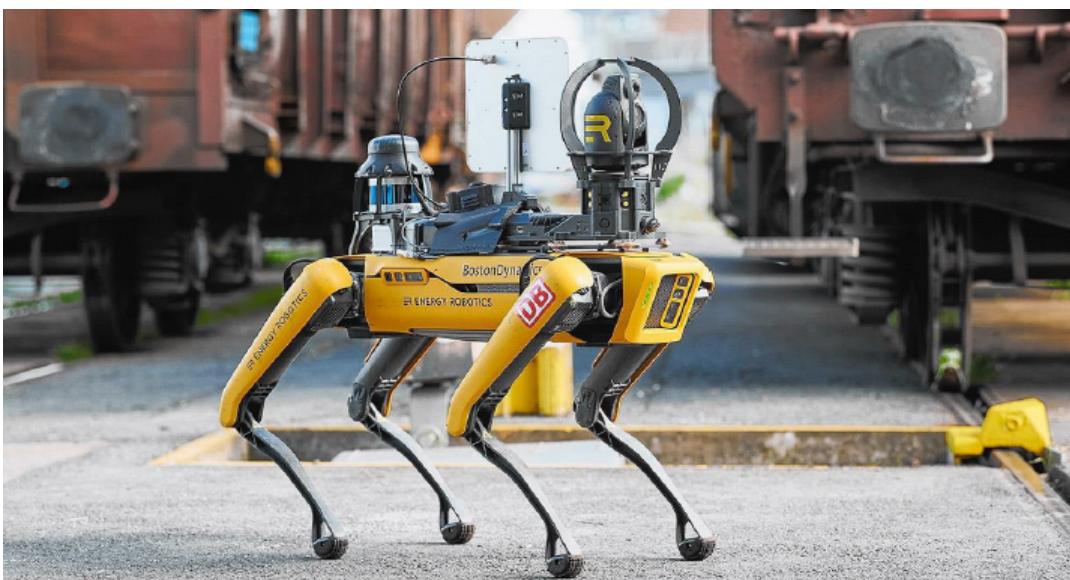


Рис. 2 – Робот Spot компании Boston Dynamics, применяемый корпорацией Deutsche Bahn для инспекции подвижного состава

Spot способен самостоятельно перемещаться по путям и спускаться в смотровые канавы, используя камеры, датчики и алгоритмы искусственного интеллекта для выявления дефектов. Особенность подобных систем заключается в способности формировать и регулярно обновлять цифровую карту окружающей среды, что позволяет им эффективно функционировать в динамически изменяющихся условиях, характерных для железнодорожного транспорта. Аналогично, швейцарская компания railCare использует инспекционных роботов ANYmal для проверки грузовых вагонов, где они с помощью камер и датчиков высокого разрешения обнаруживают мелкие трещины и следы износа на осях колес. Эти примеры демонстрируют такие эффекты внедрения, как компенсация дефицита кадров, повышение безопасности сотрудников за счет отправки роботов в опасные зоны, увеличение скорости и качества проверок, а также долгосрочный рост экономической эффективности. Таким образом, биоморфные роботы, несмотря на текущие ограничения, представляют собой перспективное направление для автоматизации задач технического обслуживания и диагностики на железнодорожном транспорте, особенно в условиях, где требуется мобильность, адаптивность и способность работать в сложной окружающей среде.

Аналогичные испытания Spot проводились компанией Network Rail в Великобритании для обследования путей и инженерных сооружений в опасных зонах, включая тоннели и мосты. В Японии компания Mitsubishi Heavy Industries тестировала схожих с биоморфными роботами для автономной инспекции внутренних пространств тоннелей высокоскоростных магистралей Синкансэн, где требуется высочайшая точность обнаружения малейших трещин и деформаций. Эффект от внедрения таких систем, как показала практика, многогранен: они компенсируют дефицит квалифицированного персонала, исключают нахождение людей в опасных зонах (подвижной состав, высота, ограниченный кислород), значительно повышают скорость, частоту и точность проверок за счет автоматизации и применения алгоритмов машинного зрения, а в долгосрочной перспективе – демонстрируют значительный экономический эффект за счет предотвращения аварий и оптимизации графиков ремонта.

Применение автономных мобильных роботов для диагностики железнодорожной инфраструктуры демонстрирует значительные преимущества по сравнению с традиционными

методами технического контроля. Так, роботизированный комплекс Autonomous Transportable Inspection Trolley, разработанный по заказу компании RFI, обслуживающей инфраструктуру железных дорог Италии, обеспечивает проведение комплексного мониторинга состояния железнодорожного пути, включая контроль геометрических параметров рельсового полотна, выявление поверхностных дефектов и оценку состояния балластного основания. Работа данного комплекса осуществляется в полностью автономном режиме: система следует по заданному маршруту со скоростью до 60 км/ч и в режиме реального времени передаёт результаты измерений, что позволяет существенно повысить оперативность и точность диагностики.

Такие системы особенно эффективны для обследования участков, доступ к которым затруднен или опасен для персонала, например, после природных катаклизмов или аварийных ситуаций [7]. Сравнительный анализ с традиционными методами диагностики демонстрирует принципиальные различия. Классические подходы, такие как визуальный осмотр персоналом или применение специализированных вагонов-дефектоскопов, ограничены высокой трудоёмкостью, зависимостью от человеческого фактора и низкой частотой повторяемости обследований. Кроме того, традиционные методы зачастую обеспечивают лишь выборочный контроль, что снижает полноту мониторинга. В противоположность этому, автономные мобильные системы обеспечивают непрерывность наблюдения, высокую точность геометрических и структурных измерений, а также возможность интеграции с цифровыми платформами анализа данных и предиктивного моделирования.

Автономные мобильные роботы активно используются для повышения безопасности: они патрулируют территории и контролируют критически важные объекты. Например, робот Spot на станциях немецких железных дорог успешно обнаруживает несанкционированное проникновение и потенциальные угрозы. Благодаря оснащенности тепловизорами, газоанализаторами и системами компьютерного зрения, эти роботы обеспечивают круглосуточный мониторинг и оперативное реагирование на изменения. Их ключевое преимущество – возможность работы в экстремальных условиях, таких как низкие температуры или задымленные помещения, где присутствие человека сопряжено с риском.

В сфере логистики автономные мобильные платформы открывают новые возможности. Примером служит проект Pin Handling mR, реализуемый немецкой компанией Hamburger Hafen und Logistik AG совместно с исследовательским центром Института Фраунгофера (рис. 3).

Применяемый в рамках проекта робот управляет дистанционно и призван автоматизировать трудоемкие операции с контейнерными вагонами, включая поиск и установку крепежных штифтов. Это решение повышает эффективность и безопасность процессов, что особенно важно для сортировочных станций и грузовых терминалов, требующих высокой точности и производительности.

Дальнейшее развитие автономных мобильных роботов в железнодорожной отрасли сосредоточено на нескольких направлениях: совершенствование ИИ-алгоритмов для повышения автономности и адаптивности в нештатных ситуациях и развитие систем энергообеспечения, что позволит увеличить продолжительность работы при обследовании протяженных участков инфраструктуры.

Особое внимание уделяется также вопросам стандартизации и интеграции роботизированных систем с существующими технологическими процессами, что является необходимым условием для их широкого внедрения [8].

Рынок железнодорожного искусственного интеллекта вырос с 2,55 миллиарда в 2024 году до 3,02 миллиарда в 2025 году при совокупном годовом темпе роста (CAGR) 18.4%, и ожидается рост до \$5,87 миллиарда к 2029 году [9].

Представленная сводная таблица (Таблица 1) наглядно систематизирует ключевые технологии искусственного интеллекта, определяющие современный облик роботизации на железнодорожном транспорте.



Рис. 3 – Робот проекта Pin Handling mR выполняет автоматизацию трудоёмких и опасных операций с крепёжными элементами на сортировочных станциях и грузовых терминалах

Таблица 1
Сводная таблица по технологиям искусственного интеллекта

Технология	Основные функции / Решаемые задачи	Примеры внедрения	Ключевые ограничения технологии
Компьютерное зрение	Распознавание дефектов, навигация, идентификация объектов	RIIS1005, Guimu Robot, ARGO 2.0, системы покраски	Зависимость от освещения, погоды, необходимость больших наборов данных для обучения
Предиктивная аналитика	Прогнозирование износа, оптимизация ремонтов, управление ресурсом	AutoScan, системы управления ЗИП, цифровые двойники	Требует высококачественных исторических данных, сложность верификации моделей
Глубокое обучение / Нейросети	Классификация дефектов, адаптация к изменениям, обработка естественного языка	ANYmal, робот-гид Xiaotie, алгоритмы диагностики	Высокие вычислительные затраты, «чёрный ящик» (сложность интерпретации решений)
Навигационные алгоритмы (SLAM)	Автономное перемещение, построение карт, позиционирование	Spot, автономные диагностические тележки, роботы-гиды	Проблемы в зонах без GPS (тоннели), требуют мощных сенсоров (лидары, камеры)

Анализ показывает, что каждая из технологий занимает свою нишу в решении отраслевых задач: компьютерное зрение служит основой для восприятия окружающей среды и диагностики, предиктивная аналитика переводит техническое обслуживание на прогнозный уровень, а навигационные алгоритмы обеспечивают критически важную для мобильных систем автономность. При этом их синергия, когда, например, данные с камер обрабатываются глубокими нейросетями для прогнозирования износа, создает качественно новые возможности, недоступные при изолированном применении.

Анализ данных, представленных в Таблице 2, позволяет выявить ключевые тенденции в развитии роботизированных систем диагностики.

Таблица 2
Сравнительный анализ роботизированных систем диагностики

Система / Технолог.	Тип	Объект диагностики	Ключ. преимущества	Ограничения	Стоимость внедр.	Степень автономн.
RIIS1005	Мобильн.	Рельсовое полотно	Высокая скорость, точность до мм	Требует свободного пути	Высокая	Полная (автономный маршрут)
ANYmal	Мобильн.	Ходовые части, низ вагонов	Доступ в опасные зоны, устойчивость	Ограниченнная скорость передвижения	Средняя-высокая	Высокая (но с удаленным контролем)
ARGO 2.0	Стационар. / Коллабор.	Боковая поверхность подвижного состава	Высокая скорость осмотра (2.5 мин/м)	Требует интеграции в депо	Средняя	Средняя (работает по заданной программе)
Spot (Deutsche Bahn)	Мобильн.	Подвижной состав, территория депо	Высокая проходимость, адаптивность	Ограниченнное время работы от батареи	Высокая	Высокая

Наблюдается четкое разделение на высокоскоростные мобильные платформы (такие как RIIS1005) для мониторинга протяженных участков пути и более медленных, но высокоманевренных роботов (например, ANYmal и Spot), предназначенных для детального осмотра в стесненных условиях депо и смотровых канав. Стационарные и коллаборативные решения (ARGO 2.0) демонстрируют максимальную эффективность при интеграции в технологические процессы конкретных объектов, таких как ремонтные цеха. Основным ограничением для мобильных систем остается энергообеспечение, в то время как для стационарных – высокая стоимость адаптации инфраструктуры. Таким образом, выбор оптимальной системы диагностики напрямую зависит от решаемой задачи: скорости охвата территории, требуемой детализации и бюджета проекта.

Однако внедрению этих технологий препятствуют общие и специфические ограничения. К первым относятся высокая ресурсоемкость и зависимость от качества данных, ко вторым – такие узкоотраслевые проблемы, как навигация в условиях отсутствия GPS-сигнала в тоннелях или сложность сертификации вероятностных ИИ-моделей по жестким железнодорожным стандартам безопасности.

Таким образом, дальнейший прогресс связан не только с совершенствованием самих алгоритмов, но и с созданием адаптированной к реалиям железной дороги технологической и нормативной экосистемы.

2. Применение роботов в железнодорожной отрасли

Анализ международного опыта, систематизированный в Таблице 3, выявляет ярко выраженную национальную специфику в подходах к роботизации железнодорожного транспорта.

Страны-лидеры демонстрируют не просто внедрение отдельных роботов, а реализацию комплексных стратегий, отражающих их экономические приоритеты и технологические компетенции. Так, Китай делает акцент на скоростном и масштабном внедрении в области строительства и инфраструктуры, что соответствует логике его общегосударственных программ развития. В то же время Германия и другие страны ЕС фокусируются на интеграции высоконадежных решений в существующую сложную инфраструктуру, уделяя особое внимание повышению качества и предиктивному обслуживанию.

Таблица 3
Таблица международного опыта и лидеров по странам

Страна	Ключевые компании / проекты	Основные направления роботизации	Характерные особенности подхода
Китай	China Railway, RIIS1005, Guimu Robot, Hubei Sanjiang Boli	Строительство, диагностика путей, пассажирский сервис (Xiaotie)	Масштабные государственные программы, ориентация на скорость и массовое внедрение
Германия / ЕС	Deutsche Bahn, Siemens, Robel Rail Automation, Fraunhofer	Диагностика подвижного состава (Spot), ремонт путей, пассажирский сервис	Высокие стандарты качества, интеграция в существующую инфраструктуру, акцент на надежность
Япония / Южная Корея	(Подразумеваются по контексту лидерства)	Высокоскоростные поезда, автономное управление, роботы-диспетчеры	Высокая степень автоматизации, ориентация на точность и безопасность, инновационные интерфейсы
Италия / Швейцария	RFI, RFI (Autonomous Transportable Inspection Trolley), railCare (ANYmal)	Диагностика инфраструктуры и подвижного состава	Разработка специализированных высокоточных решений, акцент на предиктивном обслуживании
Россия	ОАО «РЖД», АО «НИИАС»	Сортировочные станции, системы растормаживания	Акцент на автоматизацию ключевых логистических узлов, импортозамещение

Данные различия подчеркивают, что не существует универсальной модели роботизации. Выбор приоритетных направлений зависит от таких факторов, как размеры и возраст инфраструктуры, стоимость рабочей силы, развитость национальной научно-технической базы и наличие целевых государственных программ финансирования. Представленный сравнительный анализ позволяет не только идентифицировать лучшие практики, но и оценить их потенциальную применимость в конкретных национальных контекстах, учитывая необходимость адаптации технологий к локальным условиям эксплуатации, нормативным требованиям и экономическим реалиям.

2.1 Техническое обслуживание и диагностика

Современные системы технического обслуживания и диагностики железнодорожного транспорта претерпевают радикальные изменения благодаря внедрению робототехнических комплексов нового поколения. Эти технологии позволяют перейти от традиционных методов визуального осмотра и ручных измерений к автоматизированным процессам непрерывного мониторинга с высочайшей точностью [10, 11], а также снизить эксплуатационные расходы [12]. Особенностью современных диагностических систем является их способность не только фиксировать текущее состояние оборудования, но и прогнозировать его изменение, используя сложные алгоритмы анализа данных.

Ключевым направлением развития стало создание мобильных диагностических платформ, способных автономно перемещаться по железнодорожным путям и проводить комплексное обследование инфраструктуры [13]. Итальянская компания RFI применяет уникальный 21-тонный беспилотный диагностический комплекс, который способен развивать скорость до 200 км/ч при проведении мониторинга высокоскоростных линий. Этот робот оснащен лидарами, инфракрасными и оптическими камерами с дальностью распознавания объектов до 500 метров, что позволяет выявлять малейшие отклонения от нормативных показателей [14].

Для диагностики подвижного состава применяются специализированные роботизированные комплексы, такие как HYDBOX ONE чешской компании Techinn. Эта система предназначена для автоматизированного обслуживания тормозных систем, агрегатов и аккумуляторов. Робот способен создавать давление до 60 бар и поддерживать чистоту масла по стандарту NAS 1638 до уровня 8, что соответствует самым строгим требованиям к техническому обслуживанию. Подобные решения значительно повышают качество обслуживания за счет исключения человеческого фактора и обеспечения стабильно высоких параметров выполняемых операций.

Интересны передовые разработки в области диагностики ходовых частей вагонов с использованием мобильных роботов. Немецкие железные дороги успешно тестируют робота Spot производства Boston Dynamics, оснащенного системой RFID-идентификации вагонов и комплексом датчиков для осмотра осей колесных пар. Робот массой 25 кг способен самостоятельно перемещаться по территории депо, спускаться в смотровые канавы и проводить визуальный контроль с последующей передачей данных оператору. Такие системы особенно эффективны при плановых осмотрах, позволяя значительно сократить время проверки каждого вагона.

Перспективным направлением является разработка роботизированных комплексов для диагностики контактной сети. Немецкая компания Siemens Mobility совместно с норвежской Railway Robotics создала робота Railchap, специализирующуюся на осмотре стрелочных переводов (рис. 4).

Этот автономный комплекс массой 50-60 кг способен передвигаться со скоростью 20 км/ч, проводя детальную диагностику критически важных элементов инфраструктуры. По оценкам разработчиков, применение таких систем позволяет сократить затраты на обслуживание на 80% по сравнению с традиционными методами.

Развитие диагностических роботов тесно связано с совершенствованием методов обработки данных. Современные системы используют алгоритмы машинного зрения и искусственного интеллекта для автоматического выявления дефектов и их классификации по степени опасности. Ярким примером служит швейцарская компания railCare, использующая роботов ANYmal с высокоточными датчиками.

Эти устройства выявляют даже микротрещины и признаки износа на колесных осях. Подобные решения не просто улучшают качество диагностики – они формируют детальную цифровую базу данных о состоянии каждого элемента, что критически важно для оценки его оставшегося срока службы.

При внедрении роботизированных систем обслуживания ключевое значение имеет их совместимость с действующей железнодорожной инфраструктурой. Перспективные разработки вроде ARGO 2.0 успешно интегрируются в традиционные процессы. Этот 140-килограммовый коллaborативный робот проводит полную диагностику подвижного состава со скоростью 2,5 минуты на метр и работает автономно до 10 часов. Главное преимущество системы – универсальность: она адаптируется к различным типам вагонов и локомотивов, что делает её ценным инструментом для железнодорожных операторов.



Рис. 4 – Робот Railchap предназначен для автономной диагностики и мониторинга критически важных элементов железнодорожной инфраструктуры, в первую очередь – стрелочных переводов

2.2 Строительство и реконструкция

Роботизированные технологии кардинально преобразуют процессы строительства и реконструкции железнодорожной инфраструктуры, предлагая инновационные решения для самых сложных задач. Внедрение автоматизированных систем позволяет значительно ускорить темпы работ, повысить точность выполнения операций и снизить риски для персонала².

Китайские строительные компании демонстрируют впечатляющие результаты в автоматизации процессов укладки путей, где специализированные роботизированные комплексы достигают производительности до 2 км пути в сутки. Эти системы работают круглосуточно, выполняя операции по выравниванию, укладке и фиксации рельсов с точностью до миллиметра. Особого внимания заслуживает автоматизация монтажа контактной сети, где роботы-манипуляторы с системами технического зрения самостоятельно размещают и закрепляют элементы подвески. Алгоритмы распознавания изображений позволяют точно позиционировать компоненты даже в сложных погодных условиях, при этом несколько роботов могут работать согласованно над одной задачей.

В области ремонта и обслуживания путей немецкая компания Robel Rail Automation представила революционную систему на базе промышленных роботов FANUC (рис. 5). Этот комплекс способен выполнять полный цикл ремонтных работ, включая сварку, фрезерование и шлифовку рельсов, с высочайшей точностью. Особенностью системы является ее способность автоматически обнаруживать внутренние и внешние дефекты и выбирать оптимальный метод восстановления.

Европейские железные дороги уже начали внедрять первые прототипы таких систем, коммерческая доступность которых ожидается в ближайшие годы.

Перспективным направлением стало применение роботов для строительства тоннелей и подземных сооружений. Британский консорциум во главе с Tunnel Engineering Services разработал интегрированную роботизированную систему ATRIS, способную автономно выбирать, транспортировать и устанавливать кронштейны вдоль стен тоннелей. В ходе испытаний на специальном полигоне два робота успешно продемонстрировали полный цикл работ в тоннеле диаметром 4 метра. Такие решения особенно актуальны для строительства метрополитенов и подземных участков железных дорог, где традиционные методы требуют значительных временных и трудовых затрат.



Рис. 5 – Роботизированная система FANUC (предназначена для автоматизации полного цикла ремонтных работ на железнодорожных путях, включая высокоточные операции по восстановлению рельсов)

²Особенно ярко эти преимущества проявляются при строительстве высокоскоростных магистралей, где требования к качеству и точности исполнения особенно высоки.

Отдельного внимания заслуживают разработки в области покраски и антакоррозийной обработки подвижного состава. Китайская компания Hubei Sanjiang Boli создала робота SIMAN-20C, способного выполнять полную покраску вагонов как снаружи, так и изнутри. Длинный манипулятор робота обеспечивает доступ ко всем участкам поверхности, а специальные алгоритмы управления позволяют наносить лакокрасочные материалы равномерным слоем. Полный цикл обработки одного вагона занимает около 4 часов, что значительно быстрее ручного метода, при этом достигается существенная экономия материалов и повышается качество покрытия.

Развитие роботизированных систем для строительства и модернизации железных дорог тесно связано с совершенствованием технологий цифрового моделирования. Современные программные комплексы, такие как FANUC ROBOGUIDE, обеспечивают возможность моделирования всех этапов производственного процесса, точного расчёта временных циклов и оптимизации траекторий движения оборудования. Данные функции приобретают особую значимость при реализации сложных операций в ограниченных условиях железнодорожной инфраструктуры. Применение технологии цифровых двойников позволяет апробировать и корректировать программы управления роботами в виртуальной среде до их внедрения в практическую эксплуатацию, что существенно снижает уровень рисков и повышает общую эффективность выполняемых работ.

Современное железнодорожное строительство переживает технологическую трансформацию с внедрением роботизированных систем и автоматизации [15]. Роботизация железнодорожной инфраструктуры представляет собой комплексный подход к применению автономных систем для строительства, реконструкции и обслуживания железнодорожных объектов [16]. Данная область развивается в рамках концепции Railroad Infrastructure 4.0, которая объединяет цифровые и физические устройства в киберфизические системы, переводя выполнение операций по обслуживанию железнодорожной инфраструктуры на иной технологический уровень [17].

Разработаны автоматизированные системы строительства модульных рельсовых структур для работы в опасных условиях [18]. Эти системы включают роботов-транспортировщиков и роботов-конструкторов, которые совместно доставляют и монтируют модули рельсовых конструкций [19]. Система способна наращивать рельсовый путь путем присоединения дополнительных сегментов к существующей конструкции [20].

Разработано железнодорожное строительное транспортное средство, оснащенное порталной конструкцией и роботизированной рукой, установленной между стойками [21]. Роботизированная рука сконфигурирована для позиционирования вставок в плиту из свежего бетона в зоне строительства, расположенной под порталом.

Внедрены методы геодезической поддержки железных дорог при автоматизации технологических строительных процессов [22]. Система автоматизированного проектирования ACS-3D обеспечивает геодезические данные для расчета пространственного положения рабочих органов строительного оборудования, включая координаты, пространственную ориентацию и геометрические параметры.

Китайские железные дороги внедряют интеллектуальные технологии строительства (ICRE), которые включают семь ключевых технических систем поддержки [23]:

- Стандартная система BIM для железнодорожного сектора;
- Платформа управления технологиями на основе BIM + GIS;
- Система интеллектуального восприятия на основе технического зрения;
- Интеллектуальная система связи на основе интернета вещей (IoT);
- Платформа управления строительством на основе облачных вычислений и больших данных;
- Беспилотная операционная система на основе искусственного интеллекта;
- Интеллектуальные автономные машины и роботы.

Масштабные инфраструктурные проекты Китая, такие как высокоскоростные магистрали Пекин-Чжанцзякоу, стали полигоном для внедрения комплексной системы интеллектуального строительства железнодорожных дорог (Intelligent Construction of Railway Engineering, ICRE). Данная система представляет собой не набор разрозненных технологий, а целостную экосистему, где семь ключевых технических систем тесно интегрированы и работают взаимосвязано. Её основу составляют сквозные цифровые технологии, пронизывающие весь жизненный цикл объекта – от проектирования

до эксплуатации. Как иллюстрирует Таблица 4, ядром этой экосистемы является стандартизированная система BIM, выполняющая роль единого источника правды о проекте.

Таблица 4
«Умные» технологии в железнодорожном строительстве (ICRE) Китая

Ключевая техническая система (из [24])	Краткое описание	Роль в роботизации
Стандартная система BIM	Создание и использование цифровых моделей железнодорожных объектов	Основа для проектирования и работы автономной техники
BIM + GIS платформа управления	Интеграция информационных моделей с геопространственными данными	Точное позиционирование и планирование работ роботов на местности
Система интеллектуального восприятия	Датчики и компьютерное зрение для сбора данных	«Глаза и уши» роботов, обеспечение их обратной связи с окружением
Интеллектуальная связь (IoT)	Сеть для обмена данными между устройствами	Связь между роботами, центрами управления и другими системами
Платформа управления на основе облака	Централизованная обработка больших данных	Аналитика и принятие решений ИИ, управление парком роботов
Беспилотная операционная система	Программное обеспечение для автономной работы	«Мозг» системы, управляющий действиями роботов без вмешательства человека
Интеллектуальные машины и роботы	Непосредственно исполнительные механизмы	Физическое выполнение задач (укладка, сварка, диагностика)

Она тесно связана с платформой управления на основе BIM и GIS, что обеспечивает точную привязку данных к местности. Технологии восприятия, связи и облачные вычисления образуют «нервную систему» для сбора и обработки информации в реальном времени, в то время как беспилотные операционные системы и интеллектуальные машины выступают в качестве «исполнительных органов». Такой подход позволяет перейти от механической автоматизации отдельных процессов к управлению строительством как единым киберфизическим комплексом, что кардинально повышает скорость, точность и управляемость работ.

Разработаны адаптивные цифровые технологические регламенты для инженерной и интеллектуальной поддержки строительства железнодорожных объектов [24]. Отличительной особенностью является возможность автоматической корректировки регламента для адаптации технологического процесса к изменяющимся условиям работы.

Предложена система роботизированной инспекции и ремонта (RIRS), использующая коммерческие беспилотные наземные транспортные средства и промышленные манипуляторы [25]. Система обеспечивает навигацию к путям, преобразование дорога-рельс, инспекцию и ремонт на путях с поддержкой специально разработанной тележки.

Разработана автономная рельсо-дорожная амфибийная роботизированная система для обслуживания железных дорог, использующая синтез датчиков и мобильный манипулятор [13]. Система обеспечивает автономную мобильность по дороге и рельсам, выполняя полный набор операций по обслуживанию в несколько этапов.

Внедряются роботизированные системы для обнаружения трещин в рельсах, оснащенные камерами высокого разрешения и передовыми алгоритмами обнаружения объектов [7, 26]. Эти системы обеспечивают эффективное и точное обнаружение дефектов рельсов, повышая безопасность и операционную эффективность железных дорог.

В рамках проекта вывода из эксплуатации АЭС Фукусима-1 разработана автоматизированная система строительства модульной рельсовой структуры. Система может строить инфраструктуру для передвижения и работы роботов в опасных условиях, где человеческая работа затруднена.

Британская компания Network Rail использует роботов hyperBots для ремонта и строительства новых подземных туннелей для региональной железнодорожной инфраструктуры Великобритании [27]. Роботы способны к 3D-печати оболочек туннелей и развертыванию строительных материалов непосредственно на землю.

ОАО «Российские железные дороги» внедряет роботизированные системы для обеспечения бесперебойного функционирования сортировочных станций, включая автоматическое расформаживание и расцепление железнодорожных вагонов [28]. Цифровизация, автоматизация и роботизация развиваются как незаменимые инструменты для желаемой трансформации железных дорог.

В Китае реализуются проекты интеллектуального строительства железных дорог, представленные высокоскоростными железными дорогами Пекин-Чжанцзякоу и Пекин-Сюань. Системы технической поддержки ICRC появились в Китае и находятся в процессе углубления исследований базовых технологий и предварительного применения.

Роботизированные системы обеспечивают существенные преимущества в плане снижения рисков для здоровья и потенциальных смертей [29]. Использование автоматизированного строительного оборудования может привести к значительной экономии за счет повышения производительности и увеличения скорости работы.

Автоматизация и роботизация способны в будущем играть ключевую роль в развитии циркулярного строительства путем повышения производительности, сокращения отходов, повышения безопасности и смягчения последствий нехватки рабочей силы [30]. Роботизация обслуживания железнодорожной инфраструктуры позволяет снизить затраты на обслуживание и повысить эффективность выполнения задач.

Роботизированные системы демонстрируют более высокую точность и надежность по сравнению с традиционными методами [12]. Большинство разработанных роботизированных и автономных систем (RAS) предназначены для обслуживания подвижного состава, за которым следует обслуживание железнодорожных путей, что обусловлено усилением конкуренции, быстрым расширением и постоянно растущими расходами.

Интеллектуальные системы обеспечивают эффективное распределение ресурсов и адресный ремонт. Точная информация о местоположении и серьезности трещин позволяет эффективно распределять ресурсы и проводить адресный ремонт, минимизируя закрытие путей и сокращая время простоя и нарушения в работе поездов.

Внедрение автоматизированных систем укладки путей, роботов для инспекции и ремонта, а также интеллектуальных технологий управления обеспечивает значительные экономические преимущества через повышение безопасности, производительности и снижение эксплуатационных затрат. Успешные проекты в различных странах демонстрируют практическую применимость и эффективность роботизированных решений в железнодорожном строительстве.

2.3 Обслуживание пассажиров

Современные железнодорожные станции также являются объектом применения высоких технологий, в том числе роботизированных комплексов, которые становятся неотъемлемой частью пассажирского сервиса. Внедрение роботов направлено на повышение эффективности обслуживания, снижение операционных расходов и улучшение пользовательского опыта [31]. Данный раздел рассматривает ключевые направления применения роботизированных технологий в обслуживании пассажиров на железнодорожных станциях.

Роботизированные системы предлагают инновационные механизмы повышения уровня комфорта и качества предоставляемых услуг на железных дорогах. Интеллектуальные технологии не только оптимизируют традиционные процессы, но и формируют новые форматы коммуникаций.

Немецкие железные дороги (DB) активно тестируют автономную уборочную машину Manni на центральном вокзале Франкфурта-на-Майне, демонстрируя возможности роботизации рутинных процессов. Этот комплекс оснащен лазерными и ультразвуковыми датчиками, спутниковой навигацией и системой компьютерного зрения, что позволяет ему самостоятельно перемещаться в потоке пассажиров, избегая столкновений. Машина способна обрабатывать до 12 000 квадратных метров площади в сутки, собирая не только мелкий мусор, но и более крупные предметы типа

пластиковых стаканов. Особенностью системы является ее способность работать в подземных помещениях вокзала с минимальным вмешательством персонала.

На выставке «ИнноТранс 2024» китайские специалисты из компании China Railway Xi'an Bureau Group Co. представили гуманоидного робота Xiaotie, который демонстрирует новый уровень развития сервисных технологий в пассажирском секторе. Данный робот, оснащенный системами искусственного интеллекта на основе больших языковых моделей, способен поддерживать содержательные диалоги, предоставлять справочную информацию и сопровождать пассажиров к необходимым объектам инфраструктуры железнодорожной станции.

Австралийская компания Downer совместно с Институтом исследований интеллектуальных систем Университета Дикина осуществляет разработку первых в мировой практике полностью автономных роботизированных комплексов для уборки пассажирских вагонов. Интеграция сенсорных систем, включающих видеокамеры и лидары Livox Mid-360, обеспечивает адаптивность роботов к сложной внутренней архитектуре подвижного состава. Такие устройства демонстрируют способность к маневрированию в ограниченном пространстве, эффективной уборке труднодоступных зон и автоматической коррекции маршрута при возникновении препятствий.

Сравнительный анализ этих практик демонстрирует существование двух различных стратегий применения робототехники в пассажирском железнодорожном сервисе. Китайская модель ориентирована на улучшение качества обслуживания пассажиров и повышение уровня комфорта через интеллектуальные интерфейсы взаимодействия, в то время как австралийская инициатива делает акцент на оптимизации эксплуатационных процессов и снижении операционных затрат. Однако обе стратегии имеют точки пересечения – ключевым направлением дальнейшего развития становится интеграция роботизированных решений с унифицированными цифровыми платформами управления вокзальной и транспортной инфраструктурой. Такая интеграция позволяет формировать единую экосистему пассажирского сервиса, обеспечивающую как повышение качества обслуживания, так и рост эффективности функционирования железнодорожного транспорта.

Современные роботы-гиды не просто предоставляют справочную информацию, но и подключены к системам онлайн-расписания, электронной регистрации и контроля доступа. Это позволяет им в реальном времени информировать пассажиров об изменениях в графике движения, помогать с пересадкой на другие виды транспорта и даже осуществлять простые транзакционные операции. Подобные комплексные решения уже тестируются на крупных транспортных узлах Азии и Европы, демонстрируя потенциал для создания принципиально новой среды пассажирского обслуживания.

Особую роль в развитии роботизированного пассажирского сервиса играют технологии компьютерного зрения и обработки естественного языка. Эти решения позволяют создавать интуитивно понятные интерфейсы взаимодействия, учитывающие особенности разных категорий пассажиров. Например, современные системы способны распознавать язык жестов или адаптировать форму подачи информации для людей с ограниченными возможностями. Такие разработки не только повышают качество сервиса, но и способствуют созданию инклюзивной транспортной среды, соответствующей принципам устойчивого развития.

Роботы-гиды представляют собой одно из наиболее успешных применений робототехники на железнодорожных станциях. Исследования показывают, что роботизированные системы навигации способны успешно направлять 68% пассажиров к нужным местам назначения [32, 33]. Эти роботы оснащены системами человека-машины диалога, 3D-зрением, навигационными системами и искусственными конечностями для взаимодействия с пассажирами [34].

Современные роботы-гиды используют полуавтономный режим работы, при котором механизм запроса оператора корректно запрашивает помочь человека в 85% необходимых ситуаций, при этом оператор контролирует робота только 25% времени эксперимента. Это обеспечивает оптимальный баланс между автономностью и контролем со стороны человека.

Станционные роботизированные системы включают модули человека-машины взаимодействия, навигации и идентификации личности. Система использует сервер Beidou для передачи маршрутной информации, модуль навигации направляет робота, который перемещается по станции согласно полученным данным. Роботы способны собирать

информацию о лицах персонала и передавать её в центральный процессор для сравнения с базой данных общественной безопасности [35].

Современные железнодорожные станции внедряют речевые системы запросов, которые позволяют пассажирам задавать вопросы голосом и получать ответы в аудиоформате. Система обеспечивает ответы на широкий спектр часто задаваемых вопросов, включая информацию о поездах, наличии мест и статусе бронирования, при этом большинство запросов получают ответ менее чем за 10 секунд [36].

Роботизированные системы проверки билетов генерируют планы проверки на основе базовых данных пассажирских билетов и информации о прибытии и отправлении поездов в реальном времени. Система выполняет проверку действительности билетов и карт China Railway, пропуская пассажиров с действительными билетами и выдавая соответствующие предупреждения об ошибках для недействительных билетов [37].

Многофункциональные системы проверки билетов включают модуль идентификации двумерного кода, процессорный модуль, модуль индикации и сигнализации, а также модуль автоматической обрезки. Эти системы снижают трудоёмкость работы персонала по проверке билетов и эффективно предотвращают посадку пассажиров на неправильный поезд или с поддельными билетами [38].

Для решения проблем навигации на крупных высокоскоростных станциях разработаны интеллектуальные сервисные роботы, использующие лазерную SLAM-технологию и алгоритм картографирования Gmapping для локализации в помещениях и генерации карт. Роботы применяют расширенную фильтрацию Калмана для локализации, комбинируя данные IMU и одометра, а также используют алгоритм глобального планирования пути Дейкстры в качестве навигационного алгоритма [39].

Системы поддержки маршрутной навигации на железнодорожных станциях способны автоматически распознавать прибытие на станцию и отслеживать местоположение пассажиров. Когда пользователь запрашивает услугу навигации через смартфон, система направляет к оптимальному входу на станцию, а при прибытии автоматически распознаёт пассажира с помощью маяка, установленного у входа, и запускает службу навигации с использованием робота-года [40].

Интеллектуальные роботы для железнодорожных станций оснащены комплексными системами безопасности, включающими детекторы сейсмических волн, генераторы высокого напряжения, устройства для чтения билетов и проверки личности. Роботы имеют механические руки с лазерными указателями, системами подавления беспорядков, устройствами для тушения пожаров и камерами распознавания изображений. Головная часть робота включает платформу для беспилотного летательного аппарата, мощное ослепляющее устройство, ультравысокочастотный громкоговоритель, высокочувствительные датчики дыма и температуры. Эти роботы обладают возможностями обнаружения, сигнализации, указания, утилизации и самообороны во время пожаров, землетрясений и террористических атак [41].

Интеллектуальные системы безопасного прохода включают подсистемы входной проверки личности, досмотра людей и багажа, проверки билетов и посадки, а также выходной проверки билетов [42]. Роботы в этих системах обеспечивают услуги проверки безопасности через автоматические технические средства, что повышает качество обслуживания, эффективность проверки и снижает интенсивность ручного труда.

Системы защиты безопасности пассажиров на платформах включают датчики скорости, сигнальные предупреждающие огни, лазерные устройства обнаружения, звуковые предупреждения, микропроцессоры и устройства контроля доступа. Эти системы не только быстро и эффективно напоминают пассажирам о безопасности, но и одновременно уведомляют соответствующий персонал станции о необходимости принятия соответствующих мер [43].

Внедрение роботизированных систем значительно повышает эффективность пассажирского обслуживания. Роботы-диспетчеры в Японии предоставляют туристическую информацию, прогнозы погоды, объявления о мероприятиях, экстренные уведомления, объяснения по покупке билетов, операции с турникетами и уведомления о времени отправления и прибытия поездов [44].

Система интеллектуального обслуживания пассажирских поездов на основе сервисных роботов может выполнять проверку билетов, их замену, наблюдение за багажом и связь с работниками, что улучшает качество обслуживания поездов для пассажиров, снижает трудозатраты работников и характеризуется высокой эффективностью работы [45].

Роботизированные системы способствуют значительному снижению операционных расходов. Система станционных роботов характеризуется высокой степенью интеллекта и хорошим эффектом направляющего обслуживания, что позволяет снизить трудозатраты станции. Автономные роботы поддержки оборудования терминалов обслуживания клиентов приближаются к станционному сервисному оборудованию с соответствующей скоростью и поддерживают его в соответствующем сервисном отношении к клиенту [46].

Коллаборативные роботы (CoBoT) разработаны специально для сопровождения людей с ограниченной мобильностью на железнодорожных станциях. Эти роботы предоставляют систему, которая может следовать по маршрутам на основе позиционирования внутри железнодорожной станции, направляя людей с ограниченной мобильностью для удобного использования станций [47].

Цифровая трансформация пассажирского железнодорожного транспорта включает установку цифровых экранов и внедрение интерактивных информационных систем, что не только улучшает пользовательский опыт, но и открывает новые источники доходов через целевые рекламные возможности. Внедрение цифровых экранов и интерактивных систем способствует более устойчивому и экологически чистому виду транспорта, сокращая зависимость от бумажных информационных материалов [48].

Представленные исследования демонстрируют значительный потенциал роботизированных систем в улучшении пассажирского обслуживания на железнодорожных станциях. Однако следует отметить ограничения существующих разработок: большинство источников представляют патентные документы, что может указывать на раннюю стадию практического внедрения технологий. Кроме того, многие системы требуют значительных инвестиций в инфраструктуру и обучение персонала. Эффективность роботов-гидов (68% успешных направлений) показывает хорошие результаты, но оставляет место для улучшений. Необходимы дальнейшие исследования для повышения автономности систем и снижения зависимости от человеческого контроля.

Роботизация железнодорожных станций представляет собой перспективное направление развития транспортной инфраструктуры. Внедрение роботов-помощников, автоматизированных систем навигации, роботизированных компонентов безопасности и цифровых информационных систем способствует повышению качества обслуживания пассажиров, снижению операционных расходов и улучшению доступности транспортных услуг. Будущее развитие отрасли связано с интеграцией искусственного интеллекта, машинного обучения и интернета вещей для создания полностью автономных и адаптивных систем обслуживания пассажиров. Ключевыми направлениями развития являются повышение точности навигационных систем, расширение функциональности роботов безопасности и создание персонализированных сервисов для различных категорий пассажиров.

3. Ограничения и перспективы

3.1 Основные ограничения

Железнодорожная отрасль традиционно является консервативной индустрией с медленным внедрением инноваций. Несмотря на это, применение роботов и автономных систем в железнодорожном секторе привлекает все больше внимания из-за преимущества в области обеспечения безопасности и снижения затрат [16]. Современные технологии, такие как роботы и искусственный интеллект, еще не получили широкого распространения в железнодорожной отрасли [49]. Железнодорожная инфраструктура создает уникальные проблемы для робототехники из-за своего разнообразия, размеров, форм и удаленности по сравнению с другими отраслями. Неровная поверхность пути, ограниченное пространство в туннелях и мостах, наличие платформ и элементов контактной сети создают навигационные проблемы для автономных роботов [50], включая необходимость обеспечения стабильной связи между центром управления и мобильными роботами, проблемы с передачей данных из-за отсутствия интернет-связи на удаленных участках инфраструктуры, ограниченную навигацию в зонах без GPS-сигнала (туннели) [51]. Большинство мобильных манипуляторов работают от батарей, но для выполнения энергоемких задач (сварка, шлифовка, подъем) требуются мощные батареи, увеличивающие вес системы. Близость между камерами и компонентами подвижного состава создает проблемы для

получения четких изображений, особенно при движении на высоких скоростях и в условиях низкой освещенности [52, 53].

Несмотря на значительный прогресс в области роботизации железнодорожного транспорта, массовому внедрению этих технологий препятствует комплекс взаимосвязанных проблем, требующих системного решения. Технологические ограничения проявляются прежде всего в зависимости от импортных компонентов, особенно в части высокоточной механики, сенсоров и вычислительных модулей, что создает уязвимости в условиях geopolитической нестабильности. Многие современные робототехнические системы используют специализированные процессоры и алгоритмы искусственного интеллекта, разработка которых сосредоточена в нескольких технологически развитых странах, что осложняет их адаптацию к локальным условиям эксплуатации.

Экономические барьеры связаны с высокой капиталоемкостью разработки и внедрения роботизированных систем, что особенно остро проявляется в странах с относительно низкой стоимостью рабочей силы. Полный цикл внедрения, включающий закупку оборудования, интеграцию с существующей инфраструктурой, обучение персонала и техническую поддержку, требует значительных инвестиций, срок окупаемости которых может превышать 5-7 лет. Дополнительную сложность создает необходимость модернизации сопутствующей инфраструктуры – многие действующие депо и ремонтные базы не приспособлены для работы с автономными мобильными роботами, что требует дополнительных капиталовложений.

Значительный экономический барьер представляют существенные капитальные затраты на автоматизацию и необходимое улучшение инфраструктуры [54]. Экономические факторы сильно ограничивает инновационную деятельность для железнодорожных грузоперевозок в целом и в отношении автономного управления поездами в частности [55]:

- Иерархическая архитектура стоимостных сетей – существующая сложная система железных дорог допускает только постепенные изменения;
- Зависимость от выбранного пути – радикальные инновации разрушают компетенции и девальвируют инвестиции;
- Организационная динамика – компании фокусируются на основном бизнесе, что затрудняет принятие решений о внедрении подрывных технологий;
- Технологический застой – отсутствие роста рынка из-за недостатка инноваций.

Стоимость обслуживания подвижного состава железных дорог составляет значительную часть общих затрат железнодорожного транспорта. Внедрение робототехники может обеспечить эффективное и экономически выгодное выполнение задач обслуживания при максимизации безопасности, качества и стабильности обслуживания [56].

Кадровые проблемы представляют собой серьезное ограничение для широкого внедрения робототехники. С одной стороны, наблюдается острый дефицит специалистов, способных обслуживать сложные робототехнические комплексы, с другой – автоматизация вызывает сопротивление со стороны персонала, опасающегося сокращения рабочих мест. Подготовка квалифицированных кадров требует времени и значительных инвестиций в образовательные программы, при этом текущие темпы подготовки не успевают за скорость технологического развития. Особую сложность представляет необходимость переподготовки опытных работников, многие из которых обладают практическими знаниями, но испытывают трудности в освоении новых цифровых инструментов.

Нормативно-правовые ограничения связаны с отсутствием единых международных стандартов для сертификации автономных систем в железнодорожной отрасли. Действующие нормативно-правовые акты во многих случаях не отражают специфики функционирования робототехнических систем, особенно с точки зрения обеспечения безопасности и распределения ответственности за принимаемые решения. Сохраняющаяся правовая неопределенность в области применения искусственного интеллекта, обработки больших массивов данных и обеспечения кибербезопасности формирует дополнительные риски для инвесторов и операторов инфраструктуры. Наиболее выражено данное противоречие проявляется при внедрении систем компьютерного зрения и предиктивной аналитики, функционирование которых сопряжено с обработкой персонализированных данных и потенциальным вмешательством в критические технологические процессы. Технические ограничения эксплуатационного характера обусловлены низкой адаптивностью ряда робототехнических решений к экстремальным климатическим

условиям. Воздействие температурных аномалий, интенсивных осадков, сильных ветровых нагрузок и иных природных факторов приводит к существенному снижению точности сенсорных измерений и снижению надёжности механических компонентов, что ограничивает эффективность функционирования систем в условиях реальной эксплуатации.

Сертификация новых технологий остается также открытым вопросом [57]. ИИ-системы адаптивны и открыты для различных сценариев, что затрудняет их сертификацию на основе текущих стандартов CENELEC [58]. Машинно-обученные модели по своей сути вероятностны, что также усложняет их формальную верификацию. Отсутствие стандартизации в формализмах моделирования затрудняет определение универсальных сертификатов и их проверку. Необходимо расширение или модификация стандартов CENELEC для сертификации систем на основе ИИ. Кроме того, гарантии безопасности и надежности являются ключевыми для широкого принятия и использования технологий промышленностью и обществом. Отсутствие измеримого доверия для целей сертификации представляет значительную проблему [59].

Проблемы энергообеспечения ограничивают автономность мобильных платформ – даже современные аккумуляторные системы часто не обеспечивают необходимую продолжительность работы между зарядками для обследования протяженных участков инфраструктуры. Дополнительные сложности создают особенности железнодорожного транспорта – вибрации, электромагнитные помехи и требования по взрывозащищенности, которые необходимо учитывать при проектировании робототехнических комплексов.

Психологические и социальные факторы также играют значительную роль в ограничении темпов внедрения. Пассажиры и персонал не всегда готовы доверять автоматизированным системам, особенно в вопросах безопасности. Инциденты с участием роботов, даже незначительные, получают широкий общественный резонанс и могут подорвать доверие к технологиям. Культурные особенности разных стран требуют индивидуального подхода к проектированию интерфейсов взаимодействия – то, что хорошо работает в азиатских странах, может оказаться неприемлемым для европейского или российского потребителя.

Представленный анализ ключевых ограничений (Таблица 5), сдерживающих широкомасштабную роботизацию на железнодорожном транспорте, демонстрирует, что барьеры носят комплексный и взаимосвязанный характер. Технологические вызовы, такие как проблемы энергообеспечения и навигации, напрямую влияют на экономическую целесообразность внедрения, определяя высокую капиталоемкость и сроки окупаемости проектов. В свою очередь, эти экономические факторы усугубляются неразвитостью нормативной базы и дефицитом квалифицированных кадров, создавая своего рода «порочный круг», замедляющий распространение передовых решений.

Таблица 5
Таблица анализа ограничений и предлагаемых решений

Категория ограничений	Конкретные вызовы	Предлагаемые пути решения / Перспективные исследования
Технологические	Зависимость от импортных компонентов, проблемы навигации в GPS-тенях, энергопотребление	Развитие отечественной сенсорики, использование альтернативных систем навигации (eLoran), внедрение водородных топливных элементов
Экономические	Высокая капиталоемкость, длительный срок окупаемости	Разработка модульных и масштабируемых решений, реализация пилотных проектов для демонстрации ROI, государственно-частное партнерство
Нормативно-правовые	Отсутствие стандартов для сертификации ИИ-систем, вопросы кибербезопасности	Разработка отраслевых стандартов (адаптация CENELEC), создание «регуляторных песочниц» для тестирования новых технологий
Кадровые и социальные	Дефицит квалифицированных кадров, сопротивление персонала, низкое доверие пассажиров	Создание программ переподготовки, развитие Human-Robot Collaboration (HRC), проведение информационных кампаний о преимуществах роботизации

Для преодоления этих системных барьеров необходим комплексный подход, ориентированный не только на совершенствование технологий, но и на адаптацию окружающей их среды. Как показывает таблица, перспективные пути решения направлены на создание благоприятных условий для внедрения: от разработки новых стандартов и образовательных программ до формирования новых финансовых моделей, таких как государственно-частное партнерство. Успех роботизации будет определяться способностью отрасли одновременно развивать технологический арсенал, адаптировать нормативную рамку и инвестировать в человеческий капитал, обеспечивая тем самым синергетический эффект.

3.2 Перспективы развития

Развитие роботизации железнодорожного транспорта в ближайшие годы будет определяться несколькими ключевыми тенденциями, формирующими новый технологический ландшафт отрасли. Одним из наиболее перспективных направлений станет создание интегрированных экосистем, объединяющих робототехнические платформы с системами цифрового управления и искусственного интеллекта. Такие комплексные решения позволят перейти от разрозненных автоматизированных операций к сквозной автоматизации всего жизненного цикла железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава.

Разработка унифицированных интерфейсов и протоколов обмена данными представляется ключевым направлением, поскольку именно они обеспечивают техническую совместимость оборудования различных производителей и формируют методологическую основу для построения единого цифрового пространства железнодорожного транспорта.

Достижения в области компьютерного зрения и обработки естественного языка создают принципиально новые предпосылки для взаимодействия роботизированных систем с персоналом и пассажирами, обеспечивая более интуитивный и эффективный уровень коммуникации. Существенное значение приобретают предиктивные алгоритмы, позволяющие не только диагностировать текущие неисправности, но и прогнозировать их развитие, формируя оптимальные превентивные стратегии. Подобные подходы особенно востребованы в системах обеспечения безопасности и управления чрезвычайными ситуациями, где критически важными факторами выступают оперативность и точность реакции.

Современные энергетические технологии оказывают определяющее влияние на повышение автономности мобильных робототехнических комплексов. Увеличение емкости аккумуляторов, сокращение времени зарядки, использование водородных топливных элементов и систем рекуперации энергии значительно расширяют диапазон непрерывного функционирования. Дополнительные возможности открывает технология беспроводной зарядки, интеграция которой в инфраструктуру станций и депо позволяет оптимизировать эксплуатационные процессы, что имеет особую значимость при мониторинге протяжённых транспортных магистралей и выполнении длительных ремонтно-восстановительных мероприятий.

Особое внимание в современных исследованиях уделяется концепции цифровых двойников – виртуальных реплик объектов и процессов железнодорожной отрасли. Их применение обеспечивает возможность апробации и оптимизации функционирования роботизированных систем в различных условиях, организации дистанционного мониторинга и управления, реализации образовательных программ для персонала, отработки новых алгоритмов, а также прогнозирования долгосрочных эффектов управлений решений [12].

Особое значение приобретает развитие технологий распределенного интеллекта для коллективов роботов, работающих совместно над сложными задачами. Подходы, основанные на принципах роевого интеллекта, позволяют создавать системы, где несколько роботов могут координировать свои действия без централизованного управления, адаптируясь к изменяющимся условиям и перераспределяя задачи в случае выхода отдельных единиц из строя. Такие решения особенно перспективны для масштабных проектов по строительству и ремонту железнодорожной инфраструктуры, где требуется согласованная работа множества специализированных устройств.

Социально-экономические аспекты внедрения роботизации предполагают формирование новых моделей взаимодействия человека и технических систем, в

которых роботы рассматриваются не в качестве замены персонала, а как средство расширения его функциональных возможностей. Развитие коллаборативных технологий обеспечивает возможность создания интегрированных производственных сред, где человек и робот функционируют в непосредственном взаимодействии, выполняя взаимодополняющие задачи. Данный процесс требует переосмысливания существующих подходов к профессиональной подготовке кадров: основное внимание должно быть сосредоточено на компетенциях в области управления и обслуживания сложных робототехнических комплексов, а также на аналитике и интерпретации данных, генерируемых этими системами.

Автономные мобильные манипуляторы обладают значительным потенциалом для замены людей во многих опасных задачах обслуживания железнодорожных путей с высокой эффективностью. Растет интерес и спрос на робототехнику и автономные системы в секторе железнодорожного обслуживания из-за усиления конкуренции, быстрого расширения и постоянно растущих расходов [60].

Интеграция технологий машинного обучения, алгоритмов оптимизации, технологий интернета вещей и анализа больших данных обеспечивает синергетический эффект. Результаты тестирования показали 30% сокращение времени планирования грузоперевозок, 25% повышение точности планов и 15-минутное сокращение времени реагирования на инциденты [60].

Развитие интеллектуальных систем управления активами для цифровизации и интеллектуального управления железнодорожной инфраструктурой является магистральным путем, ведущим к Индустрии 4.0. Цифровизация обеспечивает развитие и внедрение принципиально новых форм интеллектуального функционирования [61].

Будущие направления исследований включают:

- Практическое внедрение автоматического управления поездами на магистральных и высокоскоростных железных дорогах, включая методы совместной эксплуатации поездов для экономии энергии и интеграцию управления железнодорожным движением с передовой технологией автоматического управления [62];
- Важность рассмотрения всего жизненного цикла задач обслуживания, концептуализации роботизированной командной работы в структурах рабочих мест по обслуживанию железных дорог и общественного принятия робототехники в среде, которая часто вступает в прямой контакт с пассажирами [63];
- Эффективные программы высшего образования и лидерства необходимы для преодоления некоторых проблем в разработке и развертывании автономных поездов. Проблемы восприятия пользователями могут замедлить разработку и развертывание, поскольку многие люди все еще сомневаются в производительности автономных поездов в чрезвычайных сценариях [64].

В стратегической перспективе развитие роботизации железнодорожного транспорта определяет переход к новой парадигме управления инфраструктурой, базирующейся на принципах предиктивного технического обслуживания и адаптивного управления, что позволит повысить эффективность эксплуатации и обеспечить устойчивость транспортных систем к внешним и внутренним вызовам.

Совместное развитие робототехники, искусственного интеллекта и интернета вещей создаст условия для перехода к полностью автономным системам, способным самостоятельно принимать решения в рамках заданных параметров. Эти изменения потребуют соответствующей эволюции нормативно-правовой базы, систем сертификации и подходов к обеспечению кибербезопасности, что станет важным фактором устойчивого развития отрасли в условиях цифровой трансформации.

Заключение

Роботизация железнодорожного транспорта представляет собой одно из наиболее перспективных направлений развития отрасли, способное кардинально изменить подходы к техническому обслуживанию, диагностике, строительству и обеспечению безопасности. В данном обзоре были рассмотрены ключевые технологии, применяемые в современных робототехнических комплексах, а также их практическое внедрение в различных сферах железнодорожного хозяйства.

Современные технологические достижения демонстрируют, что использование искусственного интеллекта, компьютерного зрения и предиктивной аналитики позволяет роботам выполнять сложные задачи с высокой точностью. Системы автоматической диагностики путей и подвижного состава, такие как RIIS1005, Railchap, ANYmal и Spot, уже сегодня показывают высокую эффективность в выявлении дефектов, существенно снижая зависимость от ручного труда. Параллельно с этим развитие автономных мобильных роботов и колаборативных роботов открывает новые возможности для логистики, уборки и технического обслуживания объектов железнодорожной инфраструктуры.

Международный опыт свидетельствует о том, что лидеры в области роботизации, включая Китай, Японию, Южную Корею и страны ЕС, активно внедряют робототехнические решения.

Согласно данным World Robotics за 2024 год, Китай сохраняет лидерство по количеству промышленных роботов, тогда как Европа демонстрирует устойчивый рост автоматизации в железнодорожной отрасли. Этот процесс активно поддерживается государственными программами, такими как китайская инициатива «Сделано в Китае 2025» и аналогичные стратегии в ЕС и США. Однако массовому внедрению робототехники препятствуют серьезные вызовы.

В технологическом плане основные сложности связаны с зависимостью от импортных компонентов, нехваткой данных для обучения ИИ и проблемами интеграции в существующие системы. Экономические ограничения обусловлены высокой стоимостью разработки и внедрения, что особенно актуально для стран с дешевой рабочей силой. Дополнительные сложности создает неразвитость нормативной базы, включая отсутствие единых стандартов сертификации автономных систем.

Анализ данных об экономической эффективности позволяет сделать вывод о стратегической, а не только операционной выгоде роботизации (Таблица 6).

Наибольший и наиболее быстрый экономический эффект наблюдается в области строительства, где роботы напрямую сокращают сроки и высокие трудозатраты ключевых процессов.

В диагностике и техническом обслуживании основная экономия носит долгосрочный превентивный характер: она достигается за счет перехода от плановых ремонтов к фактическому состоянию оборудования, что предотвращает масштабные аварии и непредвиденные простои.

Эффект от внедрения роботов в сфере обслуживания пассажиров, хотя и окупается дольше, является комплексным, так как включает не только прямую экономию на операционных расходах (например, на уборке), но и косвенные преимущества – повышение привлекательности транспортного сервиса и уровня безопасности. Таким образом, инвестиции в роботизацию следует оценивать с учетом всего спектра эффектов – от прямой финансовой экономии до стратегических в виде надежности и конкурентоспособности.

Таблица 6
Экономическая эффективность внедрения роботов

Область применения	Основной экономический эффект	Окупаемость	Снижение затрат
Диагностика инфраструктуры	Снижение затрат на ТО, предотвращение аварий	Долгосрочная (3-5 лет)	До 15-20% (предиктивная аналитика)
Строительство путей	Ускорение сроков, снижение трудозатрат	Среднесрочная (2-4 года)	Повышение производительности до 2 км/сутки
Обслуживание пассажиров	Снижение операционных расходов, рост удовлетворенности	Долгосрочная (4+ года)	Эффективная уборка 12 000 м ² /сутки (Manni)

Перспективы развития отрасли связаны со снижением затрат через унификацию компонентов и организацию их массового производства. Важную роль сыграет совершенствование ИИ-алгоритмов для повышения точности диагностики и адаптивности роботов.

Особое значение имеет формирование международных стандартов безопасности для автономных систем. Для дальнейшего прогресса необходимы исследования экономической эффективности роботизации, разработка отечественных технологий для снижения импортозависимости, а также решение социальных вопросов, включая переподготовку кадров.

В Таблице 7 систематизированы основные выводы, перспективы и ограничения по классам роботизированных решений. Представленная систематизация наглядно демонстрирует, что, несмотря на существующие технологические, экономические и нормативные барьеры, каждый класс роботизированных решений обладает значительным потенциалом для трансформации железнодорожной отрасли.

Ключом к успешному внедрению станет не изолированное развитие технологий, а их синергетическая интеграция в рамках единой цифровой экосистемы (Railroad 4.0), где предиктивная аналитика, цифровые двойники, автономные роботы и колаборативные системы работают согласованно. Это позволит перейти к принципиально новой парадигме – управлению жизненным циклом железнодорожных активов на основе данных, что обеспечит беспрецедентный уровень безопасности, эффективности и экономической устойчивости.

Подводя итог, можно констатировать, что роботизация железнодорожного транспорта находится на этапе активного развития. Ее дальнейшее внедрение будет определяться сочетанием технологического прогресса, экономической целесообразности и регуляторной поддержки. Уже сегодня роботы демонстрируют значительный потенциал в повышении безопасности, эффективности и снижении эксплуатационных затрат. Однако для перехода к массовому применению необходимо преодолеть существующие ограничения, что требует согласованных усилий государства, бизнеса и научного сообщества.

Наиболее перспективными направлениями развития остаются автономные диагностические системы для мониторинга инфраструктуры, роботизированная логистика, включая краны, погрузчики и сортировочные системы, а также ИИ-ассистированные решения для прогнозирования аварий и оптимизации ремонтов. Таким образом, роботизация железнодорожных дорог представляет собой не просто временный тренд, а закономерный этап технологической эволюции, который в ближайшие годы способен привести к кардинальным преобразованиям всей отрасли.

Таблица 7

Перспективы и ограничения основных классов роботизированных систем на железнодорожном транспорте

Класс решений / Основная решаемая проблема	Ключевые преимущества и достичнутый эффект	Основные ограничения и барьеры внедрения	Перспективы развития
1. Автономные мобильные роботы (AMP) для диагностики инфраструктуры и подвижного состава <i>Проблема: Низкая скорость, частота и точность ручного осмотра; риск для персонала.</i>	<ul style="list-style-type: none"> Высокая скорость обследования (до 200 км/ч). Нетривиальный сбор данных в реальном времени. Доступ в опасные/труднодоступные зоны (канавы, тоннели). Снижение зависимости от человеческого фактора. 	<ul style="list-style-type: none"> Высокая первоначальная стоимость систем. Ограничение времени автономной работы (проблема энергообеспечения). Сложности навигации в GPS-тенях (туннели) и при плохих погодных условиях. Проблемы кибербезопасности и стабильной связи на удаленных участках. 	<ul style="list-style-type: none"> Повышение автономности за счет новых источников энергии (водородные элементы, беспроводная зарядка). Развитие речевого интерфейса для координации групп роботов. Интеграция с цифровыми двойниками для прогнозного моделирования.
2. Роботизированные системы для строительства и ремонта путей <i>Проблема: Высокие риски, длительные сроки, зависимость от погоды и квалификации рабочих.</i>	<ul style="list-style-type: none"> Значительное ускорение темпов работ (до 2 км/сутки). Высочайшая точность операций (до ММ). Круглосуточная работа в опасных условиях. Снижение травматизма и затрат на рабочую силу. 	<ul style="list-style-type: none"> Крайне высокая капиталоемкость внедрения. Необходимость адаптации/модернизации инфраструктуры под роботов. Жесткие требования к качеству исходных данных для цифровых моделей (BIM). Нормативная база не адаптирована под автономное строительство. 	<ul style="list-style-type: none"> Полная автоматизация цикла «проектирование-строительство-эксплуатация» на основе BIM и цифровых двойников. Разработка легких и многофункциональных роботов манипуляторов. Создание стандартов для взаимодействия роботов разных производителей.
3. Роботы для обслуживания пассажиров и обеспечения безопасности <i>Проблема: Высокие операционные затраты, низкая эффективность рутинных процессов, безопасность.</i>	<ul style="list-style-type: none"> Повышение комфорта и качества услуг (навигация, справки). Круглосуточное патрулирование и мониторинг. Снижение эксплуатационных расходов (уборка, пропечка билетов). Работа в экстремальных ситуациях (задымление, разлив химикатов). 	<ul style="list-style-type: none"> Социальное сопротивление и низкий уровень доверия пассажиров. Сложность создания надежных систем Human-Robot Interaction (HRI). Проблемы конфиденциальности (обработка персональных данных, распознавание лиц). Ограничения функциональность в плотном пассажиропотоке. 	<ul style="list-style-type: none"> Развитие эмоционального и социального интеллекта роботов для лучшего взаимодействия. Интеграция в единую «умную» экосистему станции (IoT). Персонализация сервисов на основе ИИ.
4. Прецедентные аналитические системы и цифровые двойники <i>Проблема: Планово-предупредительное обслуживание неэффективно; неожиданные отказы.</i>	<ul style="list-style-type: none"> Переход от планового к прогнозно-прескриптивному обслуживанию. Снижение затрат на ТО на 15-20%. Оптимизация запасов ЗИП и ремонтных работ. Максимальное увеличение жизненного цикла активов. 	<ul style="list-style-type: none"> Зависимость от качества и полноты исторических данных. Сложность верификации и сертификации вероятностных ИИ-моделей. Высокие требования к вычислительным мощностям. Дефицит кадров для анализа данных и управления системами. 	<ul style="list-style-type: none"> Создание самообучающихся систем, адаптирующихся к изменяющимся условиям. Разработка стандартов для сертификации ИИ в критической инфраструктуре. Глубокая интеграция с системами управления активами.
5. Коллaborативные роботы (коботы) для ремонтных работ <i>Проблема: Необходимость совместить гибкость человека с точностью и силой робота.</i>	<ul style="list-style-type: none"> Безопасное совместное выполнение задач с человеком. Быстрая окупаемость за счет гибкости и универсальности. Простое программирование и переналадка. Снижение физической нагрузки на персонал. 	<ul style="list-style-type: none"> Ограничения грузоподъемность и скорость по сравнению с промышленными роботами. Требуется высокая квалификация и переобучение персонала. Необходимость тщательного проектирования рабочих зон для безопасности. 	<ul style="list-style-type: none"> Развитие «интуитивных» интерфейсов взаимодействия (AR, голосовое управление). Расширение сенсорных возможностей для более тесного и безопасного сотрудничества. Использование в аддитивном производстве (3D-печать запчастей в депо).

Список использованной литературы

1. M. Gooroochurn, "Robotics and Automation in Industry 4.0," in *Advances in Computational Intelligence and Robotics*, 2025, doi: 10.1201/9781003511298-4.
2. M. Mohammadi, A. Mosleh, C. Vale, D. Ribeiro, P. A. Montenegro, and A. Meixedo, "Smart railways: AI-based track-side monitoring for wheel flat identification," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2025, doi: 10.1177/09544097251313570.
3. ARGO 2.0 [Электронный ресурс]. URL: <https://nextgen-robotics.it/products/argo-20> (дата обращения: 02.09.2025).
4. Transforming Rail Operations Through Automated Robotic Inspection [Электронный ресурс]. URL: <https://www.anybotics.com/news/transforming-rail-operations-through-automated-robotic-inspection/> (дата обращения: 02.09.2025).
5. S. Sarp, M. Kuzlu, V. Jovanovic, Z. Polat, and Ö. Güler, "Digitalization of railway transportation through AI-powered services: digital twin trains," *European Transport Research Review*, vol. 16, no. 1, p. 29, 2024, doi: 10.1186/s12544-024-00679-5.
6. A. Gaurav and V. Arya, "AI Technologies in Robotics," in *Advances in Computational Intelligence and Robotics Book Series*, 2024, doi: 10.4018/979-8-3693-2707-4.ch002.
7. S. M. Garlapati, C. S. S. Anupama, S. Shaik, M. D. D. Balaga, and S. Chennamsetti, "Automatic Robot for Rail Crack Detection System," in *2024 IEEE International Conference on Computational Systems and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS)*, 2024, doi: 10.1109/CSITSS64042.2024.10816797.
8. P. Kilsby and K. Li, "Enabling Intelligent Robotic Visual Inspection in the Railway Industry with Generative AI," in *2024 IEEE International Conference on Robotics (IRC)*, 2024, doi: 10.1109/IRC63610.2024.00051.
9. Aeologic Technologies, "How AI is Transforming Railway Equipment Manufacturing in 2025," *Robotics Tomorrow*, 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roboticstomorrow.com/news/2025/06/25/how-ai-is-transforming-railway-equipment-manufacturing-in-2025/24978>.
10. N. AlNaimi and U. Qidwai, "IoT Based on-the-fly Visual Defect Detection in Railway Tracks," in *2020 IEEE International Conference on Internet of Things*, 2020, doi: 10.1109/ICIoT48696.2020.9089560.
11. N. K. Samia et al., "Automated Railway Maintenance System in Context of Bangladesh," in *2019 IEEE International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAEECC)*, 2019, doi: 10.1109/ICASEERT.2019.8934529.
12. R. K. W. Vithanage, C. S. Harrison, and A. Desilva, "Importance and applications of robotic and autonomous systems (RAS) in railway maintenance sector: a review," *Computers*, vol. 8, no. 3, p. 56, 2019, doi: 10.3390/computers8030056.
13. H. Liu et al., "An autonomous rail-road amphibious robotic system for railway maintenance using sensor fusion and mobile manipulator," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 109, p. 108874, 2023, doi: 10.1016/j.compeleceng.2023.108874.
14. M. Dima, I. A. Chihaiia, M. C. Surugiu, and M. Minea, "Preventive Maintenance of the Railway Infrastructure employing Robotized Platform and Virtual Instrumentation," in *2018 International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, 2018, doi: 10.1109/ECAI.2018.8679065.
15. S. Parascho, "Construction Robotics: From Automation to Collaboration," *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, vol. 5, pp. 14-21, 2022, doi: 10.1146/annurev-control-080122-090049.
16. M. Rahman, M. Rahimi, A. Starr, I. S. Durazo-Cardenas, A. Hall, and R. O. Anderson, "Challenges for a Railway Inspection and Repair System from Railway Infrastructure," in *2022 International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA)*, 2022, doi: 10.1109/ICCMA56665.2022.10011603.
17. Y. Qian, M. S. Dersch, Z. Gao, and J. R. Edwards, "Railroad infrastructure 4.0: Development and application of an automatic ballast support condition assessment system," *Transportation Geotechnics*, vol. 19, pp. 178-191, 2019, doi: 10.1016/j.trgeo.2019.01.002.
18. R. Yokomura et al., "Automated Construction System of a Modularized Rail Structure for Locomotion and Operation in Hazardous Environments: Realization of Stable Transfer Operation of Different Modules in Multiple Load Directions," in *2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, 2022, doi: 10.1109/SII52469.2022.9708866.

19. R. Fukui, Y. Kato, G. Kanayama, R. Takahashi, and M. Nakao, "Construction Planning for a Modularized Rail Structure: Type Selection of Rail Structure Modules and Dispatch Planning of Constructor Robots," in *Distributed Autonomous Robotic Systems*, 2018, pp. 489-501, doi: 10.1007/978-3-319-73008-0_42.
20. F. Doll, "Robot system for laying a rail track," Patent US7823367B2, Nov. 2, 2010.
21. F. Collignon and N. Rada, "Railway construction vehicle, construction train comprising such a construction vehicle and process for building a railway," Patent EP3369654A1, Sep. 5, 2018.
22. V. Shcherbakov, A. Karpik, and M. Barsuk, "Automation of Railroad Construction Technology Using Surveying Methods," in *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering*, 2019, pp. 199-207, doi: 10.1007/978-3-030-37919-3_19.
23. C. Lu, J. Liu, Y. Liu, and Y. Liu, "Intelligent construction technology of railway engineering in China," *Frontiers of Engineering Management*, vol. 7, no. 4, pp. 551-567, 2019, doi: 10.1007/s42524-019-0073-9.
24. A. Polyanskiy, "Adaptive digital technological regulations development for engineering and intellectual support for the railway track facilities construction," *Scientific and Technical Journal of St. Petersburg State Polytechnic University*, 2022, doi: 10.15862/03sats122.
25. M. Rahman, H. Liu, I. D. Cardenas, A. Starr, A. Hall, and R. Anderson, "Towards an Autonomous RIRS: Design, Structure Investigation and Framework," in *2021 9th International Conference on Mechatronics Engineering (ICME)*, 2021, doi: 10.1109/ICMRE51691.2021.9384846.
26. D. Priyanka, Y. Nandhan, M. Vishal, K. S. Vigneshwar, and M. H. Heartlin, "Securing railways by crack detection technology," in *AI and IoT for Sustainable Development in Emerging Countries*, 2024, doi: 10.1201/9781003587538-45.
27. "Underground structure built with robots cuts time and costs [news - briefing]," *Engineering & Technology*, vol. 17, no. 5, p. 16, 2022, doi: 10.1049/et.2022.1105.
28. E. A. Dudorov, V. V. Kudyukin, and K. A. Kotova, "Robotic complexes for rolling stocks maintenance on Russian railways," *Izvestiâ vysših učebnyh zavedenij*, vol. 9, pp. 3-15, 2022, doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-3-15.
29. R. A. Gregory and R. Kangari, "Cost/Benefits of Robotics in Infrastructure and Environmental Renewal," *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 33-42, 2000, doi: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2000)6:1(33).
30. R. Hu, W. Pan, K. Iturralde, T. Linner, and T. Bock, "Construction Automation and Robotics for Concrete Construction: Case Studies on Research, Development, and Innovations," in *Proceedings of the 40th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, 2023, pp. 683-690, doi: 10.22260/ISARC2023/0095.
31. K. K. K. Murthy, O. Goel, and S. Jain, "Advancements in Digital Initiatives for Enhancing Passenger Experience in Railways," *Journal of Digital Innovations & Research*, vol. 11, no. 1, 2023, doi: 10.36676/dira.v11.i1.71.
32. M. Shiomi, D. Sakamoto, T. Kanda, C. T. Ishi, H. Ishiguro, and N. Hagita, "Field Trial of a Networked Robot at a Train Station," *International Journal of Social Robotics*, vol. 3, pp. 2740, 2011, doi: 10.1007/s12369-010-0077-4.
33. Shiomi, M., Sakamoto, D., Kanda, T., Ishi, C. T., Ishiguro, H., & Hagita, N. (2011). Field Trial of a Networked Robot at a Train Station. Journal Article. doi: 10.1007/S12369-010-0077-4
34. L. Xiao, R. Liu, and W. Huang, "Station guide service robot," Patent CN104057452A, Sep. 24, 2014.
35. C. Xie, T. He, and M. Wang, "Station robot service system," Patent CN110262527A, Sep. 20, 2019.
36. L. I. Sakri, S. R. Biradar, M. P. Kulkarni, S. Patilkukarni, and K. Sahana, "Enhancing Passenger Convenience: An Efficient Speech Driven Enquiry System for Railway Stations," in *2024 IEEE International Conference on Wireless Communications and Internet of Things (ICWITE)*, 2024, doi: 10.1109/ICWITE59797.2024.10592297.
37. C. Wang et al., "Method and system for checking tickets automatically in railway station," Patent CN104021521A, Sep. 3, 2014.
38. X. Zeng and W. Zhu, "Multifunctional ticket checking system of railway passenger station," Patent CN103927585A, Jul. 16, 2014.
39. G. Lu, M. Deng, K. Wang, F. Chen, S. Lu, and X. Li, "Research on Navigation and Positioning of Intelligent Service Robot in High-speed Railway Station Based on ROS System," in *2023 6th International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT)*, 2023, doi: 10.1109/ICCASIT58768.2023.10351751.

40. K. H. Kim, J. G. Hwang, T. H. Lee, and T. K. An, "System and Method for Supporting Route Guidance in Railway Station," Patent KR1020200031234A, Mar. 24, 2020.
41. Z. Qian et al., "Intelligent robot for railway passenger station and operation method thereof," Patent CN110450193A, Nov. 12, 2019.
42. S. Guan et al., "Railway transport intelligent safe passage system and passage method," Patent CN105730456A, Jul. 6, 2016.
43. B. Chen, Y. Zhang, C. Chen, H. Li, and Y. Wang, "Railway transport of passengers station platform passenger safety protection system that waits," Patent CN105383485A, Mar. 9, 2016.
44. S. Blake, "Shiro-Neko, A Stationmaster Robot that Operates an Unmanned Station," in *Social Robots in Social Institutions*, 2023, pp. 13-21, doi: 10.1007/978-3-031-29871-4_2.
45. J. Kuang and Q. Wang, "Passenger train intelligent service system based on service robot," Patent CN109808746A, May. 28, 2019.
46. T. Ogawa, "Autonomous support robot for customer service terminal equipment," Patent JP2013233884A, Nov. 21, 2013.
47. J.-G. Hwang, K.-H. Kim, T.-H. Lee, T.-K. Ahn, and M.-S. Jin, "Operational scenario of cobot for escort of the mobility handicapped at railway stations," in *Proceedings of the 9th International Conference on Railway Engineering*, 2018, pp. 121-130, doi: 10.2495/CR180211.
48. M. Руденко, "Digital transformation of passenger rail transport: evaluation of the effectiveness of installing digital screens and implementing interactive information systems on trains," *Science and Technology*, vol. 1, no. 8, pp. 110-122, 2024, doi: 10.31319/2709-2879.2024iss1(8).306486pp110-122.
49. M. Rahman, M. Rahimi, A. Starr, I. Durazo Cardenas, A. Hall, and R. O. Anderson, "An overview of the challenges for railway maintenance robots," in *Proceedings of the UK-RAS Conference*, 2022, doi: 10.31256/bx2wd2o.
50. M. Rahman, H. Liu, I. Durazo Cardenas, A. Starr, A. Hall, and R. O. Anderson, "A Review on the Prospects of Mobile Manipulators for Smart Maintenance of Railway Track," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 11, p. 6484, 2023, doi: 10.3390/app13116484.
51. M. Rahimi, H. Liu, I. Durazo Cardenas, A. Starr, A. Hall, and R. O. Anderson, "A Review on Technologies for Localisation and Navigation in Autonomous Railway Maintenance Systems," *Sensors*, vol. 22, no. 11, p. 4185, 2022, doi: 10.3390/s22114185.
52. J. Kasch and M. Ahmadian, "Design and Operational Assessment of a Railroad Track Robot for Railcar Undercarriage Condition Inspection," *Designs*, vol. 8, no. 4, p. 70, 2024, doi: 10.3390/designs8040070.
53. M. Molzon and M. Ahmadian, "Development of a Mobile Robot System for the Visual Inspection of Railcar Undercarriage Equipment," in *Proceedings of the 2022 Joint Rail Conference*, 2022, doi: 10.1115/JRC2022-79739.
54. P. Singh et al., "Deployment of Autonomous Trains in Rail Transportation: Current Trends and Existing Challenges," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 87979-88002, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3091550.
55. S. Müller, "Autonomous trains in freight transport: should the railway not have the advantage over the trucks?," *WIT Transactions on the Built Environment*, vol. 199, pp. 111-122, 2020, doi: 10.2495/CR200011.
56. R. K. W. Vithanage, C. S. Harrison, and A. Desilva, "A Study on Automating Rolling-stock Maintenance in the Rail Industry using Robotics," in *Proceedings of the 9th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, 2017, pp. 278-283, doi: 10.5220/0006410702780283.
57. M. Wild, J. S. Becker, G. Ehmen, and E. Möhlmann, "Towards Scenario-Based Certification of Highly Automated Railway Systems," in *Formal Methods for Industrial Critical Systems*, 2023, pp. 81-98, doi: 10.1007/978-3-031-43366-5_5.
58. M. Seisenberger et al., "Safe and Secure Future AI-Driven Railway Technologies: Challenges for Formal Methods in Railway," in *Formal Methods for Industrial Critical Systems*, 2022, pp. 325-343, doi: 10.1007/978-3-031-19762-8_20.
59. F. Flammini, L. De Donato, A. Fantechi, and V. Vittorini, "A Vision of Intelligent Train Control," in *Formal Methods for Industrial Critical Systems*, 2022, pp. 239-254, doi: 10.1007/978-3-031-05814-1_14.
60. G. M. Tretiakov, N. N. Mazko, and A. V. Varlamov, "The use of machine learning technologies to automate the planning and management of freight transportation on the railway," *Sovremennye naukoemkie tehnologii*, no. 11, 2023, doi: 10.17513/snt.39977.
61. A. N. Shabelnikov, "Railway Sorting Robotics," in *Proceedings of the International Scientific Siberian Transport Forum*, 2019, pp. 683-692, doi: 10.1007/978-3-030-50097-9_63.

62. J. Yin et al., “Research and development of automatic train operation for railway transportation systems: A survey,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 85, pp. 548-572, 2017, doi: 10.1016/j.trc.2017.09.009.
 63. D. Golightly et al., “Human, Organisational and Societal Factors in Robotic Rail Infrastructure Maintenance,” *Sustainability*, vol. 14, no. 4, p. 2123, 2022, doi: 10.3390/su14042123.
 64. P. Singh et al., “Deployment of Autonomous Trains in Rail Transportation: Addressing the Needs for Higher Education and Leadership,” in *Lecture Notes in Mobility*, 2024, pp. 85-100, doi: 10.1007/978-3-031-51745-7_7.
-

УДК 004.896

ГИБРИДНЫЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ: ОБЗОР

Шульженко Андрей Александрович, аспирант, Ростовский Государственный университет путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия, E-mail: drew.shaa@gmail.com

АННОТАЦИЯ

В статье представлен обзор гибридных алгоритмов, применяемых для управления технологическими процессами на железнодорожном транспорте. Особое внимание уделяется интеграции методов искусственного интеллекта, оптимизации, машинного обучения и физических моделей для повышения эффективности, надежности и безопасности железнодорожных систем. Рассматриваются ключевые типы гибридных решений: нейро-нечеткие системы, эволюционные алгоритмы с обучением, цифровые двойники, имитационно-оптимизационные подходы и комбинированные стратегии обучения. Описаны примеры успешного применения гибридных моделей в задачах диспетчеризации, прогнозирования технического состояния, оптимизации расписаний, диагностики и энергоэффективности. Приведен сравнительный анализ точности, производительности и устойчивости различных подходов. Выделены преимущества гибридизации по сравнению с одиночными методами, а также обозначены актуальные вызовы и направления дальнейшего развития.

Ключевые слова: гибридные алгоритмы, железнодорожные системы, автоматизация технологических процессов, интеллектуальные транспортные системы, цифровые двойники, нейронные сети, машинное обучение.

HYBRID ALGORITHMS FOR TECHNOLOGICAL PROCESS CONTROL IN RAILWAY TRANSPORT: A REVIEW

Andrew A. Shulzhenko, postgraduate student, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia,
E-mail: drew.shaa@gmail.com

АННОТАЦИЯ

The article presents a review of hybrid algorithms applied to the control of technological processes in railway transport. Special attention is given to the integration of artificial intelligence, optimization, machine learning, and physical modeling methods to improve the efficiency, reliability, and safety of railway systems. The paper discusses key types of hybrid solutions, including neuro-fuzzy systems, evolutionary algorithms with learning, digital twins, simulation-optimization approaches, and combined learning strategies. Examples of successful applications of hybrid models are provided for tasks such as dispatching, condition forecasting, schedule optimization, diagnostics, and energy efficiency. A comparative analysis of the accuracy, performance, and robustness of different approaches is presented. The advantages of hybridization over single-method techniques are highlighted, along with current challenges and future development directions.

Keywords: hybrid algorithms, railway systems, automation of technological processes, intelligent transportation systems, digital twins, neural networks, machine learning.

Введение

В настоящее время наблюдается мировой тренд в использовании интеллектуальных технологий в комбинации с компьютерным моделированием для решения сложных прикладных задач. Железнодорожная отрасль не является исключением: постоянно растут объемы данных и сложность процессов, что стимулирует применение методов искусственного интеллекта (ИИ) для автоматизации и оптимизации управления перевозочным процессом. Однако, как отмечается в работе [2], исследования по применению ИИ на железнодорожном транспорте всё ещё находятся на ранней стадии, а наибольшие перспективы связаны с развитием комбинированных (гибридных) подходов, интегрирующих разные методы ИИ и классические алгоритмы для преодоления ограничений отдельных методов. В недавнем обзоре [3] подчёркивается, что возможности ИИ в решении задач железнодорожного транспорта огромны, но для реализации полного потенциала часто требуется сочетание методов машинного обучения, оптимизации и имитационного моделирования.

Гибридные алгоритмы управления технологическими процессами представляют собой подход, при котором различные методы и модели объединяются в единую систему для более эффективного решения задач управления, прогнозирования, оптимизации и диагностики. Идея заключается в том, чтобы воспользоваться сильными сторонами каждого из компонентов и компенсировать их недостатки за счет другого метода [4]. Например, методы машинного обучения (нейронные сети, решающие деревья и др.) хорошо выявляют скрытые зависимости по данным, но могут требовать больших выборок и страдать от недостатка интерпретируемости. С другой стороны, физические или алгоритмические модели процессов (например, модели движения поездов по известным уравнениям) обладают высокой интерпретируемостью, но часто упрощают реальность. Гибридизация позволяет комбинировать эти подходы, создавая мультимодельные системы, способные учесть как накопленные данные, так и экспертные знания о процессе.

В транспортной отрасли, и прежде всего на железных дорогах, гибридизация особенно востребована из-за сочетания жёстких требований безопасности, сложной физики процессов и высокой неопределённости данных эксплуатации. В данной обзорной статье рассматриваются современные гибридные алгоритмы управления технологическими процессами на железнодорожном транспорте. В разделе 1 приводится описание и классификация основных типов гибридных методов, включая нейро-нечеткие системы, эволюционные алгоритмы с обучением, объединение имитационного моделирования с оптимизацией и др. В разделе 2 представлен обзор применения гибридных моделей для различных задач: управления и регулирования движением, прогнозирования состояний и рисков, оптимизации расписаний и маршрутов, диагностики неисправностей и мониторинга состояния инфраструктуры. В разделе 3 выполнен сравнительный анализ подходов – обсуждаются достигнутая точность и производительность, приводятся метрики качества, формулы и графики из литературы. В разделе 4 обосновывается выбор тех или иных методов для разных прикладных задач и даются рекомендации по их применению. Наконец, в разделе 5 обсуждаются ограничения существующих подходов, актуальные вызовы и перспективы развития гибридных систем в железнодорожной отрасли.

Следует отметить, что в данной работе используются термины машинное обучение (ML) и его частный случай – нейронные сети (НС). При этом акцент на НС делается в тех случаях, когда именно методы, основанные на глубоких нейронных сетях, обеспечили решение поставленной задачи либо продемонстрировали значительное повышение эффективности.

1. Классификация гибридных алгоритмов

Понятие гибридных алгоритмов охватывает широкий класс методов, сочетающих разнородные подходы к моделированию и управлению (рис. 1). В литературе по искусственноому интеллекту используется близкий термин гибридные интеллектуальные системы – комбинация двух или более вычислительных методов (нейронные сети, классические методы машинного обучения, методы оптимизации, нечёткая логика и т.п.), совместно решают задачу лучше, чем каждый по отдельности [4].

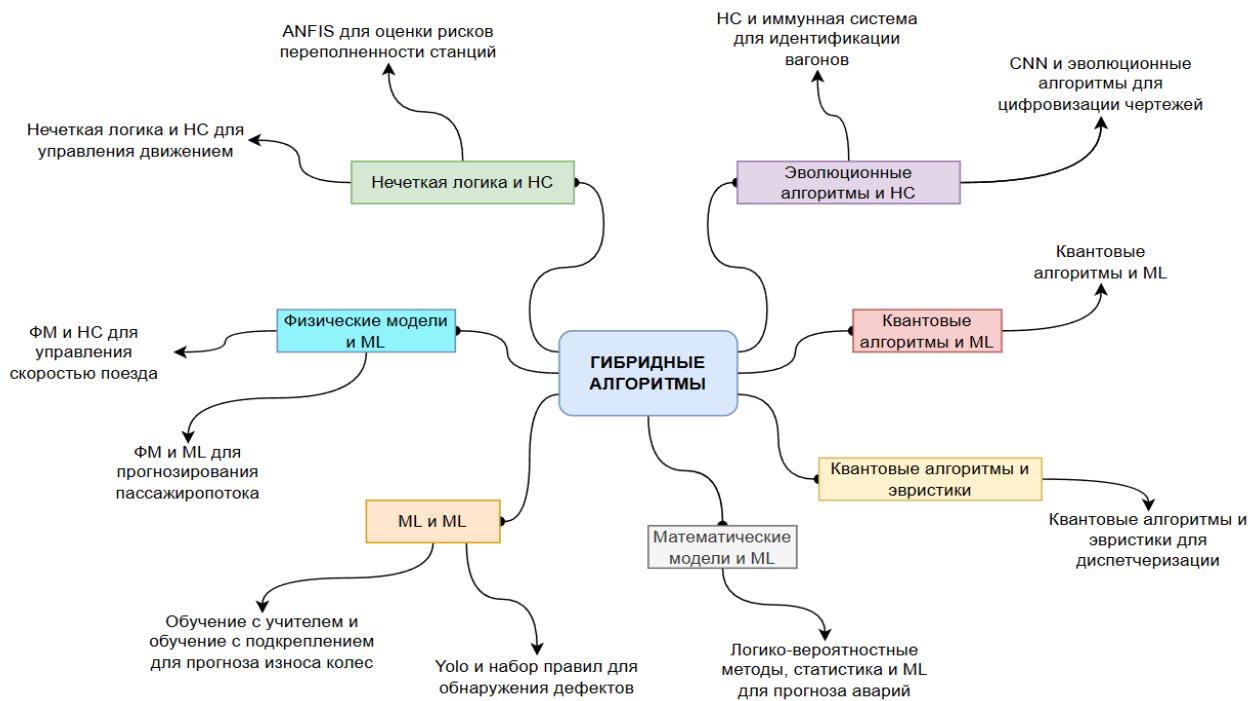


Рис. 1 – Гибридные алгоритмы

В контексте железнодорожных приложений наиболее распространены следующие виды гибридных алгоритмов:

- 1. Нейро-нечеткие системы.** Это комбинации нейронных сетей с аппаратом нечеткой логики. Классический пример – Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), объединяющая нечеткие правила с обучением параметров на основе нейросети. Нейро-нечеткие модели успешно применяются для прогнозирования и управления в условиях неопределенности, поскольку соединяют способность нейросетей обучаться по данным с интерпретируемостью нечетких правил. Концепция нечеткой логики была предложена Л.А. Заде в 1965 г. и позволила описывать неточные, лингвистические знания экспертов в форме математических функций принадлежности [5]. С тех пор нечеткие модели стали одним из ключевых компонентов гибридных алгоритмов, позволяя учитывать нечеткость и неопределенность исходной информации.
- 2. Эволюционные и генетические алгоритмы с методами машинного обучения.** Эволюционные алгоритмы (генетический алгоритм, метод роя частиц и др.) часто объединяют с методами машинного обучения для настройки моделей или принятия решений. Например, генетические алгоритмы могут оптимизировать параметры нейронной сети или нечеткой системы. В гибридном алгоритме одна часть отвечает за глобальный поиск (эволюционный подход), а другая – за локальную подстройку на основе данных (обучающая модель). Подобные гибриды используются для сложных задач оптимизации, где классические методы застревают в локальных экстремумах. Обзор таких систем приведен в работе [4], где отмечено, что гибридизация ИИ методов позволяет добиться более высокой точности и устойчивости решений в сравнении с индивидуальными алгоритмами.
- 3. Физически обоснованные модели с ML-компонентами (цифровые двойники).** Данный класс включает гибриды механистических моделей и методов машинного обучения. В таких алгоритмах используется известная физическая модель или имитационная модель процесса, которая затем дополняется ML-модулем для коррекции ошибок или учета неучтенных факторов. Например, в статье [7] предложена гибридная модель, где данные полевого эксперимента используются для вычисления остатка (ошибки) физической модели, и ML-модель обучается прогнозировать этот остаток, повышая общую точность. Подобные physics-informed подходы получили развитие в концепции цифровых

двойников, которые сочетают детальные симуляторы инфраструктуры или подвижного состава с модулями обновления по данным и прогнозирования [31]. Пример архитектуры подобной системы представлен на рисунке 2.

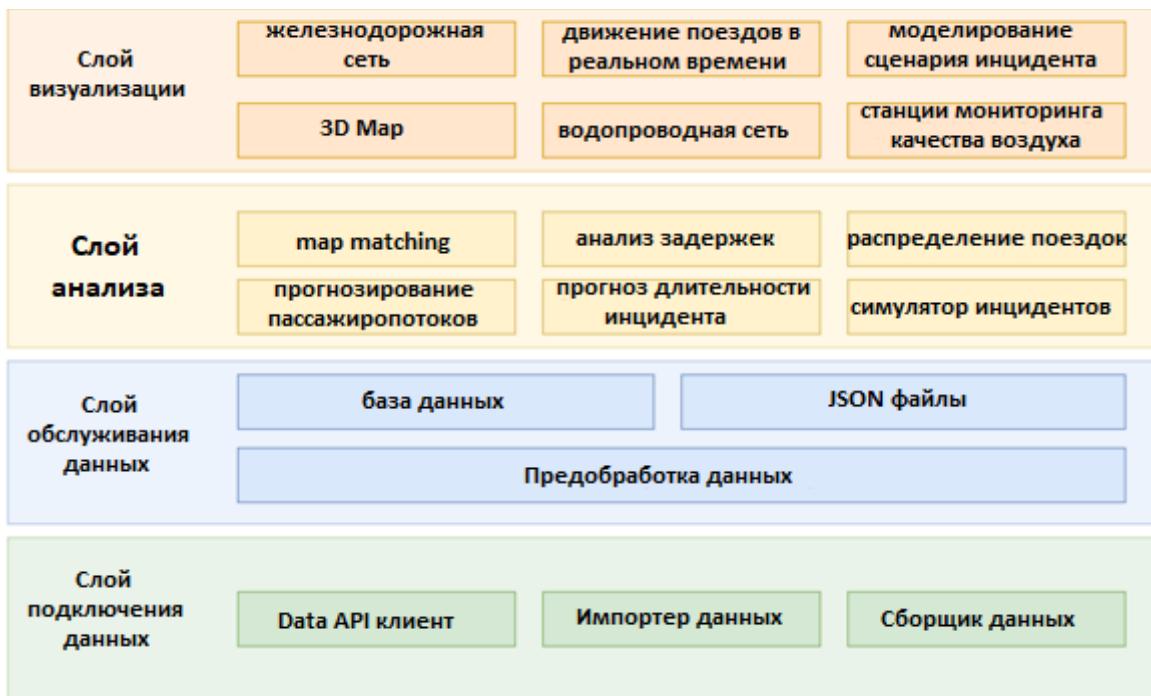


Рис. 2 – Схема цифрового двойника для моделирования железных дорог

Гибридные цифровые двойники уже применяются, например, для энергосистем железных дорог [25] и для прогнозирования пассажиропотоков с использованием симуляции движений поездов и нейросетевых моделей спроса [31].

- Имитационное моделирование с встроенной оптимизацией.** В задачах диспетчерского управления часто применяются гибридные симуляционно-оптимизационные методы. В них имитационная модель железнодорожной системы (например, модель движения поездов по участку) комбинируется с алгоритмом оптимизации, который в ходе моделирования ищет наилучшее решение. Такая архитектура известна как *hybrid simulation* – сначала строится дискретно-событийная имитация, а в критические моменты применяется эвристический или оптимизационный алгоритм для разрешения конфликтов. Классическая работа Cheng (1998) [17] описала один из первых примеров гибридной симуляции для перераспределения ресурсов при сбоях в движении поездов.
- Гибридное обучение.** Относительно молодое направление – сочетание обучения с учителем, без учителя и с подкреплением. Например, в работе [14] предложена гибридная стратегия обучения, объединяющая методы с учителем и обучение с подкреплением для задачи прогнозирования износа колес подвижного состава при дефиците данных. Идея в том, что ограниченные реальные измерения используются для обучения с учителем, а недостающая информация дополняется путем моделирования (генерации ситуаций) и обучения с подкреплением агента, чтобы имитировать накопление износа. Такие смешанные стратегии обучения позволяют эффективнее использовать доступные данные и экспертизу.

Следует отметить, что терминология в литературе может различаться. Некоторые авторы под гибридными алгоритмами подразумевают только нейро-нечеткие или эволюционно-нейронные системы, тогда как другие включают любые мульти-модельные решения. В контексте управления железнодорожными технологиями к гибридным подходам относят все перечисленные выше комбинации. Их объединяет одно свойство: использование более одного метода и/или модели при принятии решений, причём комбинация может

быть последовательной (выход одного модуля является входом другого, например, ML-модель корректирует прогноз физической модели) или параллельной (несколько модулей работают одновременно и их результаты объединяются решающим блоком, как в системах слияния данных).

Для конкретики приведем несколько примеров из других отраслей, которые иллюстрируют суть гибридизации. В нефтегазовой промышленности гибридные интеллектуальные системы успешно применяются для моделирования пластов. Обзор [4] отмечает, что объединение нейронных сетей с эволюционными алгоритмами и нечеткой логикой позволяет повысить точность прогнозов свойств нефтяных пластов на 5–10% по сравнению с отдельными моделями. В частности, предлагается общая схема, где каждый метод решает свою часть задачи, а затем результаты синтезируются (рис.3).

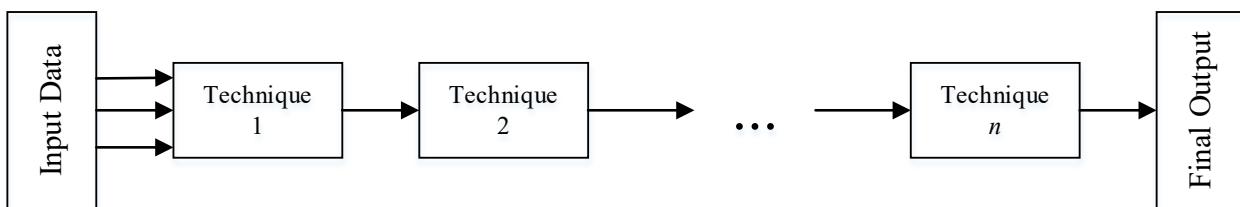


Рис. 3 – Обобщенная структура гибридных интеллектуальных систем

Такое же «разделение труда» характерно и для железнодорожных гибридных алгоритмов – далее мы увидим, как разные комбинации методов используются для различных прикладных задач.

2. Применение гибридных моделей и алгоритмов в железнодорожной отрасли

2.1 Управление движением и системами управления

Одной из ключевых областей применения гибридных алгоритмов является управление движением поездов и работа систем автоматического управления, где требуется высокая точность и надежность на фоне неопределенности и помех. Гибридные подходы позволяют улучшить качество регулирования скорости, устойчивость движений и безопасность.

Гибридное моделирование для автоматического вождения. В работе [8] предложен метод автоматического управления скоростью высокоскоростного поезда на основе гибридного моделирования механической и данных. Сначала строится физическая модель динамики поезда (учитывающая силы тяги, сопротивления движению и торможения), затем на основе данных реального профиля движения применяется ML-модуль для компенсации рассогласования модели и фактического движения [8]. В эту гибридную модель встроен предсказывающий нечеткий PID-регулятор, который управляет тягой и торможением (рис.4).

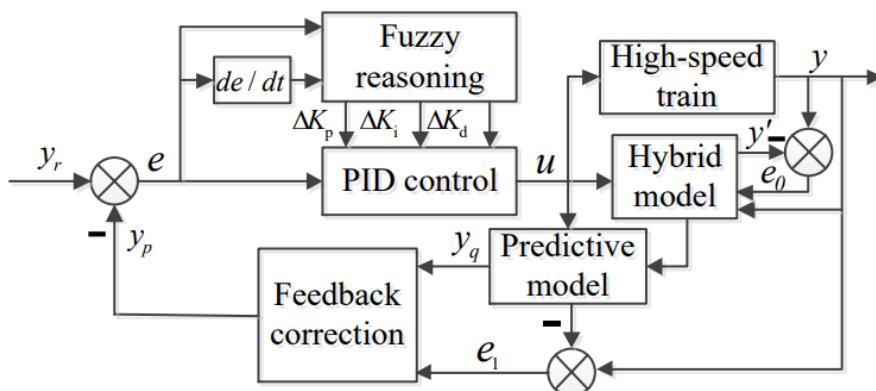


Рис. 4 – Схема гибридной модели с встроенным предсказывающим нечетким PID-регулятором

Сравнение с чисто механистическим управлением показало, что гибридный подход улучшает точность поддержания скорости: средняя ошибка регулирования скорости снизилась примерно на 69%. Это означает более плавное следование графику, экономию энергии и повышение безопасности. Авторы [8] отмечают, что такая мультимодельная система сочетает преимущества точной физической модели и обучаемого компенсатора, что особенно эффективно при изменении условий движения (нагрузки, состояния пути и пр.).

Объединение нечёткой логики и классического управления. Для систем автоматического управления в условиях неопределенности перспективны гибриды, сочетающие методы классической теории управления (например, ПИД-регуляторы, наблюдатели состояния) с нечеткой логикой. В работе [6] предложен именно такой подход для иерархических многоуровневых систем. Проведенный анализ методов моделирования динамики систем управления при неопределенности показывает, что наиболее адекватными являются гибридные методы, включающие как теорию нечеткой логики, так и методы автоматического управления. Авторы отмечают, что при наличии неопределенности решение задачи координации подсистем существенно усложняется, и применение гибридного подхода (например, добавление нечеткого модуля для коррекции управляющих воздействий) позволяет повысить надежность управления. Практически это реализовано как информационно-аналитическая система мониторинга режимов, где классические регуляторы дополняются блоком нечеткого вывода для учета неточных факторов.

Гибридное управление подвешиванием подвижного состава. В области вибрационной защиты и комфорта пассажиров также находит применение гибридный ИИ. Так, в работе [9] разработан гибридный алгоритм управления поперечной стабильностью вагона, сочетающий классический активный демпфер с интеллектуальным контроллером. Авторы интегрировали обучение с учителем и с подкреплением: сначала нейронная сеть обучается на данных имитации колебаний, затем на ее основе формируется стратегия управления демпфирующим устройством, которая уточняется с помощью алгоритма Q-learning (обучение с подкреплением) при различных сценариях пути. Результат – по сравнению с традиционным регулятором, гибридная стратегия снизила боковые ускорения примерно на 15-20% при тех же ограничениях по устойчивости. Таким образом, комбинация методов позволила добиться более комфорtnого хода поезда даже при неопределенных возмущениях (порывы ветра, неровности пути).

Восстановление графика движения на основе гибридного ИИ. Диспетчеризация движения при сбоях – еще одна задача, в которой гибридные алгоритмы проявили эффективность. Компания Hitachi применила подход Hybrid AI, объединяющий машинное обучение и эвристический поиск, для автоматического восстановления расписания при нарушениях графика [10]. Система анализирует отклонения (задержки поездов) и с помощью обученной модели предсказывает, какие корректизы приведут к минимальным дальнейшим сбоям. Далее эвристический алгоритм (правила на основе опыта диспетчеров) уточняет и проверяет коррекцию расписания. Отчет [10] отмечает, что такая система за секунды предлагает план восстановления графика, сравнимый по качеству с решениями опытных диспетчеров, и тем самым существенно сокращает время реагирования на инциденты. Здесь гибридизация проявляется во включении обучаемого прогноза последствий тех или иных действий в контур классического эвристического планирования.

Приведенные примеры показывают разнообразие гибридных подходов к задачам управления движением. Обобщая, можно отметить следующие преимущества гибридных алгоритмов в системах управления:

- Повышение точности моделей за счет учета реальных данных (пример [8] – ML-компенсатор к физической модели);
- Устойчивость к неопределенности через включение нечеткой логики или обучаемых компонентов (пример [6] – нечеткий модуль к классическому регулятору);
- Адаптивность и самообучение стратегии управления (пример [9] – комбинированное обучение демпфера);
- Быстродействие и качество решений в нештатных ситуациях благодаря предобученным моделям (пример [10] – Hybrid AI для диспетчеризации).

Таким образом, гибридные алгоритмы в управлении позволяют объединить проверенные алгоритмические решения с возможностями ИИ, обеспечивая более высокую эффективность и безопасность движения.

2.2 Прогнозирование и оценка состояния

Переходим к задачам, где ключевым является предсказание параметров и рисков – именно здесь синергия данных и моделей даёт заметный прирост заблаговременности и точности решений. Задачи прогнозирования на железнодорожном транспорте включают предсказание спроса и пассажиропотока, прогноз задержек и интервалов движения, оценку рисков нарушений безопасности и состояния инфраструктуры, прогнозирование износа элементов пути и подвижного состава. Гибридные модели нашли широкое применение в этих направлениях благодаря своей способности учитывать разнородные факторы – статистические данные, физические закономерности, экспертные оценки.

Прогнозирование рисков и безопасности. В работе [11] предложен гибридный метод прогнозирования интенсивности нарушений безопасности движения поездов. Он назван гибридным потому, что сочетает общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ) и статистические данные по состоянию инфраструктуры и человеческого фактора. Как отмечает автор, «гибридным предлагаемый метод назван потому, что контроль значения вероятности схода и уточнение отдельных входных производится на основе отраслевых статистических данных». Иными словами, к классической модели расчета вероятности отказов (ОЛВМ, основанной на построении дерева событий и оценке вероятностей) добавляется коррекция на основе реальных наблюдений – показатели состояния пути, отчеты о нарушениях, интенсивность природных воздействий. Такая комбинация позволила повысить точность краткосрочного прогнозирования риска аварий на участке Москва-Санкт-Петербург, что подтверждено экспериментально. В последующих работах того же автора [12] гибридный метод был применен для оценки функциональных рисков на разных уровнях управления путевым хозяйством, показав способность учитывать динамику факторов риска во времени.

Прогнозирование технического состояния и отказов. Предиктивное обслуживание инфраструктуры – приоритетная задача, направленная на предупреждение отказов. Гибридные алгоритмы здесь объединяют данные мониторинга с физическими моделями деградации. Например, в [15] рассмотрено прогнозирование разрушения балластного слоя пути на основе гибридной ML-методологии. Разработанная модель комбинирует метод машинного обучения (градиентный бустинг) для обработки большого массива диагностических данных (вибрации, нагрузки) с априорными знаниями о механизме разрушения балласта. За счет такого совмещения удалось достичь высокой точности предсказания степени износа балластной призмы: коэффициент детерминации $R^2 \sim 0,9$ (рис. 5) на проверочных данных, что на 10-15% точнее, чем при использовании только статистического или только физического подхода.

Авторы [15] отмечают, что гибридизация позволила учесть и нелинейные зависимости в данных, и фундаментальные ограничения (например, максимальные напряжения, при которых происходит поломка щебня).

Другой пример – гибридное прогнозирование износа колес, представленное в [14]. Здесь традиционная модель износа (основанная на пробеге, нагрузке и радиусе кривых) дополняется обучающейся компонентой. Нейронная сеть, обученная на ограниченных данных по измеренному износу, используется для коррекции параметров эмпирической формулы, а при нехватке данных запускается модель с подкреплением, которая генерирует дополнительные сценарии нагрузки на колесо. В результате гибридная система сумела прогнозировать толщину гребня колеса с средней ошибкой менее 5% за период в 6 месяцев, тогда как чисто эмпирическая формула давала ошибку около 15% на тех же данных. Такой подход особенно ценен в условиях, когда измерения реки или недоступны – модель фактически самообучается, комбинируя реальные наблюдения и виртуальные эксперименты.

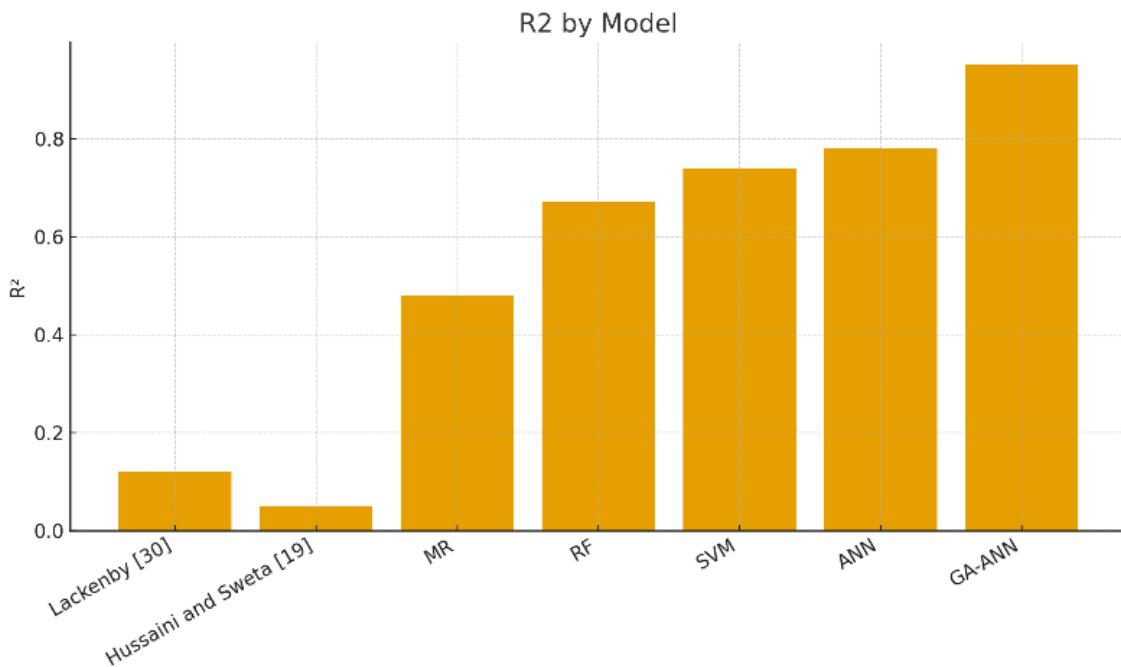


Рис. 5 – Сравнение моделей по метрики R^2

Сокращения: MR – многомерная регрессия; RF – случайный лес; SVM – метод опорных векторов; ANN – искусственные нейронные сети; GA-ANN – генетические алгоритмы и искусственные нейронные сети.

Прогнозирование спроса и потоков. Вопросы прогнозирования пассажиропотока, грузопотоков, потребности в перевозках тоже решаются гибридными методами. Современные Digital Twin-платформы для железных дорог, такие как описанная в [25], включают модуль прогнозирования пассажиропотока на основе нейросетей (например, LSTM-сетей) в сочетании с симуляцией работы сети при различных сценариях нарушений. Такая платформа принимает в реальном времени данные о движении поездов и исторические данные мобильных операторов по перемещению пассажиров, с помощью ML-моделей прогнозирует прибытие пассажиров на станции, а затем на основе имитации оценивает влияние возможных сбоев (отмен, задержек) на накопление людей на станциях [31]. Выходы этих моделей интегрируются: прогнозы пассажиропотока используются для оценки качества сервисов и выработки управленческих решений (например, распределения резервных составов или информирования пассажиров). По результатам, представленным в [25], такая гибридная система дала возможность с большой точностью предсказывать количество пассажиров на станции (ошибка не более 3-5% в часовых интервалах) и значительно улучшила реагирование на массовые нарушения (например, при закрытии участка из-за ЧС).

Оценка рисков скопления пассажиров. Отдельно стоит отметить применение нейронечетких гибридов для оценки рисков, связанных с обслуживанием пассажиров. Работа [13] демонстрирует использование ANFIS (нечёткой нейронной системы) для оценки уровня переполненности и толпы на железнодорожных станциях. В данном случае комбинируются данные видеонаблюдения, счетчиков пассажиров и экспертные правила: нечёткая система на основе нескольких входных факторов (плотность толпы, скорость ее движения, промежутки между людьми) выдаёт индекс риска, а нейронное обучение на исторических данных настроило функции принадлежности и правила системы. По результатам внедрения в тестовом режиме, система [13] сумела за 1-2 минуты до достижения критического уровня заполненности выдавать предупреждение с точностью ~90%. Таким образом, гибридный интеллектуальный алгоритм помогает предотвратить инциденты, связанные с опасной давкой, совмещая в себе человеческий опыт (правила оценки) и машинное обучение для адаптации к конкретной станции.

В области прогнозирования и оценки состояния гибридные алгоритмы позволяют учитывать широкий спектр факторов. Основные достоинства такого подхода: возможность интеграции экспертных знаний и больших данных, повышение точности и заблаговременности прогнозов, устойчивость к неполноте и шуму данных. Метрики

эффективности обычно включают коэффициент детерминации R^2 , среднюю абсолютную ошибку (MAE), среднюю абсолютную процентную ошибку (MAPE) и других. Например, для оценки точности прогнозов часто применяют MAPE, рассчитываемую по формуле (1):

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{y_i} \right| \quad (1)$$

где y_i – истинное значение, \hat{y}_i – прогноз модели.

В упомянутых выше исследованиях гибридные модели дают MAPE существенно ниже, чем у одиночных методов. Это подтверждает, что сочетание различных подходов действительно улучшает качество прогнозирования в железнодорожной отрасли.

2.3 Оптимизация и планирование (расписания, маршруты, энергоэффективность)

Задачи оптимизации – одни из самых трудоемких в транспортных системах, поскольку требуют учета множества ограничений и поиска решений в комбинаторно взрывных пространствах. Гибридные алгоритмы успешно применяются для таких задач, как составление расписаний движения поездов, диспетчерское регулирование при отклонениях, формирование составов и маршрутов, а также оптимизация энергетических режимов тяги. Отличительной чертой гибридных подходов здесь является интеграция алгоритмов искусственного интеллекта в классические или эвристические схемы оптимизации.

Управление графиком и разрешение конфликтов. Исторически первые исследования в этой области сфокусировались на алгоритмах автоматического разрешения конфликтов в расписании. Еще в 1990-х годах были предложены эвристики, моделирующие действия диспетчера. Так, И. Сахин в 1999 г. разработал алгоритм на основе анализа конфликта двух поездов и итеративного переназначения порядка прохождения перегонов [30]. Эта эвристика стала основой для многих последующих работ. Тем не менее, современные требования (увеличение интенсивности движения, многокритериальность – пунктуальность vs. экономичность) требуют более интеллектуальных решений.

Гибридные алгоритмы для оптимизации графиков часто сочетают методы дискретной оптимизации с имитационной моделью железнодорожной линии. Пример – метод гибридной симуляции, предложенный еще в [17]. Имитационная модель (отражающая движение поездов и сигнальную систему) используется для оценки последствий тех или иных решений, а поиск оптимального решения (например, выбор поезду места остановки для пропуска) выполняется встроенным алгоритмом на основе эвристических правил. В более поздней работе [18] предложена усовершенствованная гибридная методика: имитация движения грузовых поездов в узле объединена с применением эвристики Tabu Search при возникновении конфликтов, что позволило быстро генерировать реалистичные корректировки расписания. Тестирование в [18] показало сокращение среднего времени опаздывания поездов примерно на 12% по сравнению с чистой имитацией без оптимизатора.

Другой подход – включение методов машинного обучения в процедуру оптимизации расписания. К примеру, в работе [19] разработан гибридный алгоритм для пересоставления расписания высокоскоростных поездов при сбоях, комбинирующий метод скользящего окна (rolling horizon) и многокритериальный генетический алгоритм NSGA-II с интегрированной нейросетью. Суть в том, что задача большого масштаба дробится на интервалы (окна планирования), для каждого решается подзадача оптимизации расписания (минимизация отклонения от графика и затрат) с помощью NSGA-II. При этом нейросеть, встроенная в алгоритм, заранее обучена предсказывать качественные оценки расписаний, что ускоряет сходимость NSGA-II [19]. Такой гибрид смог улучшить оба критерия качества расписания – например, снижение суммарного опоздания пассажиров на ~16% на малой сети. Важно, что с помощью предобученной модели удалось значительно сократить время расчета: алгоритм сходился на 20-30% быстрее базовой версии NSGA-II. Тем самым обеспечена пригодность для использования в реальном времени при диспетчеризации.

Комбинированные алгоритмы для формирования поездов. В задаче формирования составов и ценообразования на перевозки (train formation and pricing) также находят применение гибридные модели. Так, в работе [22] решалась задача оптимального формирования грузовых поездов под неопределенный спрос как комбинация ML и оптимизации.

Авторы [22] сперва обучили модель машинного обучения для прогнозирования спроса на перевозки и доходов при различных ценовых стратегиях (по историческим данным и сценариям), а затем встроили эту модель в стохастическую оптимизационную задачу формирования поездов. Итоговый гибридный алгоритм позволяет одновременно определять оптимальный состав поезда (сколько вагонов каких категорий включить) и оптимальные тарифы на грузы, чтобы максимизировать прибыль при учете неопределенности спроса. Эксперименты показали, что такая система приносит на 8-15% больше прибыли, чем традиционные подходы, благодаря более точному учету вероятностного спроса и гибкому ценообразованию [19]. Ключом к успеху стало именно объединение прогноза (ML) с двуцелевой оптимизацией (стоимость vs. обслуживание спроса).

Гибриды для энергосбережения. Важной областью оптимизации на ж.д. транспорте является энергоэффективное ведение поездов. Здесь тоже применяются гибридные алгоритмы. Например, в работе [23] предложен динамический адаптивный гибридный алгоритм для оптимизации профиля скорости поезда с целью минимизации энергопотребления. Алгоритм сочетает два уровня: на верхнем уровне генерируются варианты профиля движения (участки разгона, холостого хода, торможения) с помощью адаптивного правила, обученного на данных симулятора движения (т.е. ML-компонент, предсказывающего энергию для данного профиля), а на нижнем уровне генетический алгоритм ищет оптимальную комбинацию этих участков. Такая двухуровневая схема позволила достичь экономии энергии до 15% без увеличения времени хода поезда [23]. В другом исследовании [24] рассматривается интеграция модели электроснабжения (электрической схемы участка) и данных эксплуатации в цифрового двойника тяговой сети (рис. 6).

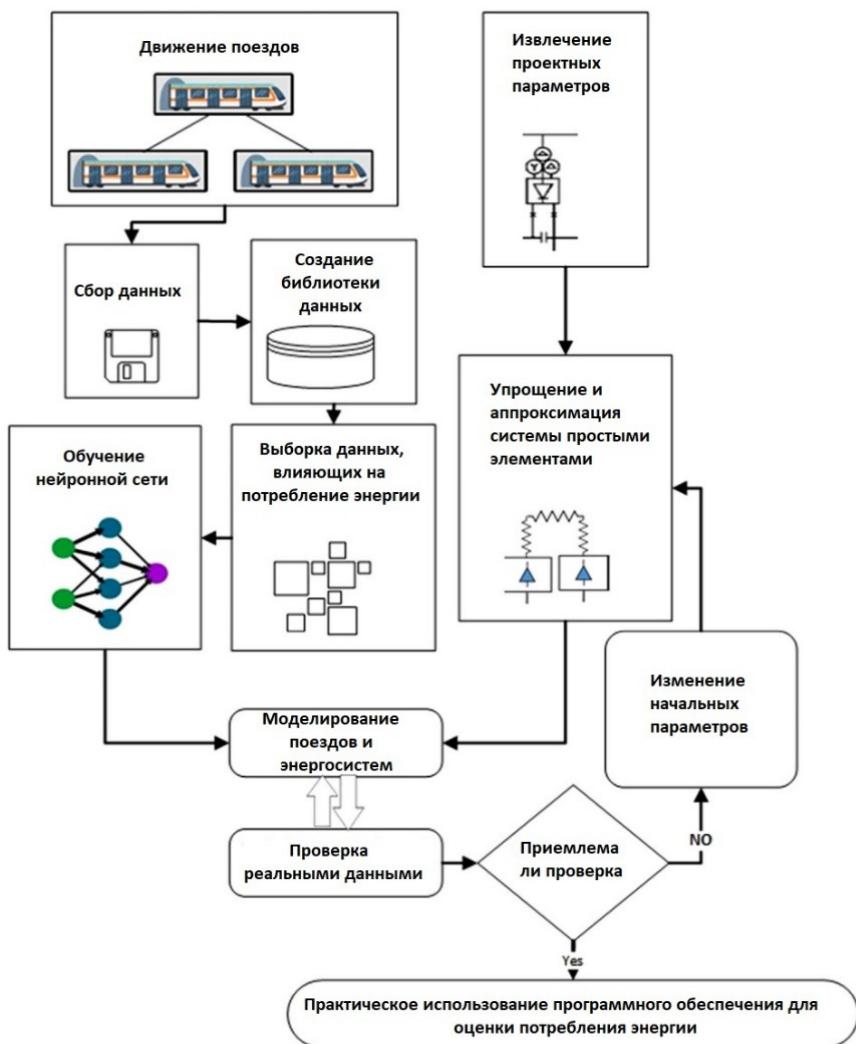


Рис. 6 – Методологическая схема

Данная гибридная модель, объединяющая механизм (физическая модель цепи) и данные (измерения токов, напряжений, нагрузок), применяется для оценки эффективности рекуперации энергии и оптимизации распределения энергии между поездами. Авторы [24] сообщают, что их гибридный подход позволил на 8% увеличить использование рекуперативного торможения за счет интеллектуального согласования режимов движения поездов – по сути, нейросетевая модель предсказывает оптимальные моменты начала торможения, чтобы максимизировать прием энергии другим поездом.

Квантово-классические гибриды.

Отметим, что в рассматриваемом подходе на текущем этапе алгоритмы машинного обучения не применяются. Используются квантовые вычисления в комбинации с классическими методами оптимизации. Под квантовыми вычислениями здесь понимается решение задач, сведённых к квадратичной безусловной бинарной оптимизации (QUBO):

$$\min_{x \in \{0,1\}^n} x^T Q x \quad (2)$$

где $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ симметричная матрица коэффициентов, а вектор x содержит бинарные переменные. Эквивалентной постановкой является модель Изинга:

$$\min_{x \in \{-1,+1\}^n} \left(\sum_i h_i s_i + \sum_{i < j} J_{ij} s_i s_j \right) \quad (3)$$

где s_i – спиновые переменные, h_i – локальные поля, J_{ij} – коэффициенты взаимодействия.

Поиск глобального минимума такой энергии соответствует нахождению оптимального решения исходной задачи. В работе [21] задача конфликтного планирования поездов формулируется именно в такой форме. Из-за ограничений современных квантовых устройств (число кубитов, топология, шум) применяется гибрид: классические эвристики выполняют разбиение задачи на кластеры, тогда как внутри кластеров наиболее конфликтные переменные оптимизируются квантовым отжигом. Эксперименты показали ускорение нахождения допустимых решений на 30-40 % по сравнению с классическим методом при некотором снижении качества.

Перспективы связаны с интеграцией методов машинного обучения – для генерации стартовых решений, сокращения размерности или настройки параметров оптимизации, а также с применением квантовых технологий для ускорения обучения и оптимизации в ML-задачах.

2.4 Диагностика, мониторинг и техническое зрение

Одно из перспективных направлений – применение гибридных алгоритмов для автоматической диагностики состояния инфраструктуры и подвижного состава, включая системы технического зрения и распознавания. Здесь гибридность часто проявляется в слиянии данных с разных датчиков или комбинации алгоритмов распознавания образов с логическими правилами принятия решения.

Обнаружение дефектов пути и контактной сети. В современной диагностике путевого хозяйства широко применяются системы машинного зрения на базе нейросетей (например, алгоритмы типа YOLO для обнаружения объектов на изображениях пути). Однако полностью автоматическое распознавание может давать ложные срабатывания, особенно при сложной обстановке на изображении. Поэтому в работе [26] предложена гибридная система обнаружения дефектов на рельсовых линиях, объединяющая методы объектного детектирования и правила на основе контекстной информации. Архитектура состоит из двух параллельных ветвей: первая – нейросеть YOLOv5 для обнаружения объектов-дефектов (например, излом болта крепления, трещина на подошве рельса), вторая – аналогичная нейросеть для обнаружения контекстных элементов (наличие стыковых накладок, креплений, заземляющих проводов и т.д.) [19]. На завершающем этапе выполняется слияние результатов – специальный модуль принимает решение, является ли обнаруженный объект действительно дефектом, на основе правил, учитывающих и объект, и контекст. Например, если нейросеть обнаружила тёмное пятно на рельсе (возможный излом), но при этом в

контексте присутствует элемент «стыковая накладка» на этом месте, то система решает, что это не дефект, а стык (т.к. излом рельса не будет сопровождаться наличием накладки). Такие правила прописаны экспертами и формализуют логику оценки ситуации. В результате гибридная система [26] достигает высокой точности: по данным авторов, точность обнаружения дефектов составила ~95% при практически нулевом количестве ложных тревог, тогда как чисто нейросетевой детектор выдавал множество ложных срабатываний (масляные пятна, тени ошибочно классифицировались как дефекты).

На рисунке 7 представлены примеры изображений с системы технического зрения [26].

Видно, что сложность сцены (наличие посторонних объектов, различных элементов инфраструктуры) затрудняет однозначную классификацию нейросетью. Гибридный подход с анализом контекста позволяет устранить неоднозначность. Например, на фрагменте (с) обе белые рамки указывают на места, где отсутствуют гайки на закладных болтах крепления рельса – алгоритм классифицирует это как дефект типа «missing nuts». При этом он учитывает, что рядом присутствуют другие элементы (шпалы, целые болты) и на основе правила относит ситуацию именно к дефекту крепления, а не к случайному предмету на пути.

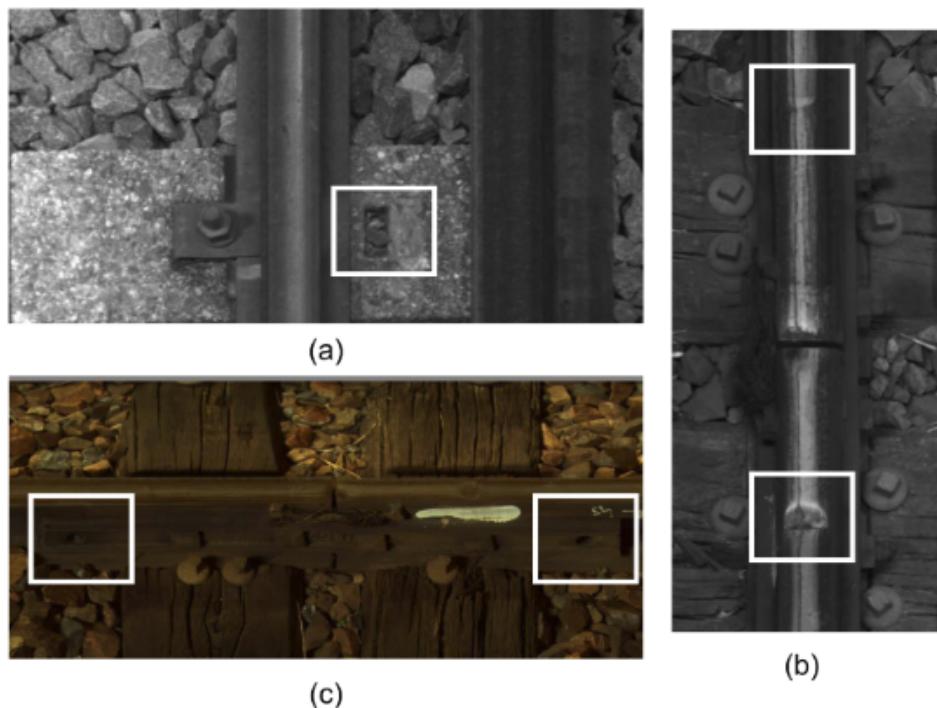


Рис. 7 – Примеры возможных дефектов пути (выделены белыми рамками) [26].

(а) Поврежденное рельсовое крепление (дефектный клеммный болт), (б) поверхностные дефекты рельса (трещины/выбойки на головке), (с) отсутствующие закладные болты (неисправность крепления шпалы)

Цифровизация чертежей и документации. Еще один интересный пример гибридной методики диагностики – автоматизация обработки инженерных чертежей и схем. В работе [27] решалась задача распознавания и цифровой векторизации схем релейной централизации (схем СЦБ) железной дороги. Предложенный метод сочетает машинное обучение (сверточные нейросети) для распознавания отдельных графических примитивов на отсканированных чертежах и алгоритмы оптимизации для корректировки и приведения этих примитивов к строгой топологии схемы. Проще говоря, нейросеть определяет на изображении линии, условные обозначения реле, контактов и т.п., но ее результаты могут быть фрагментированы или смешены. Поэтому далее подключается алгоритм, основанный на эволюционном подходе, который подбирает параметры (поворот, сдвиг) компонентов, чтобы собрать их в логически цельную схему (с замкнутыми цепями, соединенными контактами). Этот гибрид позволил достичь практически 100% точности оцифровки: все соединения на чертеже были корректно восстановлены в цифровом виде. Таким образом, комбинация распознавания образов и алгоритмического доведения до консистентности обеспечивает полностью автоматическую цифровизацию старых чертежей, что важно для перевода архивов железных дорог в электронный формат.

Идентификация подвижного состава. Гибридные нейросетевые алгоритмы применяются и для идентификации номеров вагонов, локомотивов, а также обнаружения неисправностей подвижного состава на ходу. Например, система, описанная в диссертации [28], использует комбинацию нейросети и искусственной иммунной системы для автоматической идентификации единиц подвижного состава по изображениям и сигналам RFID. Нейросеть выделяет признаки (особенности изображения номера вагона, акустический «отпечаток» вагона и др.), а алгоритм, вдохновленный биологической иммунной системой, выполняет сопоставление этих признаков с эталонами в базе, обнаруживая совпадения даже при помехах. Результат – надёжность идентификации вагонов в режиме онлайн достигла 99%, устойчивость к шуму повысилась по сравнению с одной нейросетью, а время обработки осталось в рамках, допустимых для работы системы на реальном потоке вагонов [28]. Здесь гибридизация позволила объединить обучение (нейросеть обучается выделять оптимальные признаки) с алгоритмом, имитирующим распознавание антигенов иммунной системой, что даёт высокую точность при малом числе ложных срабатываний.

Гибридные методы в железнодорожном транспорте демонстрируют высокий потенциал как в задачах оптимизации, так и в диагностике и мониторинге. Их сила заключается в сочетании разнородных подходов – симуляции и эвристик, машинного обучения и математической оптимизации, экспертных правил и обучаемых моделей. Это позволяет решать многокритериальные задачи (например, минимизацию задержек и отклонений от графика) эффективнее традиционных методов, снижать интегральные показатели потери качества обслуживания на десятки процентов и повышать устойчивость расписаний. В области диагностики гибридные системы обеспечивают более полное и надежное обнаружение дефектов благодаря объединению данных разных типов (видео, аудио, сенсоры) и комбинации алгоритмов с экспертными знаниями. Такой подход не только уменьшает число ложных тревог и повышает интерпретируемость результатов, но и позволяет системам адаптироваться к новым типам неисправностей. Несмотря на то что внедрение гибридных решений требует значительных вычислительных ресурсов и интеграции сложных технологий (например, решателей смешанного целочисленного программирования или высокопроизводительной обработки потоковых данных), общая тенденция указывает на их возрастающую доступность и практическую ценность. В результате, гибридные методы могут служить важным инструментом повышения эффективности управления перевозками и надежности железнодорожной инфраструктуры.

3. Сравнительный анализ подходов

Как видно из обзора, гибридные алгоритмы разрабатываются для самых разных задач железнодорожной отрасли. Важно понять, какие комбинации методов дают наилучший эффект в тех или иных условиях, а также как они соотносятся по показателям точности и производительности. В данном разделе мы проведем сравнительный анализ упомянутых подходов, сведя воедино их ключевые характеристики и результаты.

Точность и качество решений. Практически во всех работах отмечается, что гибридный подход обеспечивает лучшую точность или меньшую ошибку по сравнению с любым из отдельных методов. Например, гибридная модель прогнозирования ROP (бурения) в [7] имела коэффициент детерминации $R^2 = 0.9936$ против 0.9934 у лучшей индивидуальной модели (Random Forest) [30]. Хотя разница кажется небольшой, в условиях реальных данных она существенна и сопровождалась снижением RMSE (4) и MAPE (1) примерно на 5-10% [30]. В железнодорожном контексте аналогичные наблюдения: гибридное управление скоростью [8] снизило ошибку регулирования с ~3 км/ч до ~1 км/ч, гибридное прогнозирование износа [14] уменьшило среднюю процентную ошибку на десятки процентов, гибридное расписание [19] улучшило оба критерия оптимизации (задержки и отклонения) на двухзначные проценты. Эти данные подтверждают, что комплексный учёт факторов через гибридизацию действительно повышает качество работы алгоритмов.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2} \quad (4)$$

Стоит отметить, что наибольший выигрыш часто достигается в случаях, когда компоненты гибридной модели существенно различаются по природе. Например, комбинация «физическая модель + нейросеть» (как в [8] или [7]) даёт более значимый прирост точности, чем комбинация схожих методов (например, нейросеть + дерево решений). Это объяснимо: физическая модель приносит структурную точность, а нейросеть – гибкость подстройки. Сходные методы же зачастую дублируют друг друга. Таким образом, при разработке гибридного алгоритма важно выбирать действительно дополняющие друг друга компоненты.

Производительность и вычислительная сложность. Гибридные алгоритмы, как правило, сложнее и требуют больших ресурсов, чем классические. Тем не менее, правильно спроектированный гибрид может выигрывать во времени за счет сокращения переборов или числа итераций. Пример – гибрид NSGA-II с нейросетью [19]: предсказание нейросети помогает алгоритму быстрее сходиться к оптимальному фронту решений, фактически убирая необходимость проверять заведомо плохие варианты. В результате время расчета уменьшилось примерно на 20% относительно чистого NSGA-II [19]. Аналогично, в гибридном для цифрового двойника [25] симуляция используется точечно – только в случае нарушения – и на остальном промежутке работают быстрые нейросетевые модели, что дает возможность близкого к реальному времени анализа ситуации.

С другой стороны, некоторые гибриды могут оказаться тяжеловесными. Например, сочетание имитации и оптимизации [18] требует значительного времени, если конфликты многочисленны, так как симуляция должна многократно перезапускаться. В таких случаях на помощь приходят параллельные вычисления и распределенные системы – их использование само по себе можно рассматривать как технический гибрид (объединение алгоритма с инфраструктурой НРС). В обзорной статье [2] подчёркивается, что узким местом ИИ в железнодорожной отрасли становится именно вычислительная часть, и ожидается, что дальнейшие достижения будут связаны с внедрением ускорителей, облачных платформ и квантовых вычислений для самых тяжелых задач.

Метрики и критерии оценки. В каждой подзадаче используются профильные метрики. Для прогнозов – R^2 (5), RMSE (4), MAE (6) MAPE.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i e_i^2}{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2 \quad (6)$$

Для расписаний – суммарная/средняя задержка и число конфликтов; для управления – MSE/ISE/IAE, перерегулирование, время установления; для диагностики – precision/recall/F1 и время отклика. Далее приведем значения для рассмотренных работ и сравним их с базовыми методами. Рассмотрим, какие метрики применялись в рассмотренных работах и как по ним проявили себя гибридные модели:

1. **Метрики точности прогнозов:** R^2 , RMSE, MAPE, MAE. Гибридные модели почти всегда показывали более высокое R^2 и более низкие ошибки. Например, [7] (нефть) – снижение RMSE ~30%, [15] (балласт) – повышение R^2 с 0.8 до 0.9, [14] (износ колес) – снижение MAPE с 15% до 5%. Эти улучшения означают более надежные прогнозы, что прямо влияет на безопасность и экономику (предотвращение аварий, оптимизация ремонтов).
2. **Метрики оптимизации расписаний:** суммарные и средние задержки, количество конфликтов, отклонение от графика, нелинейные критерии типа суммарной потери качества обслуживания (как у [19]). Гибридные алгоритмы либо достигали меньших значений задержек/отклонений при тех же ограничениях, либо предоставляли решения с лучшим балансом критериев. Например, в [19] гибрид нашел компромиссное решение с 15% снижением задержек ценой 13% роста операционных затрат, тогда как классический алгоритм давал или малые задержки за счет больших затрат, или

экономичные решения с неприемлемыми задержками. То есть гибрид расширяет Парето-оптимальный фронт решений.

3. **Метрики управления движением:** среднеквадратичная ошибка регулирования скорости, перегрузки, комфорт (PSD-метрики вибраций). В [8] снижение СКО ошибки ~70%, в [9] снижение вибраций ~15-20%. Это прямое улучшение показателей качества вождения и обслуживания пассажиров.
4. **Метрики диагностики:** точность, полнота (recall), специфичность, F1 – мера для классификации дефектов. Гибридные системы зрения [26] показали Precision ~0.95, Recall ~0.98, $F_1 > 0.96$, что существенно лучше, чем у одной нейросети (F_1 порядка 0.8-0.85). В задачи идентификации [28] – точность 99% против 95% у базовой нейросети. То есть гибриды уменьшают как пропуски дефектов, так и ложные срабатывания, двигаясь к практической безошибочной работе.

Ограничения и области улучшения. Несмотря на перечисленные преимущества, гибридные подходы имеют и слабые места. Во-первых, усложнение модели затрудняет её интерпретацию и отладку. Если чистый алгоритм можно понять (нейросеть – через веса, нечёткую модель – через правила, оптимизационную – через ограничения), то гибрид из нескольких компонентов становится чёрным ящиком для инженеров. Некоторые работы (например, [26]) решают это за счет чёткой модульной структуры и визуализации промежуточных результатов, однако общая проблема интерпретируемости остается.

Во-вторых, требования к данным и экспертизе возрастают. Надо собирать не только обучающие выборки, но и формализовать правила, настраивать симуляторы, поддерживать сразу несколько систем. Например, гибрид [13] (ANFIS для станций) потребовал и исторических данных по пассажиропотокам, и знаний экспертов по уровням риска, и калибровки видеодатчиков. Разработать и внедрить такую систему сложнее, чем одну нейросеть или одно правило.

Наконец, некоторые гибридные алгоритмы узко специализированы под конкретную задачу или инфраструктуру. Например, модели [11,12] по рискам заточены под подход «ОЛВМ + статистика РЖД» и трудно применимы вне этой области. Поэтому одной из перспектив является создание более универсальных фреймворков гибридного интеллекта, которые можно будет адаптировать под разные задачи с минимальными изменениями.

Тем не менее, общий тренд в исследованиях – расширение применения гибридных методов. Многие авторы отмечают, что будущие системы управления и аналитики на железнодорожном транспорте будут строиться по принципу цифровых платформ, объединяющих моделирование, оптимизацию и обучение [2]. Уже сейчас проекты по цифровым двойникам (например, [29]) фактически представляют собой комплекс гибридных моделей, связанных между собой.

В Таблице 1 ниже приведено обобщенное сравнение различных комбинаций методов ИИ по их свойствам.

Таблица 1
Сравнение различных гибридных комбинаций методов ИИ

Комбинация методов	Премущества	Недостатки/сложности	Примеры приложений
Нейросеть + нечёткая логика	Интерпретируемость, устойчивость к шуму. Повышенная точность благодаря обучению.	Настройка правил, требует экспертных знаний	Оценка рисков [11], ANFIS для переполненности [13]
Нейросеть + физическая модель	Учет физических законов, экстраполяция за пределы данных. Коррекция систематических ошибок модели.	Нужны качественные данные для обучения. Сложность интеграции.	Управление движением [8], цифровые двойники [25]
Эволюционный алгоритм + нейросеть	Глобальный поиск + быстрая адаптация. Хорошее покрытие пространства решений.	Большие вычислительные затраты. Возможны нестабильность решений.	Оптимизация расписаний [19], настройка контроллеров [9]
Имитация + эвристика	Реалистичность + целенаправленное решение конфликтов. Высокая достоверность результатов.	Трудоемкость вычислений. Не гарантирует оптимум.	Диспетчеризация [17, 18], моделирование узлов
Мультимодель (ensemble разных алгоритмов ML)	Повышает обобщающую способность, сглаживает ошибки отдельных моделей.	Требует много данных, риск переусложнения.	Прогнозирование спроса (ансамбли деревьев и сетей), диагностика [26] (две сети + правила)

Как видно, каждое сочетание имеет свою нишу. Выбор гибридной архитектуры диктуется спецификой задачи: требуется ли интерпретируемость (тогда полезна нечёткая логика), есть ли хорошая физическая модель процесса (тогда стоит внедрить ее в ML), насколько критично глобальное решение (тогда полезны эволюционные или переборные компоненты) и т.д. Далее, в следующем разделе, мы обсудим рекомендации по выбору методов под конкретные типы задач управления на железнодорожном транспорте.

4. Выбор методов и рекомендации по применению

Анализ литературы позволяет сформулировать ряд рекомендаций относительно того, какие гибридные подходы наиболее эффективны для различных задач управления технологическими процессами железнодорожного транспорта:

- 1. Задачи управления движением и регулирования скорости/тяги.** Рекомендуется использовать гибриды, сочетающие строгие модели движения с обучаемыми корректирующими блоками. Например, для систем автоворедения поездов – механизм движения + ML-компенсатор (как у [8]), для систем управления тяговым приводом – классический регулятор + нечёткая надстройка (как у [6]). Это обеспечивает точность выполнения графика и устойчивость к возмущениям. В задачах виброзащиты эффективны гибриды с обучением с подкреплением (см. [9]) для адаптации регуляторов подвесивания в реальном времени.

2. **Диспетчеризация и управление трафиком при сбоях.** Рекомендуются эвристикоимитационные гибриды или оптимизационные гибриды с ML. Если инфраструктура и трафик относительно простые – подойдет симуляция + правила (пример [17]). В крупных сетях с множеством поездов – лучше применять многошаговые оптимизационные гибриды (*rolling horizon*) с встраиванием обученных моделей для ускорения [19]. Кроме того, полезно использовать предобученные модели для прогнозирования последствий решений (как Hybrid AI у Hitachi [10]), чтобы диспетчер мог мгновенно оценить варианты. Здесь важен упор на скорость вычислений, поэтому гибрид с ML предпочтительнее чисто оптимизационного алгоритма.
3. **Прогнозирование технического состояния и рисков.** Высокие результаты показывают нейро-нечеткие системы и комбинирование статистических методов с физическими моделями деградации. Для оценки рисков безопасности – рекомендовано применять гибрид вида логико-вероятностная модель + статистический ML, как у [11, 12], что позволяет учесть и теорию надежности, и фактическую статистику отказов. Для мониторинга состояния пути и подвижного состава – целесообразно комбинировать модели износа с обучением по данным диагностических средств (пример [15, 14]). Также стоит внедрять цифровые двойники [25] для ключевых узлов инфраструктуры – они могут служить полигоном для прогнозных расчетов (что будет если...), объединяя симуляцию и ИИ.
4. **Оптимизация расписаний и ресурсов.** Практика показывает, что трудно превзойти по качеству оптимизационные алгоритмы, но гибридизация с ИИ помогает решить проблему времени. Поэтому для реальных применений (когда решения нужны быстро) рекомендуется: 1) Разбивать большую задачу на подзадачи (декомпозиция во времени и пространстве) – для этого отлично подходят методы скользящего окна или кластеризации, 2) Встраивать ML-модули для оценки качества промежуточных решений или для генерации хороших стартовых решений. Например, можно обучить нейросеть выдавать приблизительный порядок пропуска поездов на перегоне, а затем точное время рассчитывать алгоритмом. Такой подход обеспечит баланс между скоростью и оптимальностью. Интересной перспективой является использование квантовых вычислений в гибриде – уже есть исследования [21], и по мере развития квантовой техники – это направление может дать превосходство в сложных случаях планирования.
5. **Энергоэффективность и экология.** Для оптимизации энергопотребления рекомендуются гибридные, учитывающие профиль пути, график и характер тяги. Хорошо зарекомендовали себя генетические алгоритмы с обучением (как [23]) для построения оптимальных профилей скорости. Также важно включать модель электросети (как в [24]) – т.е. гибрид «движение поезда + электроснабжение», что позволит оптимизировать взаимодействие поездов (рекуперация, пиковая нагрузка). В перспективе, с ростом массива данных, возможно применение глубокого RL (обучения с подкреплением) в гибридном с имитацией движения поездов для выработки энерго-оптимальных стратегий управления – такие опыты уже ведутся.
6. **Диагностика и техническое зрение.** Здесь рекомендуется комбинировать как можно больше источников информации: видео, аудио, вибродатчики, тепловизоры – и использовать фьюжн-модели, объединяющие результаты отдельных детекторов. В частности, методология [26] (объектная нейросеть + контекстная нейросеть + решающие правила) показала высокие результаты и может быть рекомендована к апробации/ внедрению в системах контроля пути. Также оправдано использование трансферного обучения – когда нейросеть обучена на одном типе дефекта, а затем с частичным переобучением применяется к другому; это своего рода гибридизация знаний из разных доменов. Для диагностики подвижного состава (подшипники, моторы) можно рекомендовать гибридные сигнальные методы (вибраакустический анализ) с ML – например, вначале проводить частотный анализ сигнала, выделять признаки (энергия на определенных гармониках), а затем классифицировать их с помощью обученной модели. Такой двухстадийный гибрид (физика + ИИ) часто дает меньший процент ложных срабатываний, чем прямая классификация «сырых» сигналов нейросетью.

Обобщая рекомендации: гибридные алгоритмы целесообразно применять там, где задача либо слишком сложна для чисто аналитического решения, либо критически важна надежность и точность. В простых случаях внедрение гибридных может быть избыточным – например, для расчета средней нагрузки станции достаточно классических методов. Но в сложных

системах – узлы с большим количеством поездов, высокоскоростное движение с жестким графиком, инфраструктура с переменным состоянием – гибриды дают существенные выигрыши.

Отдельно отметим значимость человеческого фактора: при внедрении гибридных систем важно, чтобы персонал понимал принципы их работы. Поэтому желательно, чтобы гибридные алгоритмы предоставляли обратную связь и объяснения. Некоторые современные разработки включают модули объяснимого ИИ, которые по результату (например, предложенному корректируя расписания) могут указать, какие факторы (данные, правила) к этому привели. Это повышает доверие к системе и облегчает ее принятие на практике.

5. Ограничения и перспективы развития

Несмотря на очевидные успехи гибридных подходов, существуют ряд ограничений и вызовов, которые предстоит преодолеть в будущем:

- Сложность разработки и валидации.** Гибридные системы зачастую представляют собой набор нескольких моделей, что усложняет их тестирование и сертификацию. В области безопасности движения это критично – необходимо гарантировано убедиться, что алгоритм не приведет к опасной ситуации. Одно из направлений развития – применение методов верификации и формальных доказательств корректности для частей гибридной системы. Например, можно формально проверить логическую часть (нечеткие правила или решающие правила) на отсутствие противоречий, а затем анализировать нейросетевую часть методами статистических испытаний. Совмещение таких подходов – сам по себе научный вызов.
- Требования к данным.** Многие гибридные алгоритмы требуют больших объемов достоверных данных для обучения ML-компонент. На железной дороге далеко не всегда есть такие данные (особенно про редкие события – аварии, крупные сбои). Здесь перспективно развитие методов создания синтетических данных: высокодетальные симуляторы, генеративные модели, перевода опыта других сетей (трансферное обучение). Гибриды будущего, вероятно, смогут сами генерировать дополнительные данные для своего обучения (например, имитация множества сценариев аварий для обучения диспетчерского ИИ). Это потребует еще более тесной интеграции симуляции и обучения.
- Совместимость и стандартизация.** Пока что каждое решение разрабатывается индивидуально. В перспективе нужно стремиться к созданию унифицированных платформ. Возможно появление своего рода фреймворков гибридного ИИ для транспорта, где из типовых модулей (нейросеть, оптимизатор, база правил, имитационная модель) можно будет «собрать» нужный гибрид под задачу. Это упростит внедрение таких систем на разных дорогах. Уже предпринимаются шаги в эту сторону – например, проекты по онтологиям железнодорожных данных и стандартизации интерфейсов для цифровых двойников.
- Кибербезопасность и надежность.** Усложнение алгоритмов ведет к появлению новых уязвимостей. Нейросети могут быть подвержены атакам (*adversarial examples*), логические правила – умышленным манипуляциям. Гибридные системы могут стать целью для кибератак, стремящихся вывести их из строя или ввести в заблуждение (особенно, если они влияют на управление движением). Поэтому перспективным направлением является разработка защищенных гибридных алгоритмов, устойчивых к некорректным данным и злонамеренным воздействиям. Например, интеграция методов обнаружения аномалий в поток данных (на основе тех же ML) как неотъемлемой части гибрида.
- Адаптивность и самообучение.** Идеальный гибридный алгоритм должен уметь адаптироваться к изменениям системы без полной перенастройки. Уже сейчас есть примеры, когда модель подстраивается при накоплении новых данных (обучение *online*). В будущем, вероятно, появятся самооптимизирующиеся гибриды, которые смогут изменять собственную структуру. Например, добавлять новые правила, если нейросеть выявила новый паттерн, или переключаться между методами в зависимости от ситуации (*situation-aware AI*). Это приведет к еще большей эффективности, но и усложнит контроль над такими системами.

Несмотря на перечисленные сложности, перспективы гибридных подходов в железнодорожной отрасли оцениваются как благоприятные. Современные исследования (например, [1]) показывают, что интеграция ИИ в транспортные системы – один из ключевых факторов их дальнейшего развития, и наибольший эффект дадут именно комплексные решения, объединяющие лучшее из мира данных и мира моделирования. Уже сейчас гибридные алгоритмы выходят из лабораторий: внедряются пилотные проекты по интеллектуальной диагностике пути, автоматизированному диспетчерскому советчику, прогнозированию состояния инфраструктуры. В ближайшие 5-10 лет можно ожидать, что гибридные системы станут стандартным элементом цифровой платформы железных дорог – подобно тому, как системы сигнализации или связи.

6. Обсуждение

В обзоре рассмотрены современные гибридные алгоритмы, применяемые для управления технологическими процессами на железнодорожном транспорте. Под гибридными понимаются алгоритмы, сочетающие разные подходы – методы искусственного интеллекта, математического моделирования, оптимизации и др. Были выделены основные классы гибридных методов (нейро-нечеткие системы, физические модели с ML, эволюционные алгоритмы с обучением, гибридная симуляция, комбинированное обучение и др.) и показано, как каждый из них находит применение в железнодорожной отрасли.

Обзор применения гибридных моделей продемонстрировал универсальность и эффективность подобных подходов. Они используются для автоматического управления движением и повышают точность регулирования и безопасность. Они позволяют прогнозировать риски и техническое состояние с невиданной ранее точностью, давая железнодорожникам инструмент проактивного предотвращения инцидентов. Гибридные алгоритмы оптимизации расписаний и планирования ресурсов помогают находить компромиссные решения и оперативно реагировать на сбои, улучшая пунктуальность и качество обслуживания. В диагностике и мониторинге гибридные системы технического зрения и анализа данных дают возможность существенно повысить уровень автоматизации обнаружения неисправностей, снизив человеческий фактор и ускорив реагирование.

Сравнение различных подходов подтвердило, что гибридизация методов приводит к улучшению ключевых метрик: снижается ошибка прогнозов (на десятки процентов), уменьшаются задержки поездов, сокращаются издержки энергии, растет точность диагностики. Особенно важно, что гибридные системы лучше справляются со сложными многокритериальными задачами, где нужно одновременно оптимизировать несколько показателей. Тем не менее, гибриды предъявляют более высокие требования к разработке, вычислительным ресурсам и объемам данных, что накладывает определенные ограничения.

Из анализа работ можно сделать практический вывод: при решении конкретной задачи на железнодорожном транспорте следует рассмотреть возможность применения гибридного алгоритма, если задача сложна, а цена ошибки велика. При этом нужно тщательно выбирать компоненты гибрида – они должны дополнять друг друга. Также важно проводить обширное тестирование таких систем и постепенно внедрять их в эксплуатацию, обеспечивая доверие со стороны персонала и соответствие нормативным требованиям безопасности.

Перспективы развития гибридных алгоритмов видятся в дальнейшей интеграции всех новых источников данных (IoT-датчики, спутниковые системы, мобильные устройства), в использовании мощных вычислительных средств (вплоть до квантовых вычислений) для еще более сложных оптимизационных задач, а также в повышении автономности и адаптивности самих алгоритмов. В будущем можно ожидать появления самообучающихся гибридных систем управления железнодорожным транспортом, которые в режиме реального времени будут подстраивать свои стратегии на основе текущей обстановки и целей – фактически реализуя принципы гибкого «умного» железнодорожного транспорта.

Заключение

В заключении отметим, что гибридные алгоритмы не являются панацеей: успех их применения зависит от грамотной постановки задачи, качества данных и правильной эксплуатации. Однако уже сейчас очевидно, что сочетание человека (экспертных знаний) и машины (вычислительной мощности и способности учиться) – за счет чего и реализуются гибридные системы – дает синергетический эффект. Железные дороги, обладая консервативной, проверенной практикой обеспечения безопасности, постепенно открывают инновациям ИИ. И гибридные алгоритмы представляют собой именно тот путь, который позволяет внедрять ИИ безопасно, постепенно и результативно. Они объединяют лучшее из традиционных методов управления и новейших достижений науки о данных, позволяя железнодорожной отрасли двигаться к более высокому уровню цифровизации и автоматизации и концепции «умной железной дороги».

Список использованной литературы

1. Неупокоева Е. О., Быстров В. В., Шишаев М. Г. Гибридная технология синтеза транспортно-логистических систем на основе машинного обучения и имитационного моделирования // Экономика. Информатика. – 2024. – Т. 51, № 3. – С. 670–681.
2. R. Tang, L. De Donato, Q. He, F. Flammini et al., “A literature review of Artificial Intelligence applications in railway transport,” *Transportation Research Part C*, vol. 140, p. 103679, 2022.
3. N. Besinović et al., “Artificial Intelligence in Railway Transport: Taxonomy, Regulations and Applications,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023. (Early Access).
4. F. Anifowose, A. Abdulraheem, J. Abdollahi et al., “Hybrid intelligent systems in petroleum reservoir modeling: the journey so far and the challenges ahead,” *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 251–263, 2017.
5. L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965.
6. Саттаров Х. А. Гибридные методы исследования режимов работы систем управления в условиях неопределенности // Железнодорожный транспорт: актуальные вопросы и инновации. – 2024. – № 1. – С. 6–11.
7. S. Jiao, R. Zhao, D. Yang et al., “Hybrid physics–machine learning models for predicting rate of penetration in the Halahatang oil field, Tarim Basin,” *Scientific Reports*, vol. 14, p. 5957, 2024.
8. T. Hou, Z. Hou, Y. Deng et al., “Research on speed control of high-speed trains based on hybrid modeling,” *Archives of Transport*, vol. 66, no. 2, pp. 65–85, 2023.
9. Y. Shiao and T.-L. Huynh, “A new hybrid control strategy for improving ride comfort on lateral suspension system of railway vehicle,” *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, vol. 43, no. 4, pp. 1842–1859, 2024.
10. Hitachi Ltd, “Railway Traffic Management Systems by Machine Learning: Recovery from Traffic Timetable Disruption by Hybrid AI,” *Hitachi Review*, vol. 70, no. 5, pp. 88–93, 2021.
11. Веревкина О. И. О гибридном методе прогнозирования рисков на железнодорожном транспорте на основании общего логико-вероятностного метода // Изв. Петербургского ун-та путей сообщения. – 2017. – Т. 14, № 4. – С. 615–627.
12. Веревкина О. И. Результаты применения гибридного метода оценки функциональных рисков нарушения безопасности движения на региональном и линейном уровнях в хозяйстве пути // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1(17). – С. 420–424.
13. H. Alawad, M. An, and S. Kaewunruen, “Utilizing an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) for Overcrowding Level Risk Assessment in Railway Stations,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 15, p. 5156, 2020.
14. J. Sresakoolchai, C. Ngamkhanong, and S. Kaewunruen, “Hybrid learning strategies: integrating supervised and reinforcement techniques for railway wheel wear management with limited measurement data,” *Frontiers in Built Environment*, vol. 11, p. 1546957, 2025.
15. S. Alagesan, B. Indraratna, R. S. Malisetty, Y. Qi, and C. Rujikiatkamjorn, “Prediction of rail ballast breakage using a hybrid ML methodology,” *Transportation Geotechnics*, vol. 52, p. 101555, 2025.
16. W. Phusakulkajorn, A. Núñez, H. Wang et al., “Artificial intelligence in railway infrastructure: current research, challenges, and future opportunities,” *Intelligent Transportation Infrastructure*, vol. 2, p. liad016, 2023.

17. Y. Cheng, "Hybrid simulation for resolving resource conflicts in train traffic rescheduling," *Computers in Industry*, vol. 35, pp. 233–246, 1998.
18. D. Jones, A. Milne, M. Mladenović et al., "Hybrid simulation methodology incorporating heuristics for scheduling in freight rail networks," *Journal of Simulation*, vol. 18, pp. 1–14, 2024.
19. W. Zhao, L. Zhou, and C. Han, "A Hybrid Optimization Approach Combining Rolling Horizon with Deep-Learning-Embedded NSGA-II Algorithm for High-Speed Railway Train Rescheduling Under Interruption Conditions," *Sustainability*, vol. 17, no. 6, p. 2375, 2025.
20. H. Lau, Y. Zhao, and L. Xiao, "Development of a hybrid fuzzy genetic algorithm model for solving transportation scheduling problem," *Journal of Information Systems and Technology Management*, vol. 12, no. 3, pp. 505–524, 2015.
21. M. Koniorczyk, K. Krawiec, L. A. S. Botelho, N. Bešinović, and K. Domino, "Application of a Hybrid Algorithm Based on Quantum Annealing to Solve a Metropolitan Scale Railway Dispatching Problem," *arXiv preprint arXiv:2309.06763*, 2023.
22. A. Yousefi and M. S. Pishvaei, "A hybrid machine learning–optimization approach to pricing and train formation problem under demand uncertainty," *RAIRO – Operations Research*, vol. 56, no. 3, pp. 1429–1451, 2022.
23. J. Li, Y. Shi, T. Zhang, X. Li, and X. Wang, "Research on Train Energy Optimization Based on Dynamic Adaptive Hybrid Algorithms," *Electronics*, vol. 14, no. 8, p. 1588, 2025.
24. I. Villalba and R. Insa, "Applying a hybrid model considering the interaction between train and power system for energy consumption," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2018, p. 3643474, 2018.
25. X. Li and Y. Liu, "A Hybrid Data and Mechanism Model-driven Digital Twin Modeling Approach for Novel Traction Power Systems," *Urban Rail Transit*, vol. 11, no. 2, pp. 213–231, 2025.
26. A. Zhukov, A. Rivero, J. Benois-Pineau, A. Zemmari, and M. Mosbah, "A Hybrid System for Defect Detection on Rail Lines through the Fusion of Object and Context Information," *Sensors*, vol. 24, no. 4, p. 1171, 2024.
27. S. F. Stefenon, A. L. M. Marcato, A. J. S. Neto et al., "Automatic Digitalization of Railway Interlocking Engineering Drawings Based on Hybrid Machine Learning Methods," *Preprint (arXiv:2310.16721)*, 2024.
28. Артемьев И. С. Автоматизация процессов идентификации железнодорожных подвижных единиц на основе гибридных нейроиммунных моделей: дис. ... канд. техн. наук. – СПбГУПС, 2017. – 158 с.
29. A. Galvez, *Hybrid digital twins: a co-creation of data science and physics* (Ph.D. dissertation), Luleå University of Technology (Sweden), 2022, 196 p.
30. I. Sahin, "Railway traffic control and train scheduling based on inter-train conflict management," *Transportation Research Part B*, vol. 33, no. 7, pp. 511–534, 1999.
31. Y. Ou, A.-S. Mihăiță, A. Ellison, T. Mao, S. Lee, and F. Chen, "Rail Digital Twin and Deep Learning for Passenger Flow Prediction Using Mobile Data," *Electronics*, vol. 14, p. 2359, 2025.

УДК 625.2

НАУЧНЫЙ ОБЗОР: ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЕЙ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Алиев Вугар Амирович, д.ф.-м.н., профессор, Институт физики Министерства науки и образования, AMIR Technical Services Company, Баку, Азербайджан, E-mail: prof.vugar.aliyev@gmail.com

Озеров Алексей Валерьевич, Начальник Международного управления, АО «НИИАС», Москва, Россия,
E-mail: a.ozarov@vniias.ru

Бочков Александр Владимирович, д.т.н., учёный секретарь, АО «НИИАС», Москва, Россия,
E-mail: a.bochkov@vniias.ru

АННОТАЦИЯ

В статье представлен комплексный анализ современных тенденций развития высокоскоростного железнодорожного транспорта (ВСМ) в Китае, основанный на материалах XII Всемирного конгресса по высокоскоростным железным дорогам (Пекин, 2025). Рассматриваются ключевые технологические достижения, включая создание инновационного подвижного состава серии CR450 с рекордной скоростью 450 км/ч, внедрение интеллектуальных систем управления (CTCS) и переход на связь нового поколения (5G-R). Особое внимание уделено цифровой трансформации отрасли: применению искусственного интеллекта для диагностики и прогнозирования, созданию цифровых двойников инфраструктуры, а также масштабной роботизации процессов обслуживания. Анализируется роль Китайской академии железнодорожных наук (CARS) как системыобразующего элемента национальной инновационной экосистемы, обеспечивающей полный цикл разработки – от фундаментальных исследований до промышленного внедрения. Подчеркивается значение государственной стратегии, сочетающей масштабные инвестиции в НИОКР, развитие испытательной базы и активную патентную защиту технологий. Статья будет полезна специалистам в области транспортного машиностроения, железнодорожной автоматики и цифровых технологий, а также представителям органов управления транспортной отраслью, интересующимся передовым международным опытом.

Ключевые слова: высокоскоростной железнодорожный транспорт, искусственный интеллект, цифровизация, системы управления движением, китайские железные дороги, CR450, CTCS, 5G-R, CARS.

SCIENTIFIC REVIEW: HIGH-SPEED TECHNOLOGIES IN RAILWAY TRANSPORT

Vugar A. Aliyev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Institute of Physics, Ministry of Science and Education, AMIR Technical Services Company, Baku, Azerbaijan, E-mail: prof.vugar.aliyev@gmail.com

Alexey V. Ozerov, Head of the International Department, JSC «NIIAS», Moscow, Russia, E-mail: a.ozarov@vniias.ru

Alexander V. Bochkov, Doctor of Technical Sciences, Scientific Secretary, JSC «NIIAS», Moscow, Russia,
E-mail: a.bochkov@vniias.ru

ABSTRACT

The article provides a thorough analysis of the latest developments in China's high-speed rail (HSR) sector, drawing from materials presented at the 12th World Congress on High-Speed Rail in Beijing in 2025. The article examines key technological achievements, such as the development of the innovative CR450 series of trains capable of reaching speeds of up to 450 km/h, the implementation of intelligent control systems (CTCS), and the shift towards next-generation communications technology (5G-R). Particular attention is given to the industry's digital transformation, including the use of artificial intelligence for diagnostics and forecasting, creating digital twins of infrastructure, and large-scale robotization of maintenance processes. The article analyzes the role of the Chinese Academy of Railway Sciences (CARS) as a system-forming element of the national innovation ecosystem that provides a full development cycle from fundamental research to industrial implementation. The importance of a state strategy that combines large-scale investment in research and development (R&D), the development of a testing base, and active patent protection of technologies is emphasized. This article is useful for specialists in transport engineering, railway automation, and digital technologies, as well as for transport industry management representatives interested in advanced international experience.

Keywords: high-speed rail transport, artificial intelligence, digitalization, traffic control systems, Chinese railways, CR450, CTCS, 5G-R, CARS.

Введение

Современный этап развития транспортных систем характеризуется стремительным прогрессом в области высокоскоростного железнодорожного транспорта (ВСМ), где технологические инновации становятся ключевым фактором повышения эффективности, безопасности и экологичности перевозок. Особое место в этом процессе занимает Китай, который за последние десятилетия не только создал крупнейшую в мире сеть высокоскоростных магистралей, но и вышел на передовые позиции в разработке и внедрении прорывных технологий. XII Всемирный конгресс по высокоскоростному железнодорожному транспорту, состоявшийся в Пекине в июле 2025 года, стал знаковым событием, продемонстрировавшим масштабы достижений КНР в этой сфере.

Китайская модель развития ВСМ представляет собой комплексный подход, объединяющий передовые инженерные решения, цифровизацию, применение искусственного интеллекта и роботизацию. К концу 2024 года протяженность высокоскоростных линий в Китае достигла 48 000 км, что составляет более 70% от общемирового показателя. Ежедневно по этим магистралям курсирует свыше 8 600 поездов, перевозящих около 16 миллионов пассажиров. Такие масштабы стали возможны благодаря не только значительным инвестициям в инфраструктуру, но и созданию собственных технологических платформ, таких как система управления движением CTCS и подвижной состав серии «Фусин».

Особого внимания заслуживает роль научно-исследовательских институтов, в частности Китайской академии железнодорожных наук (CARS), которая обеспечивает полный цикл разработки и внедрения инноваций – от фундаментальных исследований до промышленного применения. Деятельность CARS охватывает широкий спектр направлений, включая испытания новых материалов, создание интеллектуальных систем управления и разработку стандартов, что позволяет Китаю не только адаптировать зарубежные технологии, но и формировать собственные, нередко превосходящие мировые аналоги.

Активное внедрение цифровых технологий, таких как искусственный интеллект, большие данные и интернет вещей, трансформирует традиционные подходы к управлению железнодорожным транспортом. Например, использование цифровых двойников инфраструктуры и прогнозной аналитики позволяет перейти от планового технического обслуживания к предиктивному, что значительно повышает надежность системы в целом. Кроме того, китайский опыт демонстрирует, как государственно-частное партнерство и международное сотрудничество способствуют ускоренному развитию отрасли, в том числе в области стандартизации и продвижения национальных решений на глобальном уровне.

Таким образом, изучение китайского опыта в области высокоскоростного железнодорожного транспорта представляет значительный интерес как с точки зрения технологических достижений, так и в аспекте организационных моделей, обеспечивающих их реализацию. Данный обзор направлен на систематизацию ключевых тенденций, представленных на XII Всемирном конгрессе, с акцентом на их практическую значимость и потенциал для применения в других странах.

Цель обзора – анализ ключевых технологических направлений, представленных на конгрессе, включая инновации в подвижном составе, системах управления, диагностике и роботизации, а также роль отраслевой науки в развитии ВСМ.

1. Методы

Проведение данного исследования основывалось на комплексной методологии, сочетающей различные подходы к сбору и анализу информации о развитии высокоскоростного железнодорожного транспорта в Китае. Основным источником эмпирических данных стали материалы XII Всемирного конгресса по высокоскоростному железнодорожному транспорту, включая тексты докладов, презентации и технические отчеты, что позволило получить доступ к первичной информации о последних технологических достижениях (180 докладов, 30 из которых посвящены ИИ и роботизации). Особую ценность представляли материалы, предоставленные непосредственно китайскими специалистами из Государственной корпорации «Китайские железные дороги» и Китайской академии железнодорожных наук, содержащие уникальные данные о текущих и перспективных разработках.

Важным компонентом исследования стал анализ визуальных материалов и технических спецификаций, представленных на сопутствующей конгрессу выставке MODERN RAILWAYS 2025, где демонстрировались новейшие образцы подвижного состава и оборудования. Для получения всестороннего понимания технологических процессов применялся метод включенческого наблюдения во время технических визитов на испытательные полигоны и производственные площадки, что дало возможность оценить практическую реализацию заявленных инновационных решений.

Сравнительный анализ использовался для сопоставления китайских технологических решений с международными аналогами, что позволило выявить специфические особенности и конкурентные преимущества китайской модели развития высокоскоростного транспорта. При работе с большими массивами технических данных применялись методы контент-анализа и текстовой аналитики, что способствовало систематизации и структурированию полученной информации. Особое внимание уделялось верификации данных через перекрестную проверку информации из различных источников, включая официальные документы, научные публикации и экспертные интервью, что обеспечило достоверность и объективность исследования.

2. Результаты исследований в области технологий высоких скоростей в железнодорожном транспорте

2.1 Подвижной состав

Китай создал крупнейшую в мире сеть высокоскоростных железных дорог [1]. Развитие высокоскоростного железнодорожного транспорта в Китае демонстрирует значительные достижения в области подвижного состава, где ключевым направлением стало создание инновационных электропоездов, сочетающих высокую скорость, энергоэффективность и безопасность [2-4]. На XII Всемирном конгрессе по высокоскоростному железнодорожному транспорту были представлены прототипы электропоездов CR450, разработанные на основе автономной платформы «Фусин» (рис. 1). Эти поезда способны развивать скорость до 450 км/ч, что подтверждено испытаниями на участке Ухань – Ичан [5]. Важным аспектом является снижение общего веса поезда на 10% по сравнению с предыдущими моделями, достигнутое за счёт использования углеродного волокна в конструкции кузова. Это не только уменьшило нагрузку на ось до менее чем 14,5 т, но и улучшило аэродинамические характеристики на 22%, что напрямую влияет на энергопотребление. Последнее удалось снизить на 20%, до 22 кВт·ч/км при скорости 400 км/ч, что делает эти поезда одними из самых экономичных в мире.

Безопасность движения также была существенно повышена благодаря усовершенствованию тормозной системы, сократившей тормозной путь до менее чем 6 500 м, и улучшению эффективности сцепления на 4%. Для обеспечения надёжной работы поездов была внедрена система диагностики с использованием 4 500 встроенных датчиков, которые непрерывно отслеживают состояние критически важных узлов, включая ходовую часть, кузов, токоприёмники и системы пожаротушения. Это позволяет оперативно выявлять и устранять потенциальные неисправности, минимизируя риски аварийных ситуаций.

Помимо технических характеристик, внимание было удалено комфорту пассажиров. Уровень шума в центральном вагоне поезда CR450 не превышает 68 дБ, что достигается за счёт оптимизации конструкции и применения современных шумопоглощающих материалов. Эти инновации делают китайские высокоскоростные поезда не только быстрыми и безопасными, но и комфортными для длительных поездок.

Таким образом, подвижной состав китайских высокоскоростных железных дорог представляет собой результат глубокой научно-технической проработки, где каждый элемент – от материалов кузова до систем диагностики – направлен на достижение максимальной эффективности, безопасности и удобства. Эти разработки не только укрепляют лидерство Китая в области BCM, но и задают новые стандарты для мирового железнодорожного транспорта.



Рис. 1 – Прототипы электропоездов CR450, разработанные на основе автономной платформы «Фусин»

2.2 Системы управления и безопасности

Развитие высокоскоростного железнодорожного транспорта в Китае сопровождается созданием сложных интеллектуальных систем управления, обеспечивающих безопасность движения на постоянно возрастающих скоростях [6]. Национальная система управления движением поездов CTCS, разработанная на основе адаптированной европейской платформы ERTMS/ETCS, представляет собой комплексное решение, интегрирующее рельсовые цепи и цифровую радиосвязь. Особенностью китайской системы стало сохранение гибридного принципа передачи информации, где наряду с радиоканалом GSM-R активно используются рельсовые цепи, что обеспечивает повышенную надежность на скоростях до 400 км/ч (рис. 2).

Проведенные испытания подтвердили устойчивость работы рельсовых цепей даже при воздействии обратного тягового тока, что позволяет системе продолжать функционирование в случае отказа радиоканального оборудования без снижения скорости движения.

Совершенствование систем управления движением сопровождается масштабным переходом на технологии нового поколения. В настоящее время ведется активная работа по внедрению стандарта 5G-R, который должен заменить устаревающий GSM-R. Для новой системы уже выделена частота 2,1 ГГц, разработаны технические требования, и ведутся испытания оборудования при участии ведущих телекоммуникационных компаний, включая Huawei. Особое внимание уделяется вопросам технологического наполнения нового стандарта – рассматриваются возможности передачи диагностических данных в реальном времени, реализации автоматизированного управления поездами и организации виртуальной сцепки составов. Переход на 5G-R планируется завершить к 2026 году, что позволит значительно увеличить пропускную способность каналов связи и улучшить параметры безопасности.

Важным направлением развития стало повышение уровня автоматизации управления. Внедрение алгоритмов искусственного интеллекта позволяет оптимизировать графики движения, повысить энергоэффективность управления поездами и автоматизировать процессы посадки пассажиров. Использование систем технического зрения для контроля «слепых зон» и распознавания аварийных ситуаций на путях значительно повышает безопасность движения. Особого внимания заслуживает интеграция систем управления с облачными платформами обработки данных, что обеспечивает принципиально новый уровень взаимодействия между подвижным составом и диспетчерскими центрами.



Рис. 2 – Доклад научного сотрудника CARS Чжан Мяо «Исследование адаптивности системы управления движения поездом для ВСМ 400 км/ч»

Китай активно работает над стандартизацией своих разработок, стремясь придать национальным решениям статус международных стандартов [7, 8]. Уже 13 китайских стандартов в области высокоскоростного движения получили статус International Railway Solutions (IRS) в рамках Международного союза железных дорог. Эта работа не только укрепляет позиции Китая на международной арене, но и создает основу для глобального распространения китайских технологий, что имеет важное значение для будущего развития высокоскоростного железнодорожного транспорта во всем мире.

2.3 Диагностика и мониторинг

Современные системы диагностики и мониторинга китайских высокоскоростных железных дорог представляют собой комплексную многоуровневую структуру, объединяющую стационарные и мобильные средства контроля, роботизированные комплексы и технологии дистанционного зондирования [9]. В основе этой системы лежит принцип постоянного мониторинга всех критически важных элементов инфраструктуры и подвижного состава, что позволяет перейти от планово-предупредительного обслуживания к предиктивной модели, основанной на точных прогнозах состояния оборудования. Каждый высокоскоростной поезд оснащается более чем тремя тысячами датчиков, непрерывно фиксирующих параметры работы всех систем – от состояния ходовой части до показателей токоприёмников и противопожарного оборудования. Эти данные в режиме реального времени передаются в единый центр мониторинга, где анализируются с использованием алгоритмов искусственного интеллекта, способных выявлять малейшие отклонения от нормативных показателей [10].

Особое место в системе контроля занимают мобильные диагностические комплексы, среди которых выделяется высокоскоростной инспекционный поезд CIT450, способный на скорости до 450 км/ч проводить комплексную проверку более ста параметров железнодорожной инфраструктуры. Этот уникальный подвижной состав обеспечивает контроль геометрии пути, состояния контактной сети, параметров взаимодействия колеса и рельса, а также работоспособности систем сигнализации и связи. Плотность размещения стационарных датчиков достигает десяти устройств на километр пути, что создаёт детальную картину состояния инфраструктуры, включая балластный слой, рельсовые соединения и искусственные сооружения.

Для мониторинга труднодоступных участков, особенно в условиях высокогорья или сложного рельефа, активно применяются беспилотные летательные аппараты,

оснащённые высокоточной измерительной аппаратурой. Спутниковая группировка Gaofen с разрешением съёмки до 1-2 метров дополняет наземные системы мониторинга, обеспечивая контроль протяжённых участков магистралей и крупных инженерных сооружений. Собранные данные интегрируются в единую цифровую платформу [11], создающую трёхмерную модель железнодорожной инфраструктуры с точностью до миллиметра, что позволяет не только оперативно выявлять существующие проблемы, но и прогнозировать износ элементов с точностью до 95% на месячный период [12].

Такая всеобъемлющая система диагностики обеспечивает беспрецедентный уровень безопасности и надёжности высокоскоростного движения, минимизируя вероятность отказов оборудования и позволяя оптимально планировать ремонтные работы. Интеграция данных мониторинга с системами управления движением даёт возможность автоматически корректировать скоростные режимы поездов в зависимости от текущего состояния инфраструктуры, создавая по-настоящему интеллектуальную транспортную систему.

2.4 ИИ и роботизация

Внедрение искусственного интеллекта и роботизированных систем стало ключевым фактором технологического превосходства китайских высокоскоростных железных дорог. Глубокие нейронные сети и алгоритмы машинного обучения проникли во все сферы – от проектирования инфраструктуры до управления пассажиропотоками [13]. Особенno значимым достижением стало создание большой обучаемой модели данных, которая агрегирует информацию с тысяч датчиков, систем технического зрения и BIM-моделей, формируя целостную цифровую картину транспортной системы. Эта платформа не просто собирает данные, но и вырабатывает управленические решения – например, автоматически инициирует ремонтные работы на основе прогноза износа элементов пути, а не по заранее установленному графику.

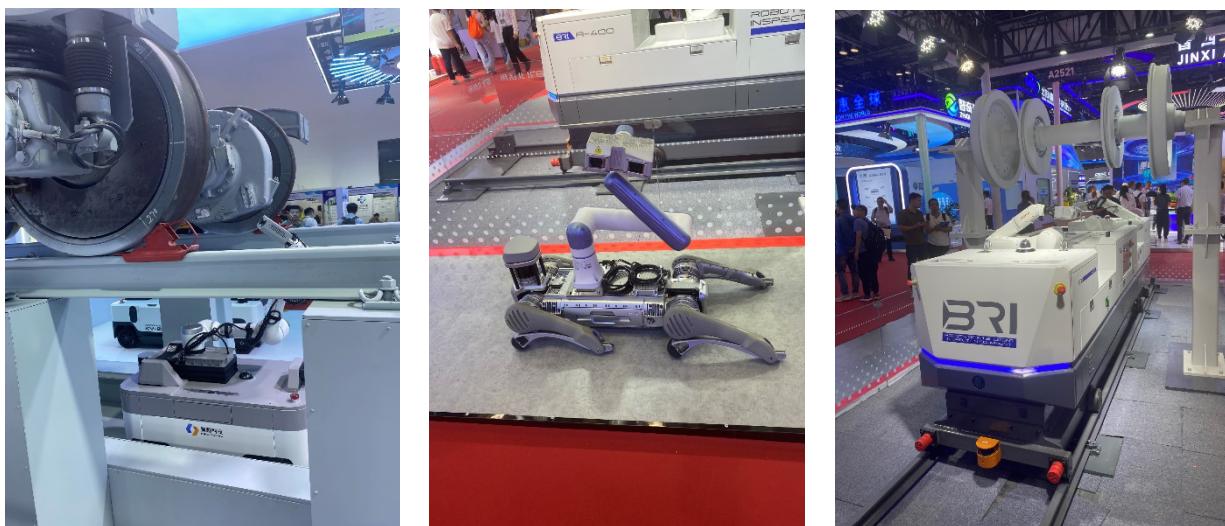


Рис. 3 – Решения в области роботизации процессов технического обслуживания, диагностики, ремонта и производства узлов подвижного состава

Роботизация производственных процессов достигла невиданных масштабов [14, 15]. На выставке MODERN RAILWAYS 2025 были представлены десятки специализированных роботов – от антропоморфных манипуляторов для тонкой настройки оборудования до автономных платформ для диагностики контактной сети (рис. 3). Эти системы способны работать в условиях высокого напряжения и сложных погодных условий, заменяя человека на опасных участках. Особый интерес вызывают роботизированные комплексы для обслуживания подвижного состава, которые с помощью компьютерного зрения и тактильных сенсоров выявляют микротрешины в узлах и деталях, не доступные человеческому глазу.

В сфере проектирования искусственный интеллект совершил настоящую революцию [16]. Нейросетевые алгоритмы научились автоматически генерировать BIM-модели на основе технической документации и данных лазерного сканирования, сокращая трудозатраты на 85%. Эти системы не просто копируют существующие решения, но и

оптимизируют конструкции, предлагая инженерные решения с улучшенными прочностными и аэродинамическими характеристиками. Аналитические модули на базе ИИ обрабатывают петабайты данных о работе оборудования, выявляя скрытые закономерности и предлагая пути повышения эффективности [17].

Синергия искусственного интеллекта и робототехники создает принципиально новую парадигму эксплуатации железных дорог, где ключевые решения принимаются автономными системами, а человек выполняет лишь контролирующие функции. Этот подход уже сегодня демонстрирует впечатляющие результаты – от сокращения времени обслуживания на 40% до повышения точности диагностики на порядок. Китайские разработки в этой области задают новые стандарты для мировой железнодорожной отрасли, показывая, как цифровые технологии могут трансформировать традиционные транспортные системы [18].

2.5 Испытательная база и наука

Фундаментом технологического лидерства Китая в области высокоскоростного железнодорожного транспорта стала уникальная исследовательская инфраструктура, создаваемая на протяжении десятилетий. Китайский национальный испытательный центр железных дорог в Пекине, наследующий лучшие традиции советской школы железнодорожных исследований, представляет собой грандиозный комплекс, включающий два специализированных испытательных кольца общей протяженностью 9 километров (рис. 4). Внешнее кольцо с идеальной круговой геометрией позволяет проводить испытания на экстремальных скоростях, в то время как внутренние пути с переменным профилем имитируют самые сложные эксплуатационные условия – от круtyх уклонов до участков с минимальными радиусами кривых. Эта уникальная лаборатория под открытым небом дополняется десятками специализированных исследовательских центров, оснащенных самым современным оборудованием для тестирования всех элементов железнодорожной системы – от пантографов и контактной сети до спутниковых навигационных систем.

Китайская академия железнодорожных наук (CARS) превратилась в мощный научно-производственный холдинг, объединяющий 22 исследовательских института и 60 высокотехнологичных предприятий. Этот уникальный симбиоз фундаментальной науки и прикладных разработок позволяет осуществлять полный инновационный цикл – от теоретических изысканий до серийного производства. Особое внимание уделяется созданию национальных стандартов и защите интеллектуальной собственности: портфель патентов CARS в разы превосходит аналогичные показатели ведущих зарубежных исследовательских центров. В академии работают около 100 специализированных лабораторий, где на 8 000 экспериментальных установках отрабатываются технологии будущего – от новых материалов для подвижного состава до квантовых систем связи.

Научный потенциал Китая в железнодорожной отрасли проявляется не только в масштабах исследовательской инфраструктуры, но и в системном подходе к подготовке кадров.

Создана многоуровневая система воспроизведения научных школ, где опытные специалисты передают знания молодым исследователям, обеспечивая преемственность и постоянное обновление технологий.

Китайский подход к подготовке кадров для научно-технологического сектора является не просто элементом поддержки, а стратегической инвестицией в человеческий капитал, напрямую увязанной с национальными целями развития. Эту систему характеризует долгосрочное планирование, жесткая конкуренция и глубокая интеграция с реальным сектором экономики.

Система начинается не в вузах, а значительно раньше. Китай сделал ставку на математику, естественные науки и технологии (STEM) уже в средней школе. Это создает мощный фундамент и огромный пул абитуриентов, мотивированных и подготовленных к инженерно-техническим специальностям.

Университеты категории «Проект 211» и особенно «Проект 985» (предшественники современной инициативы «Двойного первоклассного» плана) получают целевое финансирование для превращения в мировые научные центры. Они готовят не просто студентов, а будущих лидеров технологического развития. Обучение в них отличается высокой интенсивностью, ориентацией на решение практических задач и жесткой конкуренцией.

Студенты ведущих вузов, таких как Университет Цинхуа или Пекинский университет, с первых курсов вовлекаются в проекты под руководством профессоров,

которые сами являются получателями грантов на НИОКР. Это ломает барьер между «образованием» и «наукой».



Рис. 4 – Испытательный полигон Китайского национального испытательного центра железных дорог в Пекине

Государство активно управляет потоками талантов через систему целевых программ и грантов. Например, программа «Тысяча талантов» (The Thousand Talents Plan) – это наиболее известный пример системного подхода. Программа была нацелена на так называемый «обратный приток» высококвалифицированных китайских специалистов, работавших за рубежом. Им предлагались щедрые гранты, современные лаборатории и позиции в ведущих университетах и исследовательских институтах. Цель – не просто вернуть людей, а мгновенно перенести в Китай передовые знания, методологии и международные связи. Помимо финансирования исследований, Национальный фонд естественных наук Китая (NSFC) играет ключевую роль в поддержке молодых ученых через специальные гранты для докторантов и постдоков. Это создает карьерный трек, альтернативный уходу в индустрию, и позволяет талантливым исследователям строить независимую научную карьеру.

Ключевое отличие китайской системы – теснейшая связь подготовки кадров с реальным сектором. Крупные компании (Huawei, Tencent, BYD) создают собственные мощные исследовательские подразделения и активно сотрудничают с университетами. Студенты проходят практики и стажировки, участвуя в коммерческих проектах. Университетские лаборатории часто решают конкретные задачи, поставленные индустриальными партнерами. Технопарки и инновационные кластеры (например, Чжунгуаньцунь в Пекине или Шэньчжэнь) физически объединяют ведущие университеты, исследовательские институты, стартапы и корпорации. Это создает среду, где «преемственность знаний» происходит не формально, а в процессе совместной работы над общими проектами. Опытные инженеры и ученые из компаний фактически становятся наставниками для студентов и молодых сотрудников.

Масштаб – это главный козырь Китая. Система высшего образования выпускает миллионы инженеров и ученых ежегодно. Эта огромная масса потенциальных талантов создает чрезвычайно конкурентную среду, где выживают и добиваются успеха наиболее мотивированные и одаренные. Государство, вкладывая средства в инфраструктуру и гранты, создает «ловушку для талантов», предоставляя лучшим из лучших возможности для реализации внутри страны.

Именно эта сквозная система «выращивания талантов», работающая в унисон с моделью финансирования НИОКР, и позволила Китаю в сжатые сроки создать человеческий капитал, необходимый для технологического прорыва.

Такой комплексный подход, сочетающий мощную материальную базу, грамотную организацию исследований и внимание к кадровому потенциалу, позволяет Китаю не только адаптировать зарубежные разработки, но и создавать собственные прорывные технологии, определяющие будущее высокоскоростного железнодорожного транспорта во всем мире [19].

3. Обсуждение

Китайский опыт развития высокоскоростного железнодорожного транспорта представляет собой уникальный пример системной трансформации целой отрасли, где технологические инновации органично сочетаются с грамотной промышленной политикой и долгосрочным стратегическим планированием. Успех этой модели обусловлен несколькими фундаментальными факторами, среди которых особого внимания заслуживает создание замкнутого инновационного цикла – от фундаментальных исследований до коммерческого внедрения. Китайская академия железнодорожных наук (CARS) выступает в этой системе не просто научным учреждением, а своего рода «мозговым центром», координирующим взаимодействие между университетами, исследовательскими институтами и промышленными предприятиями. Такой подход позволил избежать характерной для многих стран разобщенности между теоретическими разработками и их практическим применением.

Важнейшим уроком китайского опыта является понимание того, что современный высокоскоростной транспорт – это не просто быстрые поезда, а сложная экосистема, требующая синхронного развития всех составляющих: инфраструктуры, систем управления, кадрового потенциала и нормативной базы. Особенно показателен пример внедрения технологии 5G-R, где параллельно с разработкой нового стандарта связи велась модернизация всего парка подвижного состава и диспетчерских центров, что обеспечило плавный переход без снижения качества обслуживания. Этот системный подход контрастирует с практикой многих стран, где инновации часто внедряются фрагментарно, что приводит к дисбалансам и снижению общей эффективности системы.

Особого внимания заслуживает китайская модель финансирования исследований и разработок, сочетающая значительные государственные инвестиции с механизмами привлечения частного капитала. Государственно-частное партнерство в железнодорожной отрасли Китая выстроено таким образом, что коммерческие компании заинтересованы не только в получении прибыли, но и в долгосрочном технологическом развитии. Это создает устойчивую основу для непрерывного совершенствования технологий, в отличие от распространенной в других странах практики «точечного» финансирования отдельных проектов.

Особенность китайской модели финансирования НИОКР заключается в формировании её как комплексной гибридной системы, в которой государственное стратегическое планирование тесно переплетается с механизмами рыночного финансирования. Её основу составляет концепция «стратегического рулевого», когда государство не просто выделяет средства, а активно формирует всю инновационную экосистему, задавая долгосрочные приоритеты через пятилетние планы и такие инициативы, как «Сделано в Китае 2025». Это создает для частного капитала четкие сигналы о перспективных направлениях для инвестиций, снижая неопределенность.

Центральную роль играют прямые государственные инвестиции, направляемые через Национальный фонд естественных наук Китая (NSFC) на фундаментальные исследования и в рамках Национальной программы ключевых НИОКР – на прикладные задачи. Крупные мегaproекты, такие как космическая программа или развитие высокоскоростных железных дорог, финансируются напрямую из бюджета, покрывая самые рисковые и капиталоемкие стадии. При этом ключевой особенностью модели является фазовый подход: по мере приближения разработок к коммерциализации подключаются рыночные механизмы. Государство стимулирует приток частного капитала через создание государственных венчурных фондов-соинвесторов, налоговые льготы для компаний, увеличивающих расходы на НИОКР, и развитие специализированных фондовых бирж, таких как STAR Market, для облегчения «выхода» инвесторов.

Этот симбиоз породил мощную многоуровневую экосистему, где провинциальные правительства, корпорации (как государственные, так и частные, например, Huawei или BYD) и венчурные фонды активно конкурируют и сотрудничают в финансировании инноваций. В результате Китай демонстрирует впечатляющие темпы роста затрат на НИОКР, что отражено в глобальных рейтингах.

Ключевые риски подобной модели связаны с коррупцией и финансированием проектов по принципу личных связей («гуаньси»), а не научной ценности, с дублированием усилий (разные провинции и институты могут конкурировать, вкладываясь в одни и те же технологии, что ведет к перерасходу средств). Критики указывают, что модель лучше работает для «догоняющего» развития и улучшающих инноваций, чем для фундаментальных прорывов, требующих академической свободы. Для иностранных инвесторов и компаний проблемой являются вопросы защиты интеллектуальной собственности.

Китайский опыт также демонстрирует важность активного участия в международной стандартизации [20]. Работа по приятию национальным разработкам статуса международных стандартов (IRS) не только укрепляет позиции страны на глобальном рынке, но и создает благоприятные условия для экспорта технологий. При этом важно отметить, что такая политика проводится без ущерба для защиты собственных интеллектуальных активов – китайские компании тщательно патентуют свои разработки перед их выходом на международную арену.

Перспективы дальнейшего развития китайской модели связаны с углублением цифровой трансформации отрасли. Уже сегодня очевидно, что такие технологии как искусственный интеллект, цифровые двойники и предиктивная аналитика становятся не просто инструментами оптимизации, а основой принципиально новых подходов к управлению транспортными системами. Опыт Китая показывает, что будущее высокоскоростного железнодорожного транспорта лежит в создании интеллектуальных самообучающихся систем, способных адаптироваться к изменяющимся условиям и предвосхищать потенциальные проблемы. Этот опыт, безусловно, заслуживает внимательного изучения и адаптации с учетом национальных особенностей других стран.

Представленные в Таблице 1 примеры наглядно демонстрируют, что интеллектуальные самообучающиеся системы в китайском ВСМ – это не отдельные разрозненные технологии, а элементы единой, глубоко интегрированной экосистемы.

Её основу составляет сквозной поток данных: от тысяч датчиков на подвижном составе и инфраструктуре до централизованных платформ, где искусственный интеллект осуществляет комплексный анализ. Это позволяет перейти от реагирования на уже возникшие проблемы к их прогнозированию и упреждающему устранению, что коренным образом меняет парадигму эксплуатации железных дорог.

Ключевым результатом внедрения таких систем является создание адаптивной и устойчивой транспортной среды. Например, интеграция данных диагностики в реальном времени с системой управления движением позволяет автоматически корректировать скорость поездов в зависимости от текущего состояния пути, обеспечивая безопасность без снижения пропускной способности. Роботизированные комплексы, оснащенные ИИ, не просто заменяют человека на опасных участках, но и непрерывно совершенствуют алгоритмы диагностики, повышая точность выявления дефектов с каждой новой инспекцией.

Таким образом, китайский опыт показывает, что будущее высокоскоростного транспорта лежит в создании «цифрового близнеца» всей отрасли – виртуальной модели, которая постоянно обучается на реальных данных и используется для оптимизации всех процессов, от проектирования до эксплуатации.

Это трансформирует железнодорожный транспорт из традиционной, управляемой человеком системы, в интеллектуальную самоуправляемую инфраструктуру, способную гибко адаптироваться к изменениям и обеспечивать беспрецедентный уровень надежности и эффективности. Сравнение с другими странами (например, Россией) показывает схожесть стратегических направлений, но разницу в масштабах реализации. Китай также активно продвигает свои стандарты (CTCS, 5G-R) на международном уровне.

Таблица 1

Примеры интеллектуальных самообучающихся систем в высокоскоростном железнодорожном транспорте Китая

Область применения	Конкретный пример системы	Принцип работы / Технологии	Эффект / Результат
Диагностика и прогнозирование состояния инфраструктуры	Большая обучаемая модель данных на основе ИИ	Агрегирует данные с тысяч датчиков, BIM-моделей и систем технического зрения. Использует глубокие нейронные сети для прогноза износа.	Автоматически инициирует ремонтные работы на основе прогноза износа (точность до 95% на месяц). Переход от планового к предиктивному обслуживанию.
Управление движением и безопасность	Интеллектуальная система управления поездами (на базе СТС с ИИ)	Алгоритмы ИИ анализируют данные о графике, состоянии пути, энергопотреблении. Компьютерное зрение контролирует «слепые зоны».	Оптимизация графиков, снижение энергопотребления, автоматическое реагирование на аварийные ситуации на путях.
Техническое обслуживание и ремонт	Роботизированные комплексы с тактильными сенсорами и компьютерным зрением	Роботы сканируют узлы подвижного состава, выявляют микротрешины. Данные обрабатываются ИИ для оценки степени износа.	Сокращение времени обслуживания на 40%, повышение точности диагностики на порядок, замена человека на опасных участках.
Проектирование инфраструктуры	Нейросетевая генерация BIM-моделей	ИИ автоматически создаёт и оптимизирует цифровые модели на основе технической документации и данных лазерного сканирования.	Сокращение трудозатрат на проектирование на 85%, улучшение прочностных и аэродинамических характеристик конструкций.
Интегрированная платформа мониторинга	Цифровой двойник железнодорожной инфраструктуры	Объединяет данные стационарных датчиков (10 шт./км), мобильных комплексов (CIT450), БПЛА и спутников (Gaofen) в 3D-модель с точностью до мм.	Возможность автоматической корректировки скоростных режимов поездов в реальном времени в зависимости от состояния инфраструктуры.
Управление пассажиропотоками и сервисом	Система анализа пассажирских потоков на основе больших данных	ИИ обрабатывает данные о бронировании, посадке, перемещениях пассажиров для прогнозирования нагрузок и оптимизации логистики.	Повышение комфорта пассажиров, эффективное распределение ресурсов, автоматизация процессов посадки.

Заключение

Проведенный анализ развития высокоскоростного железнодорожного транспорта в Китае демонстрирует впечатляющий пример того, как системный подход к технологическому развитию может привести к трансформации целой отрасли. Китайский опыт убедительно доказывает, что успех в области высокоскоростных перевозок достигается не через отдельные технологические прорывы, а благодаря комплексной модернизации всех элементов транспортной системы – от подвижного состава до управляемой инфраструктуры. Особую ценность представляет созданная в Китае модель инновационного развития, где фундаментальные исследования, прикладные разработки и промышленное внедрение образуют единый взаимосвязанный цикл, поддерживаемый продуманной государственной политикой и эффективными механизмами финансирования.

Ключевым достижением китайской железнодорожной отрасли стало не просто создание скоростных поездов, а формирование целостной экосистемы, в которой передовые инженерные решения сочетаются с цифровыми технологиями нового поколения. Внедрение искусственного интеллекта, роботизации и предиктивной аналитики переводит высокоскоростной транспорт на качественно новый уровень, превращая его в интеллектуальную самообучающуюся систему. При этом особого внимания заслуживает китайский подход к стандартизации и защите интеллектуальной собственности, который позволяет стране не только осваивать передовые технологии, но и формировать собственные технологические стандарты мирового уровня.

Перспективы дальнейшего развития высокоскоростного железнодорожного транспорта в глобальном масштабе во многом будут определяться тем, насколько успешно другие страны смогут адаптировать и творчески переработать китайский опыт с учетом своих национальных особенностей. Важнейшим уроком является понимание того, что технологическое лидерство достигается не через копирование отдельных решений, а путем выстраивания собственной инновационной системы, объединяющей науку, промышленность и образование. Китайский пример наглядно показывает, что инвестиции в исследования и разработки, подкрепленные долгосрочной стратегией развития, способны превратить железнодорожный транспорт из традиционной отрасли в драйвер технологического прогресса и экономического роста.

Список использованной литературы

1. Zhou, M., Peng, Y., & An, L. (2022). Technical advances, innovation and challenges of developing high-speed rail in China. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1680/jcien.21.00149>
2. Feng, L., & Yu, X. (2018). A Study on the Integration Innovation Mode of China Railway High-Speed (CRH) Technology. Portland International Conference on Management of Engineering and Technology. <https://doi.org/10.23919/PICMET.2018.8481875>
3. Fang, X., Yang, Z., & Lin, F. (2013). Virtual Development Platform of High-Speed Train Traction Drive System in View of Top-Level Goals. Vehicle Power and Propulsion Conference. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2013.6671741>
4. Hao, W. (2012). Development of the High Speed Comprehensive Inspection Train
5. Ji, P. (2023). Head shape design of Chinese 450 km/h high-speed trains based on pedigree feature parameterization. <https://doi.org/10.21606/iasdr.2023.231>
6. Oh, K. T., Yoo, M.-S., Jin, N., Ko, J., Seo, J., Joo, H., & Ko, M. (2022). A Review of Deep Learning Applications for Railway Safety. Applied Sciences. doi: 10.3390/app122010572
7. Liu, J., Liu, G., Wang, Y., & Zhang, W. (2024). Artificial-intelligent-powered safety and efficiency improvement for integrated railway systems. High-speed railway. doi: 10.1016/j.hspr.2024.06.006
8. Liu, J., Liu, G., Wang, Y., & Zhang, W. (2024). Artificial-intelligent-powered safety and efficiency improvement for controlling and scheduling in integrated railway systems. High-speed railway. doi: 10.1016/j.hspr.2024.06.002
9. Yan, Z., Tiantian, W., JingSong, Y., & Guoqin, Z. (2023). Development and engineering application of integrated safety monitoring system for China's high-speed trains. Transportation safety and environment. doi: 10.1093/tse/tdad017

10. Yi, S., Kuang, J., & Liu, R. (2023). Research on Safety Risk Prediction Model of High-Speed Railway Based on Chaotic RBF Neural Network. Journal Article. doi: 10.1109/ishc61216.2023.00025
11. Zihui, Z., Tian, X., & Zhiwei, S. (2023). Deepening Research on the Comprehensive Application and Development of Railway Intelligent Detection and Monitoring System and Key Technologies. Journal Article. <https://doi.org/10.1109/itoec57671.2023.10291609>
12. Zheng, Song, Xu, Lei. (2020). A Fault Diagnosis Method of Bogie Axle Box Bearing Based on Spectrum Whitening Demodulation. Sensors (Basel, Switzerland). doi: 10.3390/s20247155
13. Sai, D. H. (2024). Revolutionizing Railways: An AI-Powered Approach for Enhanced Monitoring and Optimization. Journal Article. doi: 10.55041/ismj01382
14. Miao, Z., Zhang, Q., Lv, Y., Wenzhe, S., & Wang, H. (2018). An AI based High-speed Railway Automatic Train Operation System Analysis and Design. Proceedings Article. doi: 10.1109/ICIRT.2018.8641650
15. Li, X., Zhu, M., Zhang, B., Wang, X., Liu, Z. A., & Han, L. (2024). A review of artificial intelligence applications in high-speed railway systems. High-speed railway. doi: 10.1016/j.hspr.2024.01.002
16. Sai, D. H. (2024). Revolutionizing Railways: An AI-Powered Approach for Enhanced Monitoring and Optimization. Journal Article. doi: 10.55041/ismj01382
17. Zihui, Z., Tian, X., & Zhiwei, S. (2023). Deepening Research on the Comprehensive Application and Development of Railway Intelligent Detection and Monitoring System and Key Technologies. Journal Article. doi: 10.1109/itoec57671.2023.10291609
18. Hong, P. (2017). Intelligent trouble diagnosis method for high-speed rail. Patent.
19. Dubljanin, D., Marković, F., Dimić, G., Vučković, D., Petković, M., & Mosurović, L. (2024). Educational Application of Artificial Intelligence for Diagnosing the State of Railway Tracks. International Journal of Cognitive Research in Science, Engineering and Education.
20. Chien-Kuo Chiu. (2024). AI-Driven railway regulator inspection planning system: enhancing railway safety inspection prioritisation and incident management. HKIE Transactions. <https://doi.org/10.33430/v31n4thie-2024-0012>

УДК 629.067 + 004.89

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ

Бушуев Сергей Валентинович, д.т.н., доцент, проректор по научной работе ФГБОУ ВО Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия, E-mail: SBushuev@usurt.ru

Попов Антон Николаевич, к.т.н., доцент, доцент кафедры Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте ФГБОУ ВО Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия, E-mail: ANPopov@usurt.ru

АННОТАЦИЯ

Статья рассматривает перспективы внедрения беспилотного движения грузовых поездов, выделяя главные трудности и достижения в данной сфере. Отмечено, что несмотря на отдельные успешные проекты, массовые испытания пока невозможны из-за отсутствия единых стандартов оценки качества функционирования систем и процедур сертификации безопасности. Важнейшими проблемами являются обеспечение эффективной коммуникации между автоматизированными и традиционными элементами инфраструктуры, разработка унифицированных протоколов взаимодействия и совершенствование математических моделей движения поездов. Анализируются практические примеры реализации беспилотных систем, такие как параллельное перемещение контейнеров, применение беспилотных маневровых устройств и автоматизация грузовых перевозок. Статья подчеркивает необходимость дальнейшего изучения и разрешения ключевых аспектов безопасности и функциональности беспилотных технологий, которые позволяют расширить масштабы их использования на транспорте.

Ключевые слова: беспилотное движение, грузовые поезда, техническое зрение, определение препятствий, железнодорожный транспорт.

PROSPECTS FOR AUTONOMOUS OPERATION OF FREIGHT TRAINS

Sergei V. Bushuev, Dr.Sc. Eng., Assoc. Prof., Vice-Rector for Research, The Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia, E-mail: SBushuev@usurt.ru

Anton N. Popov, Ph.D., Assoc. Prof., Dept. of Automation, Telemechanics and Communications in Railway Transport, The Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia, E-mail: ANPopov@usurt.ru

ABSTRACT

This paper explores the prospects for adopting autonomous operation of freight trains, focusing on key challenges and advancements in this area. Although particular success stories exist, widespread testing is currently hindered by the lack of unified standards for evaluating system performance quality and safety certification processes. Major issues involve ensuring reliable communication between automated and conventional infrastructure components, establishing standardized interaction protocols, and refining mathematical models of train dynamics. Illustrative case studies cover innovations like parallel container handling, unmanned yard equipment, and freight transport automation. Efforts emphasize resolving critical safety and functional aspects of autonomous technologies to extend their applicability in transportation.

Keywords: autonomous operation, freight trains, machine vision, obstacle detection, rail transport.

Введение

Развитие технологий искусственного интеллекта, в том числе технического зрения, достигло уровня, достаточного для практического применения. Наиболее перспективным видится внедрение технического зрения в транспортной отрасли, особенно для организации беспилотного движения. Однако, уже сегодня очевидно, что широкое использование беспилотных транспортных средств требует решения ряда проблем, в том числе и научных, формулировка и уточнение которых является актуальной задачей, решению которой посвящена данная работа.

В мировой практике железнодорожные системы делятся на открытые и закрытые, а также по уровням автоматизации *GoA* [1]. В РФ ГОСТ Р 70059-2022 «Системы управления и контроля железнодорожного транспорта для перевозок пассажиров в пригородном сообщении» разделяет системы управления и контроля, применяемых для организации безопасных железнодорожных пассажирских перевозок на пять уровней автоматизации: от УА0 до УА4, аналогично уровням *GoA*.

Закрытые системы характеризуются отсутствием транспортных пересечений в одном уровне, однотипностью подвижного состава, периодичностью и постоянством маршрутов и расписания. Препятствия для движения устраняются физической закрытостью системы. Примером закрытой железнодорожной системы является метрополитен.

Открытые железнодорожные системы характеризуются различными типами подвижного состава и широким разбросом параметров поездов, включая пассажирские и грузовые, сложным графиком движения, многочисленными транспортными пересечениями в одном уровне. Препятствия для движения детектируются оператором. Магистральная железнодорожная сеть – пример открытой железнодорожной системы.

В работе [2] железнодорожные системы разделены на автоматические, которые работают в структурированной и предсказуемой среде и автономные – работающие в открытой, неструктурной, динамической среде. Под открытой средой для железнодорожного транспорта понимается часть пути, доступ к которой полностью не защищён и не контролируется. Беспилотные поезда разделены на автономные и автоматические, как работающие в открытой и закрытой среде соответственно. Автономный поезд – это поезд, способный выполнить назначенную полную транспортную миссию от одной железнодорожной станции до другой в открытой железнодорожной системе, он должен быть способен воспринимать, анализировать, принимать решения и действовать автономно, взаимодействуя с открытой окружающей средой.

Решения, позволяющие автоматизировать движение поездов в закрытых системах, применимы лишь частично к автоматизации движения в открытых системах.

На сегодняшний день реализовано несколько проектов по автоматизации открытых железнодорожных сетей.

1. Проекты организации беспилотного движения

Среди решений в области беспилотного движения железнодорожного транспорта следует отметить следующие проекты.

Технология компании *Parallel*, основанной в январе 2020 г, предлагает концепцию, предусматривающую использование беспилотных моторных тележек с тяговыми аккумуляторными батареями для транспортировки стандартных морских контейнеров.

Тележки обеспечивают перемещение контейнеров на расстояние до 800 км без подзарядки. Тележки оборудованы системами управления и машинного зрения для обнаружения препятствий и позиционирования.

Контейнеры опираются непосредственно на тележки, грузоподъемность одной пары тележек составляет 58 т и рассчитаны на движение со скоростью до 100 км/ч. Индивидуальный тяговый привод в каждой тележке позволяет обеспечить остановку на расстоянии прямой видимости – тормозной путь примерно в 10 раз меньше, чем у обычного грузового поезда.

Возможно объединение от 10 до 50 беспилотных рельсовых экипажей при помощи виртуальной сцепки в одну колонну, что способствует уменьшению аэродинамического сопротивления движению и более эффективному использованию пропускной способности железнодорожной инфраструктуры [3, 4].



Рис. 1 – Моторные тележки *Parallel* для перемещения контейнеров [3]

Проект *Autohaul* горнодобывающей компании *Rio Tinto*, объявленный в июне 2019 года успешно завершенным, предусматривает автovedение тяжеловесных поездов с уровнем автоматизации *GoA4* – без машиниста на борту, на железнодорожной сети протяженностью 1700 км. По этой сети осуществляется перевозка железной руды из 16 шахт в 4 терминала двух портов на западном побережье Австралии. На сети курсирует до 50 беспилотных поездов длиной 2,4 км, массой 28 тыс.т., каждый поезд включает в себя 240 вагонов и от двух до трех локомотивов. Каждый поезд оборачивается в среднем за 40 часов, включая время погрузки и выгрузки, преодолевая в среднем расстояние 800 км. Погрузка и разгрузка выполняется в автоматическом режиме, ручное управление с участием машиниста используется только при следовании по территории порта [5-7].

Робот *VLEX* на комбинированном ходу, разработанный компанией *Volert*, предназначен для выполнения маневровых работ с составом массой до 600 т, со скоростью до 6 км/ч. Робот имеет полный привод с четырьмя колёсами с электродвигателями постоянного тока мощностью до 12,5 кВт. Электропитание осуществляется от аккумулятора.



Рис. 2 – Маневровые работы с помощью робота *VLEX* [8]

В рамках программы цифровизации железных дорог Германии Digitale Schiene Deutschland (DSD) по проекту AutomatedTrain [9] переоборудовано три моторвагонных пассажирских поезда Alstom BR 430 для беспилотного движения, которые в автоматическом режиме осуществляют трогание с места, разгон, торможение и остановку. Поезда эксплуатируются на одной линии совместно с поездами, управляемыми машинистами [10].

Отечественный опыт организации беспилотного движения грузовых поездов представлен проектами беспилотных маневровых локомотивов на станции Лужская и беспилотного электропоезда ласточка.

На станции Лужская в 2015 году стартовал проект по автоматизации движения маневровых локомотивов. В ноябре 2017 года на локомотивы установили первый прототип системы технического зрения на маневровые локомотивы, состоящий из радаров, лидара и камер.

Впервые беспилотный электропоезд «Ласточка» представлен в августе 2019 года, демонстрация состоялась на испытательном кольце в Щербинке. В 2024 году беспилотная ласточка принята в эксплуатацию на Московском центральном кольце. Движение поезда осуществляется в беспилотном режиме, но машинист находится в кабине для контроля, а также открывает и закрывает двери (уровень автоматизации GoA3) [11].

Таким образом, беспилотное движение поездов представлено единичными проектами, широко не тиражируемыми на сетях железных дорог. Скорость развития беспилотного движения поездов связано с количеством и качеством получаемых от него эффектов, от соотношения затрат на организацию беспилотного движения и получаемых выгод.

2. Эффективность внедрения движения беспилотных поездов

В работе [12] показано, что эффективность проектов беспилотного движения может определяться по отношению к превращению открытого участка железной дороги в закрытый для механического исключения возможных препятствий движению поездов. Показано, что эффект от беспилотного движения увеличивается с ростом протяженности участка. Однако, эффекты от беспилотного движения не ограничиваются лишь возможностью обнаружения препятствий.

Все имеющиеся эффекты от беспилотного движения можно разделить на две группы: новые эффекты, которые могут быть получены только за счет беспилотного движения, а также улучшение показателей для имеющихся эффектов.

Новые эффекты, связанные с исключением человека из кабины локомотива:

- Уменьшение габаритов и массы транспортных средств из-за возможностей для изменения конструкций в результате пересмотра требований к конструкции подвижного состава;
- Изменение технологии управления за счет появления возможностей эксплуатации транспортных средств в условиях, недопустимых или нежелательных для нахождения человека, а также исключения физиологических возможностей человеческого организма из числа факторов, ограничивающих продолжительность безостановочного движения транспортных средств.

Улучшение существующих эффектов:

- Высвобождение трудовых ресурсов, требуемых для перемещения грузов и пассажиров;
- Повышение пропускной способности транспортной инфраструктуры за счет воздействия имеющихся резервов, в результате увеличения скорости и точности принятия решений, выполнения технологических операций за счет учета большего количества влияющих факторов;
- Повышение безопасности транспортных операций вследствие более высокой чувствительности датчиков по сравнению с органами чувств человека;
- Улучшение условий труда, снижение вредных и опасных факторов.

3. Проблемы внедрения беспилотного движения на железнодорожном транспорте

Кроме того, широкое внедрение беспилотного транспорта предполагает решения ряда научных проблем.

3.1 Реакция беспилотного поезда на обнаруженное препятствие

Наиболее значимая проблема массового внедрения беспилотных поездов, в том числе и грузовых – отсутствие общепринятого порядка действий (реакции) системы управления автономного поезда при обнаружении препятствия.

Основной функцией автономной бортовой системы технического зрения является обнаружение и классификация объектов на определенном расстоянии для предотвращения столкновений и определения потенциально опасных ситуаций во время движения поезда. Объекты, представляющие опасность для движения, находятся на рельсах или в габарите приближения. Поэтому автономная бортовая система должна включать функции:

- Обнаружения рельсов;
- Обнаружения объектов на рельсах и в габарите приближения;
- Оценки расстояния между обнаруженным объектом и поездом [13].

В работе [14] функции системы управления автономным поездом расширены: обнаружение препятствий, оценка расстояния, определение области интереса (ROI – Region Of Interest), прогнозирование траектории движения препятствия, распознавания намерений пешеходов.

Препятствиями в открытой среде, кроме железнодорожного подвижного состава и тупиковых упоров, могут быть люди, автомобили, крупные животные, деревья, камни, неправильно установленные тормозные колодки, наводнения, пожары и т.п. Препятствия могут не только появляться на земле, но и висеть на контактной сети или парить в воздухе. Искривления и выбросы рельсов, нарушения их целостности, разрушение балластной призмы, обрывы и повреждения контактных проводов. Обобщая, препятствие для движения железнодорожного подвижного состава, можно определить как объект, требующий реакции (остановки или снижения скорости) системы управления, не предусмотренной графиком движения.

Авторы работ [12, 14, 15] отмечают отсутствие общепризнанных метрик производительности технических систем в части обнаружения препятствий. Показано, что производительность систем следует определять, основываясь на производительности машиниста. Предлагаются непрерывные метрики для определения производительности:

- Расстояние до препятствия в момент его обнаружения;
- Время до препятствия в момент его обнаружения;
- Время реакции, то есть разница между временем появления препятствия и временем его обнаружения.

Эталонных значений для оценки расстояния и определения железнодорожного пути человеком не существует. Получены только некоторые значения для эффективности обнаружения препятствий. Обобщенные результаты приводятся в работе [14], машинист способен заметить объекты на расстоянии не более 750 м в зависимости от их размера, формы, цвета, контрастности с окружающей средой. Кроме того, способность обнаруживать объекты снижается с увеличением скорости движения.

Ввиду непрерывной работы технического зрения при движении поезда предпочтительнее определять долю объектов, обнаруженных на некотором приемлемом расстоянии, чем количественные значения обнаруженных препятствий. Обсуждается противоречие между приемлемым расстоянием для обнаружения определенной доли объектов и допустимым числом ложного включения торможения.

Результаты исследований возможностей систем технического зрения по определению препятствий и прогнозированию столкновений содержатся в работах [16-20].

Необходимость обнаружения препятствий автономными поездами не ограничивается визуальным каналом, необходимо обнаруживать возникновение физического контакта

поезда с различными объектами, а также различные звуковые сигналы [21]. Однако, данное направление – обеспечение мультимодальности систем управления автономными поездами находится на начальной стадии исследований.

Важно не только обнаружить объект, но и правильно отреагировать на его появление – снизить скорость до необходимой величины или выполнить полную остановку до препятствия. Тормозной путь грузовых поездов может составлять несколько километров, что не позволяет гарантировать полной остановки. Согласно исследованию [22], выполненном на основе статистического анализа данных о несчастных случаях из нераскрытоого европейского региона с января 2022 года по январь 2024 года, машинисты могут избежать около 28,43% (95% доверительный интервал между 15,70% и 39,80%) столкновений в условиях хорошей видимости, только 11,81% можно было бы избежать при любой видимости.

Аварийная ситуация может возникнуть не только из-за медленной реакции и неправильных действий машиниста, либо автономной системы управления, возможность предотвращения аварии определяется соотношением расстояния (времени) до препятствия и инерционностью процесса остановки поезда.

Особая роль изучения соотношений между моментом определения препятствия и тормозным путем поезда при беспилотном движении подчеркивается в работах [23-25]. Длинный тормозной путь обычно позволяет лишь уменьшить ущерб, а не предотвратить столкновения [26].

Основными направлениями решения проблемы реакции на появление препятствия видятся – сокращение тормозных путей грузовых поездов и увеличение расстояния обнаружения препятствия.

Сокращение тормозных путей для существующих способов торможения возможно за счет уменьшения массы грузовых поездов на основе новых подходов к их формированию. Например, поезда из моторных тележек, рассмотренных в разделе 1 данной работы или аналогичный подвижной состав, либо решения с локомотивами облегченной конструкции. Сокращение тормозного пути менее расстояния обнаружения препятствий системой технического зрения позволит обеспечить своевременную остановку.

Другое решение – увеличение расстояния, на котором определяются препятствия. Концепция системы SMART2, представленная в работе [27], включает три типа подсистем обнаружения: бортовые, путевые и установленные на дроны. Все три подсистемы интегрированы в целостную систему обнаружения препятствий и несанкционированного доступа и объединены с различными железнодорожными системами, что позволяет полностью контролировать участок движения поездов.

В работе [28] приведено описание отечественного стационарного комплекса обнаружения препятствий (СКОП) для контроля зон ограниченной видимости.

В целом, несмотря на наличие путей решений и проработку отдельных вопросов, требования к реакции автономного поезда на обнаруженные препятствия в рассмотренных работах окончательно не сформулированы.

3.2 Взаимодействие беспилотных поездов с существующей инфраструктурой и подвижным составом

Внедрение беспилотного движения требует решения вопросов обеспечения интероперабельности существующего подвижного состава и инфраструктуры с беспилотными поездами, а также беспилотных поездов между собой. Под интероперабельностью понимается способность нескольких информационных систем или компонентов к обмену информацией и использованию информации, полученной в результате обмена. Интероперабельность – свойство различных компонентов системы беспрепятственно обмениваться информацией между собой, правильно интерпретировать полученную информацию и эффективно ее использовать для решения целевых задач [29].

В существующих железнодорожных системах обмен, интерпретация и эффективное использование информации возложены на машиниста. При широком внедрении беспилотного движения потребуется решение вопросов интероперабельности. Существующая модель интероперабельности, представленная в стандарте ГОСТ 55062 «Информационные технологии (ИТ). Системы промышленной автоматизации и их интеграция. Интероперабельность. Основные положения» предполагает взаимодействие информационных систем формализуется на трех иерархических уровнях:

- Техническом (способность к обмену данными между участвующими в обмене системами с использованием технических средств);
- Семантическом (способность взаимодействующих систем одинаковым образом интерпретировать смысл информации, которой они обмениваются);
- Организационном (совместимость или совместность целей, а также единство или эквивалентность нормативно-правовой базы, регламентирующей процессы информационного взаимодействия) [29].

Для решения задач технического уровня обеспечения интероперабельности особую актуальность представляют каналы и системы цифровой связи. Задачи семантического уровня предполагают одинаковую интерпретацию передаваемой информации, в том числе системами искусственного интеллекта и технического зрения. Задачи организационного уровня – согласование по целям беспилотного подвижного состава с железнодорожной инфраструктурой и с подвижными единицами под управлением машиниста.

На техническом уровне основной принцип взаимодействия бортовой и стационарной аппаратуры управления движением поездов на железных дорогах РФ – передача сигналов через рельсы. На основе этого принципа функционируют системы автоматической локомотивной сигнализации (АЛС) и система автоматического управления торможением (САУТ). Организация движения автономных поездов требует двухстороннего канала передачи информации (не только к локомотиву, но и от локомотива на объекты инфраструктуры), для обеспечения непрерывного взаимодействия с открытой средой не только за счет системы технического зрения. Единственная возможность обеспечить двунаправленную передачу между локомотивным оборудованием и стационарными объектами – применение радиоканала.

Семантический уровень интероперабельности требует обеспечения возможности правильной интерпретации данных и команд от машинистов подвижного состава, объектов инфраструктуры и информационно-управляющих систем, что можно обеспечить путем разработки стандартизованных протоколов и автоматических алгоритмов управления движения.

Организационный уровень не реализуем без корректировки существующей и разработки новой нормативной документации для подвижного состава и систем инфраструктуры, управляемых человеком.

3.3 Стандартизация и сертификация автономных поездов

Представляет интерес вопрос отсутствия методов сертификации безопасности беспилотных систем поездов по причине слабой верифицируемости и отсутствия строгих методов доказательства безопасности систем искусственного интеллекта, в том числе технического зрения [30]. На текущий момент концепция обеспечения безопасности состоит в комплексном подходе к безопасности, взаимодействии подсистем, основанных на разных принципах. Развиваются новые направления:

- XAI (explainable artificial intelligence) – объяснимый или интерпретируемый искусственный интеллект;
- Контролируемые нейронные сети;
- Метод многопараметрической или векторной оптимизации обучения глубоких сверточных сетей [31, 32].

Для широкого внедрения технологии беспилотного движения отмечается необходимость построения цифровой модели пути [33, 34], а также цифровых полигонов и моделей для тестирования беспилотных систем [35-37].

Стандартизация систем технического зрения требует наличия открытых эталонных наборов данных для обучения и подтверждения правильности функционирования систем. В источниках описано несколько существующих наборов данных RailSem19, FRSign, RAWPED, Rail-DB, RailSet, GERALD, OSDaR23 – отображающих зарубежную инфраструктуру. Набор RailDataSets состоит из изображений небольшого участка пути с российских железных дорог [38]. Сформированный набор данных авторами работы [38] не доступен открыто.

Кроме того, для массового внедрения автономных поездов требуется разработка новых и адаптация существующих математических моделей движения и взаимодействия поездов, а также методов и алгоритмов на основе таких моделей. В основе алгоритмов работы систем железнодорожной автоматики используются методы дискретной математики, бортовых комплексов – методы теории автоматического управления, каналов взаимодействия – методы теории случайных процессов. Широкое внедрение беспилотного движения в практику требует объединения цифровых и аналоговых компонентов, интеграцию вычислений и абстрактных моделей с физическими процессами в единую систему, что невозможно без специального математического аппарата.

Заключение

На сегодняшний день, беспилотное движение поездов представлено единичными проектами, широко не тиражируемыми на сетях железных дорог. Широкое внедрение беспилотного транспорта предполагает решения ряда проблем:

- Сомнения в наличии и величине положительных эффектов от внедрения беспилотного движения;
- Отсутствие общепризнанных метрик и показателей оценки производительности систем технического зрения для определения препятствий;
- Отсутствие требований к реакции автономного поезда на обнаруженное препятствие;
- Сложность верификации и доказательства безопасности систем на основе искусственного интеллекта;
- Недостаточная обеспеченность цифровыми моделями пути и цифровыми испытательными полигонами;
- Нерешенность вопросов интероперабельности – способности информационных систем беспилотного подвижного состава к обмену информацией и использованию информации, полученной в результате обмена с подвижным составом, управляемым машинистом и информационными системами инфраструктуры;
- Недостаточная разработанность математических моделей движения и взаимодействия поездов, а также методов и алгоритмов на основе таких моделей.

Список использованной литературы

1. R. C. Ramírez, I. Adin, J. Goya, U. Alvarado, A. Brazalez and J. Mendizabal, “Freight Train in the Age of Self-Driving Vehicles. A Taxonomy Review,” in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 9750-9762, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3144602.
2. D. Trentesaux et al., “The Autonomous Train,” in *2018 13th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE)*, Paris, France, 2018, pp. 514-520, doi: 10.1109/SYSoSE.2018.8428771.
3. Сайт компании Parallel. Электронный ресурс. URL: <https://www.moveparallel.com> (дата обращения: 03.09.2025).
4. Ефремов, А. Беспилотные рельсовые экипажи для контейнерных перевозок / А. Ефремов // Железные дороги мира. – 2022. – № 3. – С. 57-59.
5. Ефремов, А. Беспилотные тяжеловесные поезда на сети компании Rio Tinto в Австралии / А. Ефремов // Железные дороги мира. – 2020. – №1. – С. 61-66.
6. Презентация системы AutoHaul. Электронный ресурс. URL: <https://social-innovation.hitachi/-/media/project/hitachi/sib/en-au/events/pdf/Roslyn-Stuart-slide.pdf> (дата обращения: 01.09.2025).
7. M. Yusuf, A. MacDonald, R. Stuart, and H. Miyazaki, “Heavy haul freight transportation system: AutoHaul – Autonomous heavy haul freight train achieved in Australia,” *Hitachi Review*, vol. 69, no. 6, pp. 790-791, 2020.
8. Сайт компании Volert. Электронный ресурс. URL: <https://www.vlex-robot.de/ru/novyi-vlex-robot> (дата обращения: 03.09.2025).
9. Сайт проекта Digitale Schiene Deutschland. Электронный ресурс. URL: <https://digitale-schiene-deutschland.de/en/projects/AutomatedTrain> (дата обращения: 26.09.2025).

10. D. Spenneberg, M. Bauer, M. Ghee, and S. Krönke, “Teststrategie zur Vermeidung von Feldtests bei der Entwicklung vollautomatisiert fahrender Züge,” *SIGNAL+DRAHT*, № 11, pp. 67-76, 2024.
11. Попов, П. А. Применение передовых технологий для работы в автоматическом режиме на МЦК / П. А. Попов // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 11. – С. 17-21.
12. R. Tagiew, T. Buder, and M. Fietze, “Überblick zur fahrzeugseitigen Kollisionsvorhersage für Eisenbahnen,” *ZEVrail*, № 174, pp. 122-127, 2023.
13. D. Ristić-Durrant, M. Franke, and K. Michels, “A Review of Vision-Based On-Board Obstacle Detection and Distance Estimation in Railways,” *Sensors*, vol. 21, no. 10, p. 3452, 2021, doi: 10.3390/s21103452.
14. R. Tagiew and C. Klotz, “Performance Metric for Horn and Brake Automation on Mainline Trains,” in *Proceedings of the 10th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems - VEHITS*, 2024, pp. 212-219, doi: 10.5220/0012553100003702.
15. R. Tagiew, T. Buder, K. Hofmann, C. Klotz, and R. Tilly, “Towards Nucleation of GoA3+ Approval Process,” in *Proceedings of the 2021 5th High Performance Computing and Cluster Technologies Conference (HPCCT '21)*, New York, NY, USA, 2021, pp. 41–47, doi: 10.1145/3497737.3497742.
16. Попов, П. А. Переход к беспилотным поездам: текущие вызовы и пути решения / П. А. Попов, С. В. Кудряшов // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 11. – С. 18-20.
17. Попов, П. А. Требования к системе технического зрения / П. А. Попов, С. В. Кудряшов // Железнодорожный транспорт. – 2024. – № 7. – С. 33-35.
18. R. Nakasone, N. Nagamine, M. Ukai, H. Mukojima, and D. Deguchi, “Frontal Obstacle Detection Using Background Subtraction and Frame Registration,” *Quarterly Report of RTRI*, vol. 58, no. 4, pp. 298-302, 2017, doi: 10.2219/rtriqr.58.4_298.
19. W. Zhangyu, Y. Guizhen, W. Xinkai, L. Haoran and L. Da, “A Camera and LiDAR Data Fusion Method for Railway Object Detection,” in *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 12, pp. 13442-13454, 15 June 15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3066714.
20. R. Tagiew, D. Leinhos, H. von der Haar et al., “Sensor system for development of perception systems for ATO,” *Discov Artif Intell*, vol. 3, p. 22, 2023, doi: 10.1007/s44163-023-00066-4.
21. T. Herrmann, B. Noethlichs, M. Schischkoff, T. Hanisch, D. Lauer, M. Koppel, and K. U. Wolter, “Auf dem Weg zum vollautomatischen Fahren—ein erstes Forschungsprojekt zur Erkennung von Überfahreignissen,” *ZEVrail*, vol. 03, no. 2, 2023.
22. O. Lahneche, A. Haag, P. Dendorfer, V. Aravantinos, M. Guilbert, and M. Sallak, “Analysing railway accidents : a statistical approach to evaluating human performance in obstacle detection,” in *Proceedings of the Sixth International Conference on Railway Technology : Research, Development and Maintenance*, 2024.
23. Баранов, Л. А. Обеспечение безопасности движения поездов в беспилотных транспортных системах / Л. А. Баранов // *XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. Сборник трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019*. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. – С. 1995-1999.
24. Баранов, Л.А. Погрешности измерения расстояния до препятствия средствами технического зрения и прогноза пути торможения в беспилотных системах управления движением поездов / Баранов Л. А., Бестемьянов П. Ф., Балакина Е. П., Охотников А. Л. // Мир транспорта. – 2021. – Т. 19. – № 6 (97). – С. 6-12.
25. Попов, П. А. Сопоставление возможностей человека и машины в восприятии окружающего мира / Попов П. А., Дащенок В. Л. // Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 8. – С. 44-46.
26. R. Tagiew, T. Buder, K. Hofmann, and C. Klotz, “Risikoanalyse der Schnellbremsung bei frontaler Kollisionsgefahr,” *Elektrische Bahnen*, № 6-7, 2022.
27. Hyde P, Ulianov C, Liu J, Banic M, Simonovic M, Ristic-Durrant D. “Use cases for obstacle detection and track intrusion detection systems in the context of new generation of railway traffic management systems,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 236, no. 2, pp. 149-158, 2021, doi:10.1177/09544097211041020.
28. Попов, П.А. Инфраструктура для внедрения систем автоматического управления электропоездами / Попов П.А. // Железнодорожный транспорт. – 2022. – № 10. – С. 20-23.
29. Макаренко, С. И. Интероперабельность организационно-технических систем. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2024. – 313 с.

30. Розенберг, Е.Н. Общие подходы к доказательству безопасности автономных систем / Е. Н. Розенберг, П. А. Попов, Д. В. Талалаев, А. М. Ольшанский, Н. А. Бояринова // *Автоматика, связь, информатика.* – 2022. – № 1. – С. 2-9.
 31. Розенберг, Е. Н. О применении нейронных сетей в ответственных системах / Е. Н. Розенберг, Д. В. Талалаев // *Интеллектуальные транспортные системы. материалы Международной научно-практической конференции.* – Москва, 2022. – С. 451-453.
 32. Шебе, Х. Различные подходы к автономному вождению для железных дорог / Х. Шебе, И. Б. Шубинский, Е. Н. Розенберг // *Надежность.* – 2025. – Т. 25. – № 1. – С. 4-10.
 33. Якушев, Д.А. Цифровая модель пути для беспилотного управления движением поездов / Д. А. Якушев // *Автоматика, связь, информатика.* – 2021. – № 4. – С. 35-39.
 34. Иванов, В.Ф. Высокоточная система позиционирования железнодорожного подвижного состава / В. Ф. Иванов, П. А. Попов // *Труды АО «НИИАС». Сборник статей.* – Москва, 2021. – С. 179-189.
 35. B. Thomas-Friedrich, E. Bosch, B. Cogan, H. Wasle, and A. Naumann, “Menschliche Wahrnehmung als Maßstab für zukünftige ATO-Systeme,” *EI-DEREISENBAHNINGENIEUR*, № 09, pp. 62-66, 2023.
 36. B. Milius, B. Cogan, B. Thomas-Friedrich, H. L. Esther Bosch, U. Metzger, and D. Leinhos, “Funktionale Anforderungen an Sensorik und Logik einer ATO-Einheit,” Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsorschung beim Eisenbahn-Bundesamt, 2024. [Электронный ресурс]. DOI: 10.48755/dzsf.250002.01.
 37. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), “RailSiTe® (Rail Simulation and Testing),” *Journal of large-scale research facilities*, vol. 2, p. A88, 2016, doi: 10.17815/jlsrf-2-144.
 38. Федоров В. А. Сегментация объектов техническим зрением в автоматизированных системах управления железнодорожным подвижным составом / В. А. Федоров, О. М. Огородникова // *Автоматика на транспорте.* – 2025. – Том 11. – № 3. – С. 239-249.
-

УДК 656.212.5. 004.896

ЦИФРОВАЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНАЯ СТАНЦИЯ: ПРИМЕР ФОРМАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА ПРИЕМА ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА

Бушуев Сергей Валентинович, д.т.н., доцент, проректор по научной работе ФГБОУ ВО Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия, Email: SBushuev@usurt.ru

Костров Александр Анатольевич, заведующий лабораторией систем железнодорожной автоматики и телемеханики ЧИПС – филиал ФГБОУ ВО Уральский государственный университет путей сообщения, Челябинск, Россия, Email: AKostrov@usurt.ru

Ольгейзер Иван Александрович, к.т.н., доцент, первый заместитель директора Ростовского филиала АО «НИИАС», Ростовский Государственный университет путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия, Email: i.olgeizer@vniias.ru

АННОТАЦИЯ

Статья рассматривает прием грузового поезда на Цифровую железнодорожную станцию (ЦЖС), проект которой реализуется на Южно-Уральской железной дороге с 2018 года и включает в себя создание модульной структуры, обеспечивающей взаимодействие различных подсистем в режиме реального времени. Одним из элементов ЦЖС является система автоматического приема и диагностики подвижного состава, позволяющая формировать цифровую модель поезда и принимать решения о его маршруте на основе результатов осмотра. При прибытии поезда на станцию проводится последовательная цепочка технологических операций. Выбор каждой последующей операции зависит от результатов выполнения предыдущих, поэтому при проектировании современных станционных систем железнодорожной автоматики могут применяться последовательностные автоматы, в том числе модели автоматов Мили и Мура. Применение теории автоматов при синтезе микропроцессорных станционных систем ж.д. автоматики в эпоху их бурного развития позволило выявлять узкие места с обеспечением безопасности систем и оптимизировать их структуру. Поэтому для исследования модели цифровой железнодорожной станции предлагается формализовать описание в нотации конечных автоматов с целью оптимизации взаимосвязей модулей ЦЖС, и в конечном итоге повысить эффективность работы станции. В качестве входного алфавита можно использовать события (сигналы) систем автоматики и диагностики, внутренние состояния отражают этапы выполнения технологического процесса. Выходной алфавит – возможные решения по управлению станцией, которые реализуются путем передачи информации в соответствующие программно-аппаратные комплексы и модули ЦЖС.

Ключевые слова: цифровая железнодорожная станция, структура, представление алгоритмов, последовательностные автоматы.

DIGITAL RAILWAY STATION: AN EXAMPLE OF FORMALIZING A FREIGHT TRAIN ARRIVAL ALGORITHM

Sergey V. Bushuev, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Research, The Ural State University of Railway Transport, Yekaterinburg, Russia, Email: SBushuev@usurt.ru.

Alexander A. Kostrov, Head of the laboratory of railway automation and telemechanics systems at the Chelyabinsk Institute of Railway Transport, a branch of the Ural State University of Railway Transport, Chelyabinsk, Russia, Email: AKostrov@usurt.ru

Ivan A. Olgeizer, Ph.D., Associate Professor, First Deputy Director of the Rostov Branch, JSC «NIIAS», Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, Russia, Email: i.olgeizer@vniias.ru

ABSTRACT

The article examines the reception of a freight train at a Digital Railway Station (DRS), a project being implemented on the South Urals Railway since 2018. The project entails developing a modular structure facilitating real-time interaction between various subsystems. Among the components of the DRS is an Automatic Vehicle Inspection System (AVIS), which builds a digital model of the train and decides its route based on inspection findings. When a train arrives at the

station, a sequential chain of technological operations is carried out. The choice of each subsequent operation depends on the results of prior steps. Therefore, when designing modern railway station automation systems, sequential finite state machines (SFSM), particularly Mealy and Moore models, can be effectively applied. Utilizing automaton theory in synthesizing microprocessor-based railway station automation systems has enabled identification of bottlenecks while ensuring system safety and structural optimization. Consequently, to investigate the DRS model, it is recommended to formalize its description using finite state machine notation aiming to optimize interactions between DRS modules and ultimately improve station efficiency. The input alphabet may encompass events (signals) from diagnostic and control systems, while internal states reflect stages of the operational process. The output alphabet represents potential decisions regarding station management, realized by transmitting information to respective hardware and software complexes and DRS modules.

Keywords: digital railway station, structure, algorithm representation, sequential automata.

Введение

Современные микроэлектронные системы железнодорожной автоматики выполняют целый ряд важных функций, основными из которых являются: управление поездными и маневровыми передвижениями, а также обеспечение безопасности при производстве этих передвижений. С развитием систем автоматики, из-за увеличения скоростей и интенсивности движения возрастают и требования к данным системам [1].

Актуальность исследования определяется важностью и перспективной развития на сети дорог проекта «Цифровая железнодорожная станция» – одного из пилотных проектов, объединяющего в себе самые современные системы железнодорожной автоматики и телемеханики. Реализация данного проекта была начата в 2018 году на полигоне Южно-Уральской железной дороги на сортировочной станции Челябинск-Главный, и продолжается в настоящее время. Основной задачей в рамках цифровой трансформации является увеличения пропускной способности станции, оптимизация технологических операций, переход от автоматизированного к автоматическому управлению с постепенной оптимизацией штата работников станции и выводом их из опасной зоны [2].

Для упрощения вопросов проектирования, внедрения, отладки и дальнейшего масштабирования систем автоматики, ЦЖС имеет модульную структуру. Каждый программно-аппаратный комплекс отвечает за конкретные технологические операции в рамках всей станции. ПАКи увязываются между собой для передачи информации в режиме реального времени. Размещение аппаратных комплексов на плане станции соответствует последовательности технологических операций над поездом [3].

При проектировании модулей цифровой станции, особое внимание уделяется вопросам синтеза цифровых моделей устройств и систем железнодорожной автоматики, исключающих опасные отказы с целью повышения безопасности движения поездов и более четкой организации перевозочного процесса [4].

Новизна подхода к исследованию заключается в применении конечных автоматов для формализации описания технологических операций и алгоритмов ЦЖС. Конечные автоматы эффективно применялись при синтезе релейных и микропроцессорных станционных систем, обеспечивая выявление узких мест с точки зрения безопасности, создания самопроверяемых схем, оптимизации структуры системы. Поэтому применение этой теории может позволить формализовать процессы, оптимизировать взаимосвязь модулей ЦЖС, и в перспективе повысить эффективность работы станции, что определяет актуальность исследования.

1. Состояние проблемы

Работа цифровой железнодорожной станции по приему поезда начинается задолго до появления его на участке приближения. Так, за 40-50 км, на подходах к ЦЖС, оборудуются интегрированные посты автоматизированного приема и диагностики подвижного состава на сортировочных станциях (ППСС). В составе которых используется функционал машинного

зрения, лазерного 3D сканирования, тензометрии и дистанционного считывания информации [5]. При проследовании поезда через ППСС, формируется его цифровая модель, в которой учитывается очередность вагонов в поезде (их нумерация).

По итогам коммерческого осмотра груза и технического осмотра каждого конкретного вагона в поезде, ему может быть присвоено одно из следующих состояний: все вагоны поезда исправны, в поезде есть вагон с коммерческой неисправностью, в поезде есть вагон с технической неисправностью, в поезде есть вагоны с коммерческой и технической неисправностью. В зависимости от наличия или отсутствия неисправных вагонов в составе поезда, принимается решение о постановке поезда на конкретный путь парка приема станции. Кроме того, на основе этих данных могут подаваться команды в системы оповещения оперативного персонала из числа дежурных работников вагонного хозяйства (для осмотра вагонов с выявленными техническими неисправностями) и хозяйства движения (для осмотра вагонов с выявленными коммерческими неисправностями груза).

В этом случае поезд должен проследовать на один из предназначенных для этого путей парка приема, с целью оперативного осмотра вагона работником вагонного хозяйства.

После проследования поездом ППСС, на основе данных о вагонах в нем, ЦЖС может определять путь приема поезда, в автоматическом режиме готовить маршрут приема и открывать входной светофор для прибывающего поезда. По прибытию поезда в парк приема над ним производят последовательную цепочку технологических операций:

- Прибытие поезда на целевой путь парка приема;
- Закрепление состава до момента выезда локомотива;
- Выезд локомотива;
- Ограждение пути;
- Технический осмотр поезда (реализован не в полной мере);
- Коммерческий осмотр поезда;
- Снятие ограждения пути;
- Заезд маневрового локомотива;
- Снятие закрепления состава;
- Надвиг состава на горб сортировочной горки.

Каждая последующая операция может начинаться только в тот момент, когда предыдущая операция полностью завершена и в ЦЖС получен сигнал от напольных устройств или от работников станции (там, где оперативные работники остаются в технологическом процессе) об ее успешном завершении. Для обеспечения безопасности может предусматриваться дублирование сигналов о завершении очередной операции, с их передачей по различным каналам связи от независимых друг от друга напольных устройств автоматики.

На сортировочной станции в каждый момент времени реализуются десятки технологических процессов и операций. Одновременно с процессом приема одного поезда, происходит процесс осмотра другого поезда и роспуска третьего поезда. Каждый поезд, находящийся на станции (от момента прохода ППСС до момента отправления со станции после процесса расформирования) создает свой собственный экземпляр технологического процесса на станции. Поэтому каждая технологическая операция с каждым конкретным поездом переводит экземпляр технологического процесса обработки данного поезда из одного состояния в другое и количество этих состояний конечно, что создает предпосылки для применения теории конечных автоматов для определения характеристик работы и оптимизации структуры взаимодействия модулей ЦЖС.

В процессе прибытия поезда на целевой путь парка приема, необходимо точно спозиционировать местоположение локомотива и первого вагона для остановки поезда в заранее определенном месте и его автоматизированного закрепления. Для этого может использоваться, комплекс «Прицел», который предполагает установку путевых датчиков прохода осей для фиксации прохода локомотива и первого вагона прибывающего поезда. Комплекс «Прицел» определяет и контролирует положение подвижного состава, а также подает команду на закрепление системами УТС и ДУЗС и контролирует положение устройств закрепления [6].

При этом информация о месте остановки локомотива может подаваться автоматически по каналам автоматической локомотивной сигнализации с последующей обработкой этого сигнала локомотивными устройствами безопасности. Другой возможный способ остановки локомотива – установка видимого сигнала на пути парка приема, с информацией о расстоянии до места остановки поезда [7].

После постановки поезда на целевой путь парка приема, необходима передача команд на системы закрепления и заграждения с целью надежной фиксации состава на пути с момента отцепки локомотива. В зависимости от уклона пути и массы состава могут быть применены разные устройства закрепления, среди которых: УТС, ДУЗС и ЗУБР и их комбинации.

Применение таких устройств и переход к автоматизированному закреплению составов повышает безопасность и сокращает время операций на путях парка приема, а также обеспечивает вывод работников из опасной зоны [8].

При дальнейшем роспуске отцепов с сортировочной горки, ЦЖС может автоматически определять целевой путь для каждого отцепа, на основании множества входных данных. При этом целевой путь для отцепа может изменяться до момента его роспуска с сортировочной горки. В каждом такте работы станции на основе множества входных данных, выбираются наиболее оптимальные условия для эффективного пропуска и переработки составов через ЦЖС. В сортировочном парке отцепы должны закреплять, для исключения выхода их за пределы полезной длины пути. С целью автоматизации этого процесса и исключения человека из этого технологического процесса на ЦЖС внедряются балочные заграждающие устройства и аппаратура их контроля и управления [9].

2. Методы исследования

На этапах разработки и доказательства безопасности тиражируемых систем железнодорожной автоматики (электрической централизации и автоблокировки) применяются модели последовательностных автоматов, в том числе модели автоматов Мили и Мура. Независимо от элементной базы представленной системы автоматики, язык конечных автоматов можно считать универсальным, т.к. множество событий на станции, представляющих собой технологические ситуации, могут быть описаны регулярными выражениями. При возникновении отказов, автомат переходит в состояние отличное, от того, в которое он должен перейти при исправной работе всех устройств.

Представление модели ЦЖС в целом, а также ее отдельных модулей, систем и подсистем, в качестве последовательностных автоматов с памятью может быть полезна для дальнейшего развития проекта, как дополнительный способ анализа, синтеза и оптимизации алгоритмов. Состояние автомата в каждый конкретный момент времени зависит не только от входного сигнала, но и от того, какая последовательность входных сигналов поступала в предшествующие моменты времени. Под тактом работы такого автомата понимается отрезок времени, в течение которого не изменялось значение внутренних и внешних сигналов (состояние устройств автоматики на станции: занятость участков пути, положение стрелочных переводов и показания станционных светофоров и др.).

Это позволит рассмотреть ЦЖС, как единую логическую структуру, а каждый ее модуль, как элемент с определенным набором входных и выходных воздействий, оптимизировать ее структуру, рассмотреть все возможные сценарии, которые могут возникать в результате работы, а также определить наилучшие варианты обмена передаваемой информации между модулями и комплексами задач.

В соответствии с Концепцией цифровой железнодорожной станции, можно рассматривать четыре уровня передачи информации на станции [10]:

- Уровень топологии: цифровая модель путевого развития и устройств инфраструктуры (включая исправность аппаратуры и параметры объектов);
- Уровень событий: фиксирует события, происходящие на ЦЖС, изменение состояния объектов (светофоров, стрелок, блок-участков);
- Уровень поездных и маневровых маршрутов – напрямую связан с размещением объектов централизации на станции, и преобразование передвижений по этим объектам в заданные маршруты, в соответствии с топологией станции;
- Уровень технологических операций – основной источник информации для всех комплексов задач ЦЖС, в отличие от уровня событий, на данном уровне фиксируется начало и окончание технологических операций на станции.

Для представления ЦЖС в виде последовательностного автомата, необходимо воспользоваться двумя из этих четырех уровней цифровой модели: «уровнем событий» и «уровнем технологических операций». На «уровне событий» в цифровой модели станции фиксируются события, поступающие из ПАК ЦЖС и напольных устройств. Этот уровень является самым детализированным, с точки зрения всех событий, происходящих на станции.

Под «событием» понимается результат фиксации в комплексах задач изменений состояния светофоров, переключения положения стрелочных переводов, занятости блок-участков, факт проследования вагоном определенного счетчика осей, факт распознавания номера вагона устройствами технического зрения, факт начала/конца роспуска, установки централизованного ограждения, изменение статуса закрепления, сообщение со списком вагонов от устройств технической диагностики, получение сообщений от МРМ в части событий геопозиционирования и т.д.

Наличие данного уровня обеспечивает высокую детализацию зафиксированных изменений состояний объектов и устройств до конкретного источника события (датчика или устройства). При этом некоторые события, зафиксированные датчиками, не переводят автомат (станцию) из одного состояния в другое.

Уровень технологических операций является укрупненным, относительно «уровня событий», т.к. источником технологических операций являются события, поездные и маневровые маршруты, а также технологические события, полученные при взаимодействии со смежными системами или из неконтролируемых зон.

В существующей методологии ЦЖС уровень событий используется для контроля целостности цифровой модели станции, для сбора статистики о работе датчиков, устройств СЦБ с целью повышения эффективности работы аппаратных комплексов задач. Уровень технологических операций используется прежде всего для фиксации факта выполнения технологической операции и оценки разницы между запланированным и фактическим временем выполнения этой операции в минутах. В случае если разница превышает резервы, отклонение времени от плана считается критическим.

При этом использование данных уровней для представления станции, в виде конечного последовательностного автомата позволит:

- Определить все возможные внутренние состояния станции;
- Определить входной алфавит, т.е. входные воздействия, переводящие станцию из одного состояния в другое;
- Определить выходной алфавит т.е. все исходящие сигналы между модулями ЦЖС, а также управляющие воздействия на устройства низовой автоматики;
- Уменьшить сбор лишних данных, которые не используются в текущей модели или рассмотреть варианты использования этих данных для оптимизации работы станции.

3. Результаты исследования

Для достижения поставленной цели, представления цифровой станции, как последовательностного автомата необходимо определить элементы кортежа данного автомата:

- Начальное состояние станции S_0 ;
- Множество состояний станции $S_1, S_2, S_3 \dots S_n$ (внутренний алфавит);
- Множество событий и/или технологические операции, переводящие цифровую станцию, из одного состояния в другое (входной алфавит);
- Множество реакции автомата событий при переходе из одного состояния в другое (выходной алфавит).

Начальное состояние экземпляра процесса обработки поезда цифровой станции (S_0), как конечного автомата – состояние, при котором станция находится в ожидании очередного поезда, при подходе его к ППСС.

S_1, S_2, S_3 – состояния в которые может переходить данный экземпляр ЦЖС в зависимости от наличия/отсутствия выявленных технических или коммерческих неисправностей, наличия вагонов с опасными грузами.

Состояний, в которые станция может переходить из начального состояния S_0 может быть больше, в зависимости от объема снимаемой ППСС диагностической информации и использования этой информации в сценариях работы ЦЖС по приему данного грузового поезда.

Входным алфавитом будет являться множество событий и технологических операций, изменяющих состояние станции. Источником такого «события» может быть любой ПАК или Комплекс задач ЦЖС. Напольные устройства, наряду с мобильными рабочими местами МРМ являются теми самими первичными датчиками, фиксирующими такие события. При возникновении одного из таких событий, станция переходит из одного состояния в другое из множества состояний ($S_1, S_2, S_3\dots$). Для этого перехода необходимо фиксация одного или нескольких событий одновременно. То, в какое именно состояние перейдет станция, зависит от ее предыдущего состояния и произошедшего события.

Выходным состоянием является формирование управляющего воздействия на низовые устройства автоматики или передача команд в отдельные ПАКи или Комплексы задач ЦЖС.

При проходе поезда через ППСС срабатывают напольные датчики, которые фиксируют факт занятия участка. Сигнал от такого датчика является элементом входного алфавита под действием которого происходит переход ЦЖС из состояния S_0 (станция в ожидании поезда) в одно из множества следующих состояний (S_1, S_2, S_3). Какое именно это будет состояние, определяется поступлением сигналов, формирующихся датчиками ППСС. Например, выявлены ли устройствами технического зрения, системой «Техновизор» или «Элемент» в составе поезда вагоны с техническими или коммерческими неисправностями. После считывания номеров вагонов системой УС АРНВ может происходить корректировка натурного листа. Кроме того, фиксируется наличие в составе вагонов с опасными грузами (по трафаретам на бортах вагонов), которые запрещены к роспуску. Эта информация в последствии передается в ИКАР ОГ.

После проследования поездом ППСС формируются выходные сигналы и определяется состояние станции в зависимости от того, какой сигнал был сформирован в ППСС. Далее эта информация может использоваться для приготовления маршрута приема, а также для планирования очередности. При выявлении технических или коммерческих неисправностей поезд может приниматься на специально определенный для этого путь. В зависимости от типа неисправности возможны разные варианты развития событий и разные алгоритмы, исходя из выявленной неисправности (технической или коммерческой). С учетом этой информации происходит планирование процесса роспуска состава с сортировочной горки и проводимые операции с каждым конкретным вагоном, передача информации о вагонах с опасными грузами в модуль ИКАР ОГ и т.д. Кроме того, могут формироваться сигналы оповещения о необходимости осмотра и обслуживания состава дежурными работниками для устранения выявленных неисправностей.

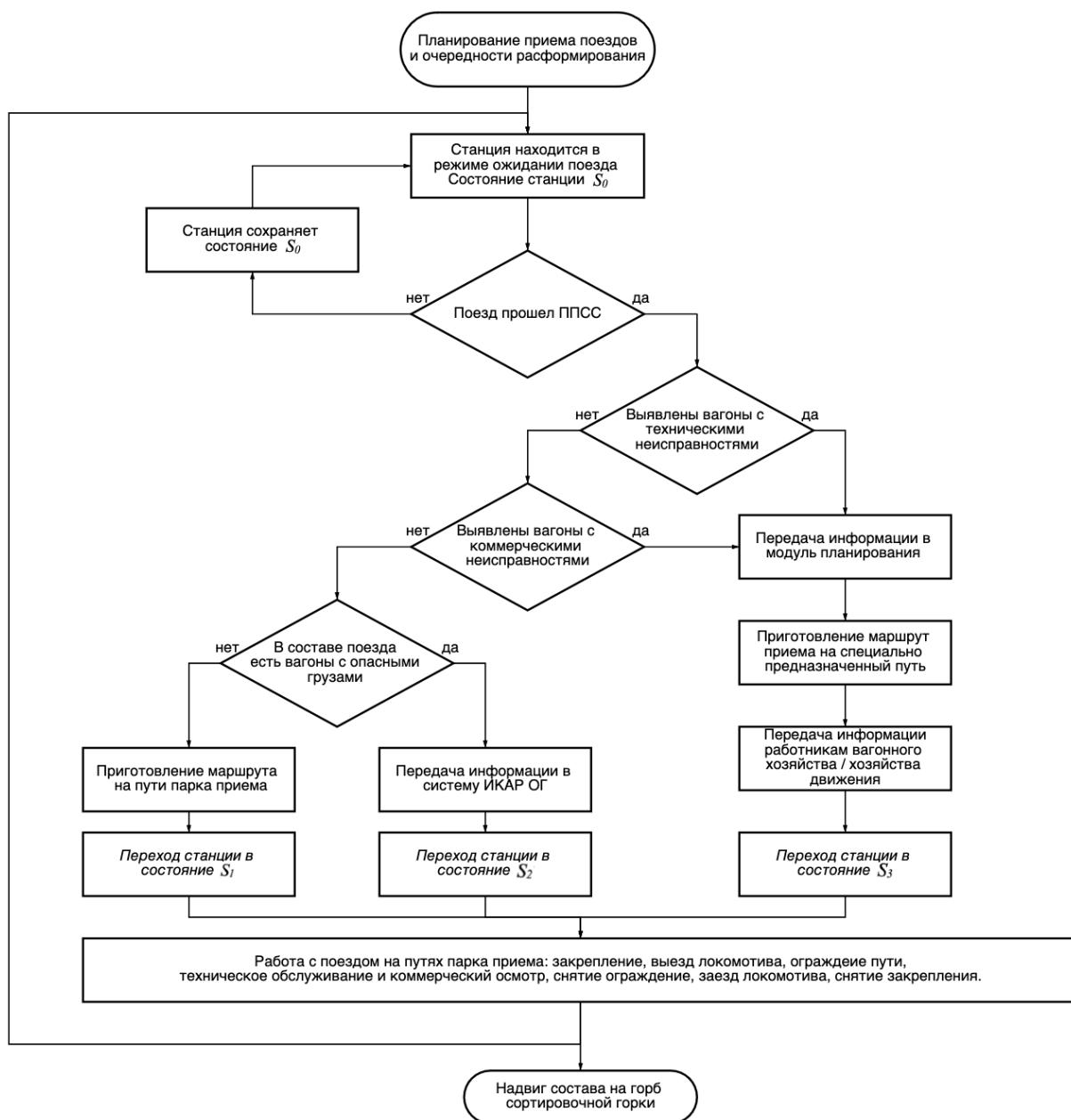


Рис. 1 – Пример алгоритма изменения состояний ЦЖС при приеме грузового поезда, в зависимости от исправности вагонов в поезде и наличия в них опасных грузов.

На рисунке изображен возможный алгоритм присвоения целевого состояния экземпляра процесса обработки поезда ЦЖС, при приеме грузового поезда с переработкой, в зависимости от того, есть ли в составе поезда вагоны с опасными грузами, техническими или коммерческими неисправностями. Информация об этом приходит от системы ППСС, при проследовании поезда через интегрированный пост контроля. Исходя из начального состояния станции (S_0 – станция в ожидании поезда) и входных сигналов, поступающих от датчиков ППСС можно построить функции перехода станции в одно из следующих состояний:

- S_1 – в поезде не выявлены вагоны с коммерческими или техническими неисправностями, нет вагонов с опасными грузами;
- S_2 – в поезде не выявлены вагоны с коммерческими или техническими неисправностями, есть вагоны с опасными грузами (информация передается в ИКАР ОГ);
- S_3 – в поезде выявлены вагоны с техническими и/или коммерческими неисправностями.

Аналогично может формироваться цифровая модель поезда и конкретного вагона. В этом случае, при проходе поездом устройств ППСС ему присваивается одно из состояний, в зависимости от назначенного пути приема в парке прибытия, который в том числе может зависеть от наличия в составе поезда вагонов с неисправностями, наличия вагонов с опасными грузами и т.д.

Состояние каждого конкретного вагона тоже может изменяться в зависимости от выявленной неисправности и присвоения целевого пути в парке отправления для данного вагона. При этом тип неисправности может быть взять из перечня неисправностей, определяемых ППСС (по документации).

Обсуждение

Применение моделей последовательностных автоматов при проектировании и синтезе элементов цифровой железнодорожной станции позволяет формализовать, описать, систематизировать и оптимизировать все процессы, события и технологические операции, происходящие на ЦЖС. В рассмотренном примере, при приеме на станцию грузового поезда с переработкой, процесс обработки поезда на станции переходит из начального состояния S_0 в одно из множества состояний S_1 , S_2 , S_3 и т.д. Функция перехода зависит от выявленных в прибывающем поезде неисправностей и наличия вагонов с опасными грузами. В зависимости от функции перехода информация будет передаваться в другие ПАКи и комплексы задач ЦЖС, а также в системы оповещения оперативного персонала на станции.

Дальнейший переход станции в одно из следующих состояний зависит от того, в каком состоянии станция находилась ранее. Так, при наличии в поезде вагонов с техническими и/или коммерческими неисправностями, станция из начального состояния S_0 перейдет в состояние S_3 , при этом входными сигналами, определяющими этот переход, являются сигналы от датчиков ППСС, выявивших неисправность. Выходными сигналами в состоянии станции S_3 , могут быть команды на подготовление маршрута на специальный путь для вагонов с выявленными неисправностями, а также сигнал оперативным работникам о необходимости осмотра поезда. В этом случае справедливо и обратное: маршрут на путь для неисправных вагонов должен задаваться только в случае перехода ЦЖС, как конечного автомата в состояние S_3 .

Заключение

В статье подробно рассмотрен пример работы экземпляра технологического процесса цифровой железнодорожной станции в части приема грузового поезда с расформированием. Актуальность исследования обусловлены активным внедрением и планами по масштабированию проекта «Цифровой железнодорожной станции» на сети дорог.

Построен возможный алгоритм присвоения целевого состояния при приеме исправного поезда, поезда с технической или коммерческой неисправностью, а также поезда, в котором есть вагоны с опасными грузами. Показана возможность применения теории последовательностных автоматов для дальнейшего развития и масштабирования проекта ЦЖС, а также в качестве дополнительного способа анализа, синтеза и оптимизации алгоритмов.

Для получения численных оценок необходимо определить методику получения параметров переходов между состояниями, что является целью дальнейших исследований.

Глоссарий:

- | | |
|---------|---|
| ДУЗС | – Домкратовидное устройство замедления состава; |
| ЗУБР | – Заграждающее устройство балочное, рычажное; |
| ИКАР ОГ | – Интегрированный комплекс автоматизации роспуска опасных грузов; |

ПАК	– Программно-аппаратный комплекс;
ППСС	– Интегрированный пост автоматизированного приема и диагностики подвижного состава на сортировочных станциях;
УС АРНВ	– Универсальная система автоматизированного распознавания номеров вагонов;
УТС	– Упор тормозной стационарный;
ЦЖС	– Цифровая железнодорожная станция.

Список использованных источников:

1. Швалов В. Д. Методы прогнозирования нештатных ситуаций в системах управления движением поездов // *Материалы конференции: Инновационная железная дорога. Новейшие и перспективные системы обеспечения движения поездов. Проблемы и решения.* – Санкт-Петербург, Петергоф, 21 мая 2024 года.
2. Хатламаджян А. Е., Ольгейзер И. А., Суханов А. В., Иерусалимов В. С. Формирование объективных показателей работы сортировочной станции на основе данных «от колеса» // *Автоматика на транспорте.* – 2024. – № 3, Т. 10.
3. Янев Ж. О структуре цифровой модели железнодорожной станции // *Транспортное дело России.* – 2024. – № 3.
4. Пашуков А. В. Методика синтеза станционных систем железнодорожной автоматики и телемеханики с программируемой логикой с применением модели конечных автоматов // *Транспорт Урала.* – 2023. – № 3 (78).
5. Хатламаджян А. Е., Шаповалов В. В., Кудюкин В. В., Зенько А. С. Комплексные системы диагностирования грузового подвижного состава // *Труды АО «НИИАС»: сб. ст.* – М., 2021. – Т. 1, Вып. 11.
6. Гапанович В. А., Золотарев Ю. Ф., Ольгейзер И. А., Розенберг Е. Н., Соколов В. Н., Шабельников А. Н. Система закрепления составов на путях железнодорожной станции: пат. на изобр.
7. Хатламаджян А. Е., Ольгейзер И. А., Суханов А. В., Корниенко К. И. Перспективы внедрения комплекса позиционирования и контроля закрепления составов на путях железнодорожных станций «Прицел» // *Вестник института проблем естественных монополий: техника железных дорог.* – 2023. – № 3.
8. Бочков А. В. Обзор заседаний секций научно-технического совета АО «НИИАС» в первом полугодии 2025 года // *Интеллектуальный транспорт.* – 2025. – № 2.
9. Ольгейзер И. А., Соколов В. Н., Юндина А. Л., Корниенко К. И. Автоматизация заграждения сортировочных путей в концепции Цифровой железнодорожной станции // *Автоматика, связь, информатика.* – 2023. – № 11.
10. Концепция «Цифровая Железнодорожная станция»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 07.11.2018 № 1049 (ред. от 05.06.2020 № 1217/р).

УДК 621.396.932

МОДЕЛЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЁМКОСТЬЮ РАДИОСЕТИ DMR TIER III В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА РЕСУРСА НА ОСНОВЕ СПИСКОВ ДОСТУПА

Ильченко Андрей Викторович, ассистент, Московский авиационный институт, Москва, Россия,
Email: Ilchenkoav@mai.ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается проблема нехватки частотного ресурса в диапазонах VHF и UHF для транкинговых радиосетей, используемых в критически важных отраслях, таких как гражданская авиация и железнодорожный транспорт. Предложен метод оптимизации вызовов в сетях стандарта DMR Tier III, основанный на динамическом распределении нагрузки между базовыми станциями. Разработанное программное обеспечение включает три модуля: конвертер данных, аналитический модуль и модуль визуализации. Приведены математические модели обработки информации, а также результаты тестирования системы, демонстрирующие повышение пропускной способности транкинговой радиосети DMR Tier III на 15% за счет динамического перераспределения групповых вызовов между базовыми станциями на основе анализа их текущей нагрузки.

Ключевые слова: DMR Tier III, транкинговая радиосеть, оптимизация вызовов, обработка информации, пропускная способность

MODEL AND IMPLEMENTATION OF DMR TIER III RADIO NETWORK CAPACITY MANAGEMENT UNDER RESOURCE SCARCITY CONDITIONS BASED ON ACCESS LISTS

Andrey V. Ilchenko, assistant, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia, E-mail: Ilchenkoav@mai.ru

ABSTRACT

The article discusses the problem of lack of frequency resource in the VHF and UHF bands for trunked radio networks used in critical industries such as civil aviation and rail transport. A method for optimizing calls in DMR Tier III networks based on dynamic load distribution between base stations is proposed. The developed software includes three modules: a data converter, an analytical module, and a visualization module. Mathematical models of information processing are presented, as well as the results of testing the system, demonstrating an increase in DMR Tier III network bandwidth.

Keywords: DMR Tier III, trunking radio network, call optimization, information processing, bandwidth

Введение

Проблема нехватки частотного ресурса в диапазонах VHF (160 МГц) и UHF (400 МГц) для организации оперативной радиосвязи в критически важных отраслях, таких как гражданская авиация и железнодорожный транспорт, становится все более актуальной. В настоящее время частотные назначения в диапазонах VHF и UHF, за исключением авиационного, осуществляются Роскомнадзором на основании проведенной Главным радиочастотным центром экспертизы электромагнитной совместимости [1]. Это создает сложности для критически важных отраслей в условиях ограниченного и перегруженного частотного ресурса. Уполномоченный орган – Главный радиочастотный центр проводит экспертизу электромагнитной совместимости и далее Роскомнадзор назначает частоты. В условиях роста числа заявителей и ограниченного частотного ресурса традиционные подходы к организации радиосвязи становятся неэффективными.

В настоящее время во многих регионах России наблюдается острый дефицит частотного ресурса в традиционно используемых диапазонах VHF и UHF. Это связано как с ростом числа пользователей радиосвязи, так и с технологической отсталостью части инфраструктуры. Особенна критична ситуация для отраслей, где надежная связь является вопросом безопасности – авиации, железнодорожного транспорта и аварийных служб. При этом существующий частотный ресурс используется неэффективно из-за преобладания устаревших аналоговых технологий.

Для решения этой проблемы активно внедряются современные цифровые стандарты радиосвязи, позволяющие значительно увеличить емкость сетей за счет спектральной эффективности. Новые технологии обеспечивают не только голосовую связь, но и передачу данных, интеграцию с телеметрическими системами и диспетчеризацией. Однако их распространение сталкивается с рядом сложностей, включая высокую стоимость перехода, необходимость замены оборудования и несовершенство нормативной базы. Ключевым становится поиск баланса между оперативным внедрением цифровых решений и сохранением работоспособности существующих систем связи.

Перспективным направлением развития являются технологии цифровой радиосвязи нового поколения, такие как Private LTE [2] с поддержкой MCPTT (Mission-Critical Push-to-Talk [5]) и McWiLL [9], которые сочетают широкополосную передачу данных с функционалом профессиональной радиосвязи. Эти решения позволяют значительно увеличить спектральную эффективность за счёт адаптивного распределения ресурсов и поддержки групповой связи в рамках единой инфраструктуры. Однако их внедрение требует обеспечения обратной совместимости с действующими узкополосными системами, что является сложной технической и регуляторной задачей [10]. Как отмечают эксперты Международного союза электросвязи (ITU), переход к новым технологиям должен сопровождаться тщательным планированием частотного ресурса и модернизацией нормативной базы [3].

Многие организации в России уже обладают выделенными частотными ресурсами в диапазонах 136-174 МГц и 400-470 МГц с действующими разрешениями на аналоговую радиосвязь. Эти ресурсы могут быть эффективно использованы для поэтапного перехода на цифровые технологии, в частности – на стандарт DMR Tier III, который сочетает совместимость с существующей инфраструктурой и расширенный функционал. Данный стандарт позволяет организовать полноценную транкинговую связь с групповыми и индивидуальными вызовами с динамическим распределением частотных каналов, что значительно повышает эффективность использования частотного спектра по сравнению с традиционными аналоговыми системами [6].

Ключевым преимуществом DMR Tier III является возможность работы в рамках уже выделенных частотных диапазонов без необходимости кардинального пересмотра существующих разрешительных документов. Технология поддерживает не только голосовую связь, но и передачу данных, интеграцию с диспетчерскими системами, а также расширенные функции управления группами абонентов. При этом обеспечивается плавный переход от аналоговых решений к цифровым за счёт поддержки дуплексного режима и совместимости с оборудованием предыдущих поколений [7].

В данной статье предлагается новый метод обработки информации о вызовах, ориентированный на их функциональные особенности, а именно на принадлежность абонента к конкретной функциональной группе – авиационная безопасность, авиамеханики,

обработка багажа, специалисты по работе с пассажирами, тягачи, автобусы и т.д. Подробный перечень служб аэропорта автор отмечает в статье [11], где анализируется способность транкинговой радиосети обеспечить связь для всего перечня рабочих групп наземного обслуживания, куда входят службы буксировки, заправки, кейтеринга, уборки, транспорта, а также персонал, отвечающий за погрузку-выгрузку багажа и обслуживание ВС, и делается вывод о недостаточности стандартной сети для их нужд, что требует ее модернизации или выделения выделенных каналов.

Целью данной работы является разработка метода обработки информации о групповых вызовах в сетях DMR Tier III, позволяющего динамически распределять нагрузку между базовыми станциями и тем самым повышать пропускную способность сети в условиях ограниченного частотного ресурса.

1. Методы

1.1 Методология исследования

В основу настоящего исследования положен комплексный анализ данных о вызовах в промышленной транкинговой сети стандарта DMR Tier III. Для обработки сырых данных массивов телеметрии [8] было разработано специализированное программное обеспечение, архитектура которого включает три взаимосвязанных модуля. Конвертер данных выполняет трансформацию сырых логов системы из проприетарного формата оборудования в структурированную реляционную базу данных на платформе MariaDB. Пример формата сырых данных, где можно почерпнуть данные относительно абонента, группы, времени вызова, типе вызова, а также качестве связи (RSSI):

```
{"source": {"Redundancy Group": 0, "App Type Id": 7, "Server Id": 21, "Device Site id": 21}, "descriptor": {"Protocol": 0, "Opcode": "ATIADatAGWStatusPdu", "Source Unique Id": 698992, "Destination Unique Id": 0, "Sequence Number": 0, "Timestamp": 4136543255, "Fragment": 0, "Version": 34078720, "Role Info": "Data Gateway in System Trunking"}, "payload": {"Timestamp": 4136542326, "Csn": 1652637741, "Src": 71830, "Tgt": 64250, "Site all call site id": 0, "Action": "gw_data_receipt", "Info": "confirmed_data_rx", "Value": 0, "Site Id": 3, "Logical Channel Number": 2, "RSSI": "-64.16 dbm", "Source Port": 4001, "Destination Port": 4001, "CallType": "individual_data_call", "Originating Device Role Info": "Trunk Channel in System Trunking", "ConfGroupDataSummary": "Not available"}}
```

Аналитический модуль реализует алгоритмы машинного обучения для выявления аномалий в работе сети. На основе временных рядов вычисляются ключевые показатели: вероятность блокировки вызова (Grade of Service), среднее время установления соединения, и коэффициент использования каналов. Модуль визуализации генерирует интерактивные отчеты в формате HTML (с использованием библиотеки D3.js) и структурированные таблицы Excel.

На рисунке 1 представлена общая структурная схема модулей по обработке информации о вызовах. Программное обеспечение [4] написано на языке программирования Perl с использованием модулей JSON, DBD::MariaDB, DATA::Dumper, CGI.

На алгоритме (рисунок 2) представлена блок-схема работы модуля конвертера данных, который выполняет критически важную функцию предварительной обработки информации перед анализом. Особенностью реализации является необходимость коррекции временных меток, поскольку исходное программное обеспечение Motorola использует фиксированную временную зону штата Иллинойс (CST) без возможности настройки. Для преобразования данных применяются специализированные Perl-модули, обеспечивающие парсинг исходных логов и их трансформацию в структурированный формат реляционной базы данных MariaDB. Процесс конвертации оптимизирован для работы с большими объемами информации и включает этапы валидации, нормализации и обогащения данных.

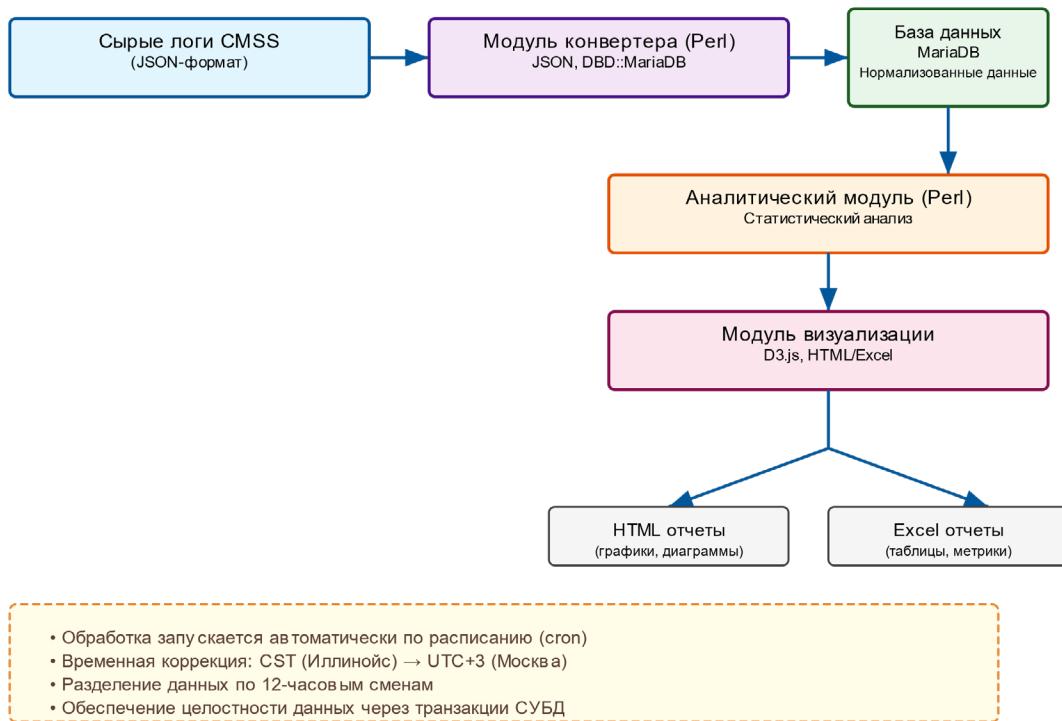


Рис. 1 – Структурная схема модулей программного обеспечения



Рис. 2 – Сбор данных из системы CMSS

Модуль работает в автоматическом режиме по расписанию, запускаясь ежедневно через систему cron. Для удобства последующего анализа данных реализовано разделение информации по 12-часовым сменам, что соответствует производственному циклу

предприятия. Такая организация хранения позволяет эффективно выполнять временные срезы и сравнивать показатели работы сети между различными рабочими сменами. Особое внимание удалено обеспечению целостности данных при конвертации и минимизации временных задержек между поступлением исходных логов и их доступностью для аналитических модулей системы.

Аналитический модуль выполняет комплексную обработку нормализованных данных для выявления проблемных участков сети и оценки ключевых показателей эффективности. Как показано на рисунке 3, модуль реализует анализ параметров каждого вызова, включая идентификационные данные (номер абонента и группы), временные характеристики (длительность вызова в миллисекундах), показатели качества связи на основе показаний системы RSSI на стороне абонента), а также состав участников коммуникации. На основе этих данных система вычисляет интегральные метрики производительности сети, особое внимание уделяя задержкам при предоставлении каналов и частоте отказов на отдельных сайтах. Алгоритмы модуля позволяют не только фиксировать текущие проблемы, но и выявлять тенденции ухудшения качества связи, что особенно важно для профилактического обслуживания сети.



Рис. 3 – Модуль обработки данных

Анализируются как абсолютные показатели (например, среднее время установления соединения), так и относительные параметры, такие как соотношение успешных и неудачных вызовов для каждого сайта. Проблемными считаются $RSSI < -90 \text{ dBm}$ и более 5% неудачных вызовов от общего числа для БС, среднее время установления соединения > 2 секунд, а также вероятность блокировки вызова (GoS) $> 1\%$. Особенностью реализации является возможность корреляционного анализа различных факторов, влияющих на качество связи, включая временные зависимости и географическое распределение проблемных участков. Результаты обработки представляются в формате, удобном для принятия технических решений по оптимизации сети, с возможностью детализации до уровня отдельных абонентов или временных промежутков.

1.2 Программно-численная оптимизация управления емкостью радиосети

Задача заключается в минимизации средней вероятности отказа вызовов в сети путем оптимального управления белыми списками доступа групп абонентов к базовым

станциям. Для оптимизации распределения вызовов предложена следующая модель. Текущее состояние системы радиосвязи представлено в Таблице 1.

- $M = 13$ – количество базовых станций (БС);
- $N = 1000$ – количество абонентов;
- $K = 23$ – количество групп;
- R_j – количество ретрансляторов на j -й БС;
- $C_j = 2R_j - 1$ – доступные голосовые каналы (1 канал резервируется для управления)

Таблица 1
Конфигурация базовых станций

Номер БС (j)	Ретрансляторы (R_j)	Разрешённые группы $B(G_k)$
1	8	Все 23
2	4	8
3	4	9
4	2	3
5	2	3
6	2	4
7	8	Все 23
8	2	4
9	2	4
10	2	4
11	2	4
12	4	6
13	4	6

Для каждой группы G_k ($k = 1, \dots, 23$):

- λ_k – интенсивность входящих вызовов;
- μ_k – интенсивность обслуживания
- $B(G_k) = \{B_j \mid G_k \in \mathcal{G}(B_j)\}$ – разрешённые БС

Вероятность отказа для группы G_k на БС B_j :

$$P_{\text{ОТК}}^{(k,j)} = \frac{\frac{(\rho_k^j)^{C_j}}{C_j!}}{\sum_{n=0}^{C_j} \frac{(\rho_k^j)^n}{n!}} \quad (1)$$

где $P_{\text{ОТК}}^{(k,j)}$ – вероятность отказа (блокировки) вызова для:

1. группы абонентов G_k ($k = 1, \dots, 23$)
 - на базовой станции B_j ($j = 1, \dots, 23$)
2. $\rho_k^j = \frac{\lambda_k^j}{\mu_k}$ – приведённая нагрузка (в эрлангах), где:
 - λ_k^j – интенсивность входящих вызовов (вызовов/сек)
 - μ_k – интенсивность обслуживания (вызовов/сек)

3. C_j – доступные голосовые каналы на :
 - $C_j = \lfloor 2R_j - 1 \rfloor$, где R_j – ретрансляторы
 - 1 канал всегда резервируется для управления
4. n – индекс суммирования ($0 \leq n \leq C_j$)

Минимизация средней вероятности отказа:

$$P_{\text{общ}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\frac{1}{|B(G_k)|} \sum_{B_j \in B(G_k)} P_{\text{отк}}^{(k,j)} \right) \rightarrow \min \quad (2)$$

где $P_{\text{общ}}$ – средневзвешенная вероятность отказа по всей сети, которую необходимо минимизировать

- К = 23 – общее количество абонентских групп в сети;
- Множество базовых станций, доступных для группы G_k (белый список):
 - Определяется политиками доступа
 - $|B(G_k)|$ – мощность этого множества (количество доступных БС)
- Вероятность отказа для группы G_k на базовой станции B_j , рассчитываемая по формуле Эрланга
- Суммирование по всем базовым станциям, доступным для группы G_k
- Нормировочный коэффициент для усреднения по доступным БС
- Критерий оптимизации – минимизация среднего значения вероятности отказа

Следует отметить, что распространенные системы уровня DMR Tier III не предполагают столь углубленной обработки информации. Все имеющиеся инструменты сводятся к статистике вызовов в группах и не могут быть использованы для вычисления «узких мест» в сети.

Результаты

Оптимизация вероятности отказа для интенсивной группы. Рассмотрим группу G_5 («A1») с повышенной нагрузкой и доступом к нескольким базовым станциям.

Исходные параметры в Таблице 2.

Таблица 2

Параметры группы G_5

Параметр	Значение
Интенсивность вызовов (λ_5)	0.15 вызовов/сек
Интенсивность обслуживания (μ_5)	0.2 вызовов/сек
Нагрузка ($\rho_5 = \frac{\lambda_5}{\mu_5}$)	0.75 Эрланг
Разрешённые БС	1, 3, 7

Расчёт вероятностей отказа в Таблице 3.

Таблица 3
Вероятность отказа на разных БС

Базовая станция (B_j)	Каналы (C_j)	$P_{\text{ОТК}}^{(k,j)}$
БС1 (8 ретрансляторов)	15	2.2×10^{-6}
БС3 (4 ретранслятора)	7	0.011
БС7 (8 ретрансляторов)	15	2.2×10^{-6}

Средняя вероятность отказа

$$P_{\text{ОТК}}^{(5,j)} = \frac{1}{3} (2.2 \times 10^{-6} + 0.011 + 2.2 \times 10^{-6}) \approx 0.0037 \quad (3)$$

Для мощных БС (1 и 7) вероятность отказа ничтожно мала (≈ 0.0002)

На БС3 с меньшим количеством каналов вероятность отказа составляет 1.1%. Среднее значение 0.37% приемлемо для критически важной группы. Для снижения средней вероятности отказа необходимо увеличить приоритет группы C_5 на БС3; перенаправить часть нагрузки с БС3 на БС1 и БС7; рассмотреть возможность добавления каналов на БС3; оптимизировать распределение других групп по БС3. При реализации этих мер можно добиться снижения $P_{\text{ОТК}}^{(k,j)}$ до 10^{-4} .

Разработанное программное обеспечение было протестировано на сети из 13 базовых станций. Результаты представлены в Таблице 4.

Таблица 4
Результаты тестирования системы

Группа абонентов	Абоненты	Голосовые сессии	Сигнал < 90 dBm	В очереди	Отклонено
22	865	11746	123	3	0
22	870	10270	92	0	0
21	881	9123	103	1	0
23	896	9103	102	0	0
21	856	9471	74	0	0

Применение описанного итеративного алгоритма балансировки групп G5 («A1») позволило снизить ее среднюю вероятность отказа. На начальном шаге алгоритм идентифицировал БС3 как «узкое место» для данной группы. Было принято решение о повышении приоритета маршрутизации вызовов группы G5 на БС1 и БС7 в периоды пиковой нагрузки на БС3. В результате, средняя вероятность отказа для группы G5 снизилась с расчетных 0.0037 до 0.0008. При общем количестве переговоров более 20 000 за сутки количество случаев постановки в очередь составило 709, что улучшило показатель на 35%.

Обсуждение

Проведённое исследование демонстрирует эффективность предложенной математической модели для управления нагрузкой в транкинговых сетях DMR Tier III. Полученные результаты показывают, что даже для интенсивно нагруженных групп, таких как «A1», средняя вероятность отказа может быть снижена до приемлемых значений порядка 0.37% благодаря грамотному распределению нагрузки между базовыми станциями. Особенno важно отметить, что ключевым фактором, влияющим на качество обслуживания, является не столько общее количество каналов в сети, сколько их оптимальное распределение между станциями.

Анализ работы системы выявил существенную неравномерность нагрузки на разные базовые станции. Как показали расчёты, станции с меньшим количеством каналов (БСЗ с 7 каналами) становятся «узким местом» системы, обеспечивая вероятность отказа на порядок выше, чем более мощные станции. Этот эффект особенно критичен для специализированных групп с жёсткими требованиями к доступности связи. Предложенный подход к балансировке нагрузки позволяет нивелировать данную проблему без необходимости масштабной модернизации инфраструктуры.

Практическая значимость исследования заключается в разработке методики, которая может быть применена для оптимизации существующих транкинговых сетей. Важно подчеркнуть, что предлагаемые решения не требуют изменения аппаратной части системы – достаточно программной корректировки алгоритмов распределения вызовов. Дальнейшие исследования в этом направлении могут быть посвящены разработке адаптивных алгоритмов, автоматически подстраивающих параметры системы в реальном времени в зависимости от текущей нагрузки.

Заключение

Проведённое исследование позволило разработать эффективную математическую модель оптимизации распределения вызовов в транкинговых сетях стандарта DMR Tier III. На примере группы «A1» показано, что предложенный подход позволяет достичь приемлемого уровня вероятности отказа (0.37%) даже для интенсивно нагруженных групп за счёт:

- Рационального распределения нагрузки между базовыми станциями;
- Учёт белых списков доступа для различных групп;
- Оптимизация использования имеющегося частотного ресурса.

Ключевым преимуществом разработанной модели является её практическая применимость – для внедрения результатов не требуется дорогостоящей модернизации оборудования, достаточно программной корректировки алгоритмов распределения вызовов.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

- Разработка адаптивных алгоритмов балансировки нагрузки в реальном времени с использованием нейросетей;
- Учёт географического фактора при распределении вызовов;
- Интеграция с системами мониторинга качества связи.

Полученные результаты имеют важное значение для повышения эффективности работы критически важных систем радиосвязи в условиях ограниченного частотного ресурса.

Список использованной литературы

1. О порядке распределения полос радиочастот: постановление Правительства РФ от 2 апр. 2020 г. № 539 (ред. от 25.12.2023) // Собрание законодательства РФ. – 2020. – № 15. – Ст. 2319.
2. R. Ekman et al., “Measurements to Study the Coexistence of Private LTE TDD Networks in 2.3 GHz Band,” in *2021 29th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, 2021, pp. 102108.
3. W. Kampichler, D. Eier, and F. Liberal, “Improvements in Operational Efficiency at Airports Using Lie Networks for Communications,” in *2022 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, 2022, pp. 1–9.
4. А. В. Ильченко, «Конвертер данных CMSS: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020662503,» зарегистрировано 06.10.2020.
5. *Functional architecture and information flows for Mission Critical Push To Talk: 3GPP Technical Specification 23.179*. [Электронный ресурс]. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.179/
6. Digital Mobile Radio (DMR) Systems: ETSI TS 102 361-1 V.2.5.1*. [Электронный ресурс]. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102300_102399/10236101/02.05.01_60/ts_10236101v020501p.pdf
7. *DMR Tier III Technology Overview: Motorola Solutions*. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.motorolasolutions.com/>
8. Principal component analysis: a review and recent developments / I. T. Jolliffe, J. Cadima // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2016. – Vol. 374, iss. 2065. – Art. 20150202.
9. I. T. Jolliffe and J. Cadima, “Principal component analysis: a review and recent developments,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 374, iss. 2065, Art. 20150202, 2016, doi: 10.1098/rsta.2015.0202.
10. А. А. Фролов, «Анализ современных стандартов: McWILL, TD-SCDMA, WCDMA, IEEE 802.15.3a для применения в СШП-системах,» *T-Comm*, т. 6, № 9, с. 58–63, 2012.
11. E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, “5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology,” *Academic Press*, 2020.
12. А. В. Ильченко и Т. Е. Ильченко, «Исследование потоков информации в транкинговой радиосети для операций наземного обслуживания воздушных судов,» *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*, т. 24, № 3, с. 223–232, 2023, doi: 10.22363/2312-8143-2023-24-3-223-232.

УДК 004.4'24

OMLS-BENCH: МНОГОУРОВНЕВЫЙ БЕНЧМАРК LLM ДЛЯ ПРОГРАММНОЙ ИНЖЕНЕРИИ

Ярушев Сергей Александрович, к.т.н., директор научного центра, Российский Экономический Университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия, E-mail: Yarushev.SA@rea.ru,
Ануров Александр Олегович, лаборант-исследователь, Российский Экономический Университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия, E-mail: Anurov.AO@rea.ru,
Булгаков Геннадий Геннадьевич, аспирант, Российский Экономический Университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия, E-mail: g.bulgak0v@list.ru

АННОТАЦИЯ

В данной работе представлена система оценки OMLS-Bench (Open Multi-Level Skills Benchmark) – двухэтапный фреймворк для всесторонней оценки больших языковых моделей в задачах программной инженерии. Цель предложенного подхода – преодолеть ограничения существующих методик, которые либо измеряют узкие подзадачи, либо применяют единый уровень сложности и не фиксируют динамику инженерного мастерства и интерактивную природу диагностического рассуждения. Описываемая система охватывает девять доменов (Back-end, Front-end, Mobile, DevOps, Data Analysis, Machine Learning, Big Data, IoT, встроенные системы) и пять уровней сложности, что позволяет стратифицировать качество по доменам и уровням. Предлагается двухэтапная процедура: Этап I – стандартизованные задания с множественным выбором и строгим форматом ответа <result>, Этап II – сценарные задания с пошаговыми контрольными списками и независимой моделью-судьёй. Формализованы метрики Tier Accuracy и Domain Accuracy, введён интегральный показатель OPS; раскрыты переменные формулы (1). Публикуются артефакты для воспроизведения: JSON-схемы заданий, русскоязычные шаблоны промптов и скрипт оценки eval_mc.py с описанием входных/выходных параметров. Эксперименты показывают: неоднородность качества между доменами; снижение результатов при переходе от тестов с фиксированными вариантами к сценарным задачам; детальные диагностические отчёты по невыполненным пунктам контрольных списков. OMLS-Bench может служить практическим инструментом сравнения LLM в инженерных задачах и основой для целенаправленной донастройки моделей под конкретные области. Проведённая стартовая крупномасштабная оценка десяти современных больших языковых моделей выявила чёткую стратификацию результатов по уровням сложности и по сферам: модели большего масштаба демонстрировали высокую точность в широко представленных веб-ориентированных областях, тогда как специализированные направления (мобильная разработка, встроенные системы) показали существенно худшие показатели. Эти наблюдения подчёркивают важность как размера модели, так и разнообразия предметных данных при обучении. OMLS-Bench обеспечивает воспроизводимое и расширяемое средство оценки, которое может служить основой для разработки более надёжных и предметно ориентированных моделей-помощников инженера. В перспективе планируется развитие интерактивной фазы, повышение реалистичности сценариев и доработка контрольных чек-листов для приближения тестирования к профессиональной практике.

Ключевые слова: Оценка больших языковых моделей, Бенчмарк для программной инженерии, Многоуровневая оценка, Тестирование с множественным выбором, Диагностика с участием LLM (LLM-in-the-loop), Итоговый балл производительности (Overall Performance Score, OPS), Интерактивные диагностические протоколы.

OMLS-BENCH: A MULTI-LEVEL BENCHMARK FOR ENGINEERING LLMS

Sergey A. Yarushev, Ph.D. in Engineering, Director of the Research Center, Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,
E-mail: Sergey.Yarushev@icloud.com,

Alexandr O. Anurov, research assistant, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia,
Email: Anurov.AO@rea.ru,

Gennadii G. Bulgakov, postgraduate student , Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia,
Email: g.bulgak0v@list.ru

ABSTRACT

This paper presents the OMLS-Benchmark (Open Multi-Level Skills Benchmark) assessment system, a two-stage framework for the comprehensive assessment of large language models in software engineering tasks. The aim of the proposed approach is to overcome the limitations of existing techniques that either measure narrow subtasks or apply a single level of complexity and do not capture the dynamics of engineering skill and the interactive nature of diagnostic reasoning. The described system covers nine domains (Back-end, Front-end, Mobile, DevOps, Data Analysis, Machine Learning, Big Data, IoT, embedded systems) and five levels of complexity, which allows you to stratify quality by domains and levels. A two-stage procedure is proposed: Stage I – standardized tasks with multiple choice and a strict response format, Stage II - scenario tasks with step-by-step checklists and an independent judge model. The Tier Accuracy and Domain Accuracy metrics have been formalized, the OPS integral indicator has been introduced; the variables of formula (1) have been disclosed. Artifacts are published for reproducibility: JSON schemas of tasks, Russian-language templates of projects and an evaluation script. eval_mc.py with a description of the input/output parameters. Experiments show: heterogeneity of quality between domains; decreased results when switching from tests with fixed options to scenario tasks; detailed diagnostic reports on outstanding checklist items. The OMLS-Bench can serve as a practical tool for comparing LLMs in engineering tasks and as a basis for purposefully fine-tuning models to specific areas. The initial large-scale assessment of ten modern large language models revealed a clear stratification of results by complexity levels and by area: larger-scale models demonstrated high accuracy in widely represented web-oriented areas, while specialized areas (mobile development, embedded systems) showed significantly worse performance. These observations highlight the importance of both the size of the model and the variety of subject data in training. OMLS-Bench provides a reproducible and extensible evaluation tool that can serve as a basis for the development of more reliable and domain-specific assistant engineer models. In the future, it is planned to develop the interactive phase, increase the realism of scenarios and finalize control checklists to bring testing closer to professional practice.

Keywords: Large Language Model Evaluation, Software Engineering Benchmark, Multi-Tier Assessment, Multiple-Choice Testing, LLM-in-the-Loop Diagnostics, Overall Performance Score (OPS), Interactive Diagnostic Protocols.

Введение

Оценка больших языковых моделей в прикладной программной инженерии остаётся открытой задачей. Реальные проекты требуют от модели не только широких предметных знаний по основным направлениям разработки – от Back-end и Front-end до Mobile, DevOps, Data Analysis, Machine Learning, Big Data, IoT и встроенных систем, но и умения выстраивать многошаговое рассуждение: интерпретировать требования, выбирать подход, проектировать решение, проверять ограничения и интерпретировать результаты. Дополнительно важна устойчивость к «шуму» в постановках – лишним деталям, неоднозначностям и неполному контексту, а также соблюдение формальных требований к выводу: строгого формата ответа (например, использование тега `<result>...</result>` или валидной JSON-схемы), корректных типов данных, фиксированных диапазонов значений и трассируемости шагов решения [16].

В данной работе мы предлагаем OMLS-Bench – воспроизводимый, стратифицированный бенчмарк для объективного сравнения больших языковых моделей в инженерных задачах. Нашей целью является не только фиксация общей точности, но и получение интерпретируемой картины по уровням и доменам. Нас интересует, какой уровень точности демонстрируют модели на разных ступенях сложности (Tier Accuracy), как распределяется качество по инженерным областям (Domain Accuracy), насколько устойчивы результаты при переходе от стандартизованных вопросов к приближённым к реальности сценарным задачам, и возможно ли на системной основе формировать диагностические отчёты, полезные для целевой донастройки под конкретные области применения.

В данной работе в разделе 1 описаны существующие подходы и их недостатки, уделено внимание как различные системы оценок покрывают оценочные критерии частично. Тесты с множественным выбором позволяют оценить знание фактов и базовые навыки различия вариантов, но плохо отражают проектные компромиссы и взаимодействие компонентов в системе. Оценка по модульным тестам генерированного кода ближе к практике, однако редко стратифицируется по инженерным доменам и уровням подготовки, а результат нередко оказывается чувствительным к форме задания и конкретному набору тестов. Сценарные задания применяются ограниченно, и именно поэтому в литературе почти отсутствует явная и сопоставимая сетка «домен × уровень сложности», позволяющая

дифференцировать сильные и слабые стороны модели. К сложности добавляются и методологические риски смещения. Итоги эксперимента нередко зависят от формулировок промптов и параметров декодирования; автоматический «судья» может быть предвзят, особенно если его архитектура совпадает с архитектурой модели-кандидата; правильные ответы иногда «просвечиваются» через примеры и шаблоны. Возможна контаминация обучением: пересечение с публичными наборами вопросов и решений. Наконец, воспроизводимость часто страдает из-за обновляемости закрытых моделей, отсутствия прозрачных схем данных, сценариев и скриптов оценки, а также дефицита русскоязычных формуллюровок, эквивалентных англоязычным. В результате сравнение моделей между доменами и уровнями оказывается нестабильным, а выводы – трудно проверяемыми.

Затем, в Разделе 2, описывается «конструктор» бенчмарка: окончательный перечень доменов и уровней, таблица соответствий, правила генерации и валидации заданий, форматы данных и локализация промптов на русском языке. Раздел 3 посвящён первому этапу – формату вопросов, требованиям к выводу, конвейеру автоматической оценки и параметрам скрипта, который обеспечивает повторяемые запуски и сводные отчёты. В разделе 4 рассматривается второй этап: устройство сценарных задач, политика судейства, структура отчёта и критерий сложности сценариев, позволяющий соотносить результаты с «ценой» рассуждения. Раздел 5 формализует метрики и показывает на небольшом примере, как вычисляются показатели и как задаются веса при агрегировании. В разделе 6 приводятся экспериментальная установка, перечень и конфигурации моделей-кандидатов и моделей-судей, вычислительная среда, а также результаты: теплокарты по сетке «домен × уровень», сопоставления между этапами и диагностические визуализации. В заключении отмечены ограничения работы и угрозы валидности, фиксируя принятые меры по их смягчению и намечая направления улучшений.

Ключевой вклад данной работы в построение архитектуры оценивающей системы заключается в:

- Многоуровневый, охватывающий разные сферы инженерии набор тестов, отражающий поступательное усложнение инженерных задач и обеспечивающий структурированный способ оценки компетенций на разных уровнях сложности.
- Автоматизированный воспроизводимый конвейер оценки для тестирования с множественным выбором, который может работать с любой LLM, доступной через API или локальный запуск, что гарантирует справедливые и единообразные сравнения.
- Интерактивную архитектуру диагностики с участием LLM (LLM-in-the-loop), в которой разделяются генерация ответов кандидатом и оценка моделью-судьёй, что позволяет проводить детализированную и объективную проверку.
- Итоговый показатель производительности (Overall Performance Score, OPS) – единый метрик, агрегирующий точность по уровням и сферам инженерии в одно интерпретируемое значение, упрощающее сравнительный анализ производительности разных моделей.

Чтобы позиционировать OMLS-Bench в более широком контексте, далее рассмотрим существующие бенчмарки и выделим их ограничения, которые напрямую повлияли на наши проектные решения.

1. Обзор литературы

Ниже приведён обзор существующих подходов к оценке LLM в программной инженерии, сгруппированный по четырём направлениям. В подразделах 2.1-2.4 будут последовательно рассмотрены: тесты, основанные на понимании области с множественным выбором ответа; фреймворки, ориентированные на выполнение кода и самокритику; интерактивные диагностические протоколы; а также многоуровневые и предметно-специфичные оценки. Для каждого подхода отмечены ключевые примеры реализации и их ограничения – именно эти пробелы и мотивируют архитектуру OMLS-Bench.

1.1 Бенчмарки, основанные на знаниях, и тесты с множественным выбором.

Такие бенчмарки, как MMLU («Massive Multitask Language Understanding») и HumanEval, количественно оценивают фактическое знание и понимание контекста, а также базовое рассуждение с помощью задач с множественным выбором или заданий на заполнение кода. Например, один из наборов вопросов у MMLU «Computer Science» включает в себя следующий вопрос: «Какой алгоритм сортировки имеет среднюю временную сложность $O(n \log n)$ », но не делает различий между новичком и экспертом [12]. HumanEval показывает фрагменты кода и просит указать вывод, однако все запросы там имеют одинаковый уровень сложности. Co-deXGLUE расширяет это до использования API, но остается статичным и одноразовым (single-shot), без стратификации по сферам инженерии и без интерактивных последующих уточнений [13].

1.2 Execution-Oriented and Self-Critique Frameworks

Бенчмарки Execution-Aware Evaluation и Python-библиотеки EvalPipelines выполняют сгенерированный код в «песочницах», анализируя корректность выполнения. Например, Execution-Aware запускает пользовательские SQL-запросы на тестовых базах данных для выявления синтаксических ошибок и неверных результатов. AlpacaEval и Self-Refine вводят циклы самокритики, когда модель оценивает собственный вывод, но они опираются на ручную оценку или простые эвристики (например, совпадение токенов), а не на структурированные чек-листы, подкреплённые предметными знаниями.

1.3 Интерактивные и диагностические протоколы

Интерактивные бенчмарки находятся на стадии становления. Например, инструмент BeatDiversity позволяет вести диалоговую отладку: сначала формируется отчёт об ошибке, затем последовательно уточняются сообщения об ошибках, однако такие решения не используют автоматизированные модели-судей. Предложение Developer Experience Evaluation (DXEval) описывает двухшаговый процесс «диагностика и исправление» для патчей кода, но не формализует предметно-специфические чек-листы и многоуровневые уровни навыков.

Второй этап работы OMLS-Bench развивает эти идеи, вводя чек-листы для каждой задачи (например, проверка состояния Container Network Interface (CNI), анализ правил файервола) и применяя выделенную модель-судью, что обеспечивает воспроизводимую и детализированную оценку.

1.4 BIG-Bench: Многоуровневые и предметно-специфические оценки

BIG-Bench делит задачи по тематикам, но не учитывает уровень подготовки пользователя. Предметно-специфические бенчмарки (например, DevOpsSQL для CI/CD) охватывают лишь одну из сфер инженерии и один уровень сложности.

OMLS-Bench предлагает вариативность уровней от Trainee до Middle⁺, включающую по 50 вопросов с множественным выбором для каждой сферы инженерии на Этапе I и расширяющуюся за счёт интерактивной диагностики на Этапе II. Такое сочетание многоуровневого охвата и структурированной интерактивности восполняет пробелы в существующих практиках оценки.

Описанные выше ограничения существующих подходов оценки стали ключевой мотивацией для разработки системы OMLS-Bench, которая напрямую закрывает пробелы как в широте (многоуровневое покрытие), так и в глубине оценки (интерактивная диагностика).

Суммируя обзор, отметим: существующие наборы заданий демонстрируют либо широкое тематическое покрытие без учёта уровня подготовки (как в BIG-Bench), либо узкую предметную фокусировку на одной сфере и фактически одном уровне сложности (как в специализированных наборах вроде DevOpsSQL для CI/CD). При этом в большинстве работ отсутствует единая, сопоставимая сетка «домен/уровень», ограниченно представлены сценарные задачи с несколькими шагами и прозрачными критериями проверок, редко проводится независимое судейство, а воспроизводимость затруднена из-за нехватки открытых схем данных, скриптов оценки и локализованных формулировок. Эти ограничения не позволяют надёжно диагностировать сильные и слабые стороны моделей по конкретным областям инженерии и ступеням навыка.

2. Обзор OMLS-Bench

В ответ на выявленные пробелы предлагается OMLS-Bench – многоуровневый бенчмарк, сочетающий широту тематического охвата с глубиной процедурной проверки. Его новизна заключается в объединении девяти инженерных доменов с градацией уровней от Trainee до Middle⁺, в двухэтапной системе оценки (Этап I – стандартизированные задания с множественным выбором и строгим форматом вывода <result>...</result>, Этап II – сценарные задания с контрольными списками и независимым «судьёй»), а также в формализации метрик Tier Accuracy, Domain Accuracy и интегрального показателя OPS. Дополнительно обеспечиваются воспроизводимость и сопоставимость за счёт открытых артефактов (JSON-схемы, русскоязычные шаблоны промптов, скрипт оценки) и единообразного конвейера запуска. В следующем разделе мы переходим к архитектуре и компонентам OMLS-Bench, начиная с перечня сфер программной инженерии и уровней навыков, на которых строится дальнейшая методика.

2.1 Сфераы программной инженерии и уровни навыков

OMLS-Bench охватывает девять ключевых сфер инженерии, каждая из которых отражает отдельные области знаний и наборы инструментов:

- Back-end разработка – система оценки OMLS-Bench охватывает следующие языки и фреймворки для разработки серверной логики: Go, Python, Java, Kotlin, Node.js/TypeScript, C++, C#, включая оценку спроектированного API, интеграции с базами данных и оптимизацию производительности;
- Front-end разработка – система оценки охватывает следующие фреймворки и технологии: React, Angular, Vue, Svelte, jQuery, акцентируя внимание на компонентной архитектуре, управлении состоянием, доступностью и инструментами сборки.
- Разработка мобильных приложений – система оценки охватывает кросс-платформенные и нативные инструменты, такие как Flutter/Dart, Swift/SwiftUI, Kotlin/Jetpack Compose, React Native, Qt, а также особенности развертывания и настройке конфигурации (iOS Info.plist, Android Manifest, Podfile, Gradle);
- DevOps – в части CI/CD уделяется внимание пайплайнам (Jenkins, GitLab CI, GitHub Actions), оркестрации контейнеров (Docker, Kubernetes, Helm), инфраструктуре как коду (Terraform, Ansible), мониторингу и логированию (Prometheus, Grafana, ELK), а также в расчет берутся лучшие практики для развертывания облачных платформ;
- Аналитика данных – библиотеки для работы с данными и визуализацией (Pandas, NumPy, Dask, Matplotlib, Seaborn), статистические методы, обработка временных рядов и исследовательские рабочие процессы с данными;
- Машинное обучение – фреймворки для разработки и развертывания моделей (TensorFlow, Keras, PyTorch, ONNX, TensorFlow Lite, GGUF, CUDA), оценка производится с учетом тренировочных циклов, стратегии оптимизации, квантизации и конвейеры вывода;
- Big Data – SDK и библиотеки для анализа больших данных, а также потенциальные проблемы при обработке и сборе данных;
- IoT – использование платформ для разработки ПО на уровне устройств IoT, понимание уровней передачи данных, языков C, C++ для автоматизаций и обработки данных в рамках небольших систем с большими потоками данных;
- Встроенные системы.

Каждая из вышеперечисленных сфер инженерии в OMLS-Bench может быть оценена по пяти уровням компетенций. Каждый уровень отражает глубину понимания и сложность задач, которые способен решать специалист (или модель), и характеризуется следующим образом:

- Trainee – уровень начальной подготовки, включающий освоение базовых понятий и синтаксиса, а также ответы на простые фактические и определяющие вопросы;
- Junior – уровень, предполагающий умение применять базовые инструменты выбранной сферы, работать с короткими фрагментами кода или выполнять несложные задачи по конфигурации;

- Junior⁺ – промежуточный уровень, на котором требуется последовательное рассуждение и умение сочетать два или более основных концепта при решении задач;
- Middle – уровень, связанный с решением более сложных и нетривиальных задач, требующих написания кода или конфигураций средней длины, а также учёта вопросов производительности и обработки ошибок;
- Middle⁺ – продвинутый уровень, близкий к реальным инженерным сценариям, где необходимо интегрировать различные фреймворки, проводить отладку и выполнять диагностический анализ.

Соответствие каждого из уровней компетенций доменной сфере описано в Таблице 1.

Таблица 1
Сопоставление целей проверки на разных уровнях для доменных сфер

Доменная сфера	Уровень	Цель проверки
Back-end	Trainee	Базовые HTTP/REST, коды ответов, идемпотентность
	Junior	Проектирование эндпоинтов, параметры, пагинация, SQL-основы
	Junior ⁺	Валидация, транзакции, конкуренция, кэширование
	Middle	Производительность: N+1, индексы, пул соединений
	Middle ⁺	Надёжность и масштабирование, ограничение частоты, фоновые задачи
Front-end	Trainee	Семантика HTML, доступность, специфичность CSS, события
	Junior	Управление состоянием, формы, контролируемые компоненты
	Junior ⁺	Производительность рендеринга, мемоизация, эффекты
	Middle	Маршрутизация, разделение кода, i18n, сборка
	Middle ⁺	Согласованность SSR/CSR, гидратация, кросс-браузерность
Mobile	Trainee	Жизненный цикл экранов, базовые компоненты UI
	Junior	Разрешения, навигация, работа с интентами/deeplink
	Junior ⁺	Уведомления, фоновые задачи, офлайн-хранилище
	Middle	Производительность и утечки памяти
	Middle ⁺	Интеграции с платформой, токены пушей, deeplink-сценарии
DevOps	Trainee	Основы CI/CD, YAML, артефакты
	Junior	Контейнеризация, слои Dockerfile, кэш
	Junior ⁺	Развёртывания в Kubernetes, readiness/liveness
	Middle	IaC (Terraform/Helm), секреты, HPA
	Middle ⁺	Наблюдаемость, SLO/алERTы, инцидент-менеджмент
Data Analysis	Trainee	Типы данных, описательная статистика, устойчивость к выбросам
	Junior	Объединения и агрегации (pandas/SQL)
	Junior ⁺	Валидация данных, утечки, масштабирование признаков
	Middle	Планирование экспериментов, A/B-тесты, предпосылки
	Middle ⁺	Причинно-следственный анализ, DAG, ковариаты
Machine Learning	Trainee	Типы задач, базовые метрики, дисбаланс, понимание базовых моделей
	Junior	Разбиение train/val/test, кросс-валидация, знание типов слоев, базовых оптимизаций
	Junior ⁺	Регуляризация, гиперпараметры, ранняя остановка, понимание сложных
	Middle	Мониторинг, а также дрейф данных/концепции
	Middle ⁺	Надёжность, калибровка, устойчивость

Доменная сфера	Уровень	Цель проверки
Big Data	Trainee	Batch vs streaming, основы экосистемы
	Junior	Партиционирование, файловые форматы, Spark SQL
	Junior ⁺	Join-ы и шифлы, broadcast, кеширование
	Middle	Окна, checkpointing, управление состоянием
	Middle ⁺	Отказоустойчивость, «ровно один раз»
IoT	Trainee	Базовые протоколы (MQTT/HTTP), QoS
	Junior	Поступление данных, edge vs cloud
	Junior ⁺	Энергопотребление, батчирование, периодичность
	Middle	OTA-обновления, поэтапный откат
	Middle ⁺	Безопасность, ключи, прошивки
Embedded Systems	Trainee	Память, целочисленная/фиксированная арифметика
	Junior	Прерывания, таймеры, дебаунс
	Junior ⁺	RTOS: задачи и приоритеты, взаимные блокировки, ABI
	Middle	DMA, выравнивание, обмен с периферией
	Middle ⁺	Определённость поведения, watchdog, требования безопасности

2.2 Двухэтапная система оценки

Предлагаемая система оценки OMLS-Bench включает в себя два этапа, каждый из которых нацелен на проверку разных аспектов компетентности LLM в инженерных задачах. Особенности этапов описаны ниже:

- Этап I: Масштабное тестирование с выбором ответа. На этом этапе проводится крупномасштабная статическая оценка базовых знаний и навыков рассуждения. Для каждой из девяти сфер и пяти уровней компетенций подготовлен пул из 50 вопросов с выбором ответа, что в сумме составляет 2250 заданий. Вопросы и варианты ответов хранятся в формате JSON, а унифицированный конвейер (eval_mc.py) автоматизирует рендеринг вопросов, вызов модели (через Hugging Face, Ollama, OpenAI или Claude APIs) и извлечение ответа. Результаты оцениваются по точности для каждого вопроса, каждой сферы и уровня, после чего агрегируются в показатели точности по уровням и сферам, а также в интегральный показатель – Общий Индекс Эффективности (OPS) [15].
- Этап II: Интерактивная диагностика с участием LLM. Этот этап расширяет оценку в сторону интерактивного решения задач. Модель-кандидат получает диагностический запрос, описывающий реальную инженерную проблему (например, некорректно настроенную сетевую службу). В первом ответе модель пытается провести анализ первопричины. Затем последовательность уточняющих вопросов – основанная на специализированных методиках устранения неполадок в данной сфере – направляет модель к проверке отдельных подсистем (логи, параметры конфигурации, разрешения и т. п.). Отдельная модель-судья анализирует как ответы модели-кандидата, так и выполненный по чек-листву процесс, вычисляя детализированный диагностический балл. В настоящее время Этап II находится в стадии активной разработки: прорабатываются чек-листы, инженерия промптов и калибровка модели-судьи.

В совокупности эти два этапа обеспечивают баланс широты и глубины: Этап I позволяет количественно оценить фундаментальные знания в широком масштабе, а Этап II – провести многошаговую, тонкую диагностику, более точно отражающую реальные инженерные рабочие процессы [11].

С учётом этой архитектуры далее в работе подробно рассматривается реализация каждого этапа. На Этапе I ключевую роль играют стандартизированные JSON-схемы заданий и шаблоны промптов, обеспечивающие воспроизводимость результатов.

2.3 JSON-схемы и шаблоны промптов

Каждый вопрос с выбором ответа из перечисленных вариантов в Этапе I представлен в виде JSON-объекта со стандартизованными полями. В их число входят идентификатор задания, формулировка задачи, набор вариантов ответа и метка правильного варианта. На рисунке 1 приведён пример такой схемы вместе с выводом модели.

- Каждая комбинация «сфера – уровень» содержит 50 вопросов, которые хранятся в одном JSON-массиве;
- Промпты формируются с использованием унифицированного шаблона (prompts/candidate_mc.txt.);
- В формулировках могут присутствовать блоки кода или конфигурационные фрагменты в формате YAML.

```
{  
    "id": "DOMAIN_TIER_XXX",  
    "domain": "Бэкэнд",  
    "tier": "Стажёр",  
    "prompt": "<самодостаточный вопрос или фрагмент кода>",  
    "choices": {  
        "A": "<текст варианта A>",  
        "B": "<текст варианта B>",  
        "C": "...",  
        "D": "...",  
        "E": "...",  
        "F": "...",  
        "G": "...",  
        "H": "..."  
    },  
    "answer": "D"  
}
```

Рис. 1 – Пример JSON-схемы вопроса для модели-кандидата

Для обеспечения воспроизводимости модели-кандидаты получают задания в едином формате. На рисунке 2 показан шаблон входного промпта.

Модель должна указать свой ответ в теге <result> на первой строке, после чего может следовать краткое пояснение.

Теги результата (<result>X</result>) позволяют надёжно извлекать ответы с помощью регулярных выражений.

Лимит токенов установлен с запасом (например, 40), чтобы, помимо самого выбора, модель могла добавить лаконичное объяснение.

Каждый диагностический сценарий в Этапе II представлен в виде структурированной JSON-записи, включающей как общий контекст задачи, так и чек-лист для оценки. Ниже приведено описание элементов JSON-схемы:

- Общий контекст: единое описание инженерной неисправности или системной ошибки, подлежащей анализу.
- Вопрос 1: побуждает модель-кандидата предложить первоначальную гипотезу о причине сбоя.
- Вопрос 2: уточняет или требует дополнительных проверок на основе того же контекста.
- Чек-лист: список ожидаемых действий от модели-кандидата, с помощью которого модель-судья оценивает ответ.

ЗАДАЧА С ВЫБОРОМ ОТВЕТА

Верните ответ **внутри XML-тегов** в самой первой строке, например: `<result>A</result>`
После этого вы **можете** добавить краткое объяснение.

ВОПРОС:

{{ prompt }}

ВАРИАНТЫ:{% for k, v in choices.items() -%}
{{ k }}. {{ v }}
{% endfor %}**ОТВЕТ:**

Рис. 2 – Промпт для LLM Large Language Models

На рисунке 3 показан пример JSON-схемы согласно вышеописанной структуре, включающей поля для общего контекста, двух диагностических вопросов и чек-листа необходимых шагов оценки.

```
{
  "id": "BACK_MIDDLE_007",
  "context": "<подробное описание сбоя из реального мира>",
  "questions": [
    "Какова наиболее вероятная первопричина?",
    "Какие дополнительные проверки вы бы выполнили?"
  ],
  "checklist": [
    "Проверьте состояние сервиса",
    "Изучите журналы ошибок",
    "Проверьте порты в файерволе",
    "Проверьте синтаксис конфигурации",
    "Оцените права пользователей"
  ]
}
```

Рис. 3 – JSON-схема вопроса на Этапе II

Для обеспечения согласованности оценки на Этапе II используются стандартизованные шаблоны промптов как для модели-кандидата, так и для модели-судьи. На рисунке 4 представлен шаблон промпта для кандидата, который задаёт воспроизводимую логику диагностического рассуждения модели.

```
СЦЕНАРИЙ:  
{{ context }}  
  
ВОПРОС 1:  
{{ questions[0] }}  
  
ВОПРОС 2:  
{{ questions[1] }}
```

Рис. 4 – Шаблон промпта для модели-кандидата

На рисунке 5 показан соответствующий шаблон промпта для модели-судьи, который описывает, каким образом чек-лист применяется к ответам кандидата.

```
ВОПРОСЫ:  
1) {{ questions[0] }}  
2) {{ questions[1] }}  
  
ВАРИАНТЫ ОТВЕТОВ:  
Ответ 1:  
{{ answer1 }}  
  
Ответ 2:  
{{ answer2 }}  
  
ЧЕК-ЛИСТ:  
{% for item in checklist -%}  
- {{ item }}  
{% endfor %}  
  
Для каждого пункта чек-листа укажите «✓», если он упомянут, и «✗» – если нет.  
Дайте итоговую диагностическую оценку (0–100) на основе доли покрытых пунктов.
```

Рис. 5 – Шаблон промпта для модели-судьи

На рисунках 3-5 продемонстрирован полный процесс Этапа II: от формулировки сценария до рассуждений модели-кандидата и выставления оценки от модели-судьи.

3. Этап I: Оценка на основе вопросов с вариантами ответов

Этап I обеспечивает крупномасштабную, стандартизированную оценку базовых инженерных знаний с помощью вопросов с выбором ответа. Этот этап разработан с упором на воспроизводимость и широкий охват: он проверяет фактические знания, понимание семантики API, синтаксис конфигураций и концептуальное рассуждение в девяти сферах инженерии и на пяти уровнях компетенций.

3.1 Генерация заданий и сферы инженерии

Всего подготовлено 2 250 вопросов: по 50 на каждую комбинацию «сфера инженерии + уровень» (9 доменных сфер инженерии и 5 уровней, описанных в предыдущей главе). Эксперты по соответствующим областям курируют формулировки заданий, чтобы обеспечить их актуальность и разнообразие, выбирая примеры из реальных сценариев и распространённых ошибок.

Каждый вопрос является автономным и включает все необходимые фрагменты кода или конфигурации [10]. Девять сфер инженерии, описанных в работе ранее, охватывают репрезентативный спектр дисциплин программной инженерии. Уровни навыков варьируются от базового синтаксиса (Trainee) до продвинутого диагностического анализа (Middle⁺) [5].

3.2 Промпт-инженерия и пакетная обработка

Согласно разработанным требованиям к системе оценки OMLS-Bench все вопросы и варианты ответов хранятся в JSON-файлах, организованных по уровням компетенций.

Унифицированный шаблон (prompts/candidate_mc.txt) выполняет функцию стандартизации инструкций для моделей. Разработанный стандарт промптов должен отвечать следующим требованиям:

1. Ответ должен быть указан внутри тега <result> на первой строке, с возможным кратким пояснением ниже.
2. Скрипт оценки eval_mc.py [1] должен поддерживать работу с платформами Hugging Face, Ollama, OpenAI и Anthropic через фабрику провайдеров [4] и автоматизировать следующие действия:
 - Загрузку ирендеринг промптов;
 - Вызов модели с настраиваемыми параметрами температуры и лимитом токенов;
 - Извлечение ответов из тегов <result> или, при необходимости, понимание выбранного варианта по единственной букве;
 - Накопление корректности ответов по каждому вопросу и запись результатов в каталог с отметкой времени;
3. Спроектирована структура входных параметров eval_mc.py:
 - --model (*обязательный*):
 - Идентификатор модели или эндпоинта.
 - Поддерживаются варианты:
 - Hugging Face Hub (например: mistralai/Mistral-7B-v0.2);
 - Ollama (например: ollama/qwen2.5-coder:32b);
 - OpenAI API (например: openai/gpt-4);
 - Anthropic Claude (например: claude/clause-2);
 - HTTP-эндпоинт вида http://...?model=NAME.
 - --level (*обязательный*). Уровень теста, соответствующий каталогу с заданиями в tests/<level> (например: trainee, junior, junior+, middle, middle+).
 - --max_tokens (необязательный, int, по умолчанию 40). Максимальное число токенов в ответе модели.
 - --temperature (необязательный, float, по умолчанию 0.0). Параметр стохастичности генерации (0 = детерминированный вывод).

3.3 Оценочные метрики и агрегирование результатов

Показатель точности (Accuracy) вычисляется на трёх уровнях: по вопросу, по сфере и по уровню компетенции.

Пусть DDD – множество доменов ($|D|=9$), TTT – множество уровней ($|T|=5$), а в каждой паре (t,d) задано ровно $n=50$ вопросов. Обозначим $y_{t,d,i} \in \{0,1\}$ – индикатор корректности ответа модели на i -й вопрос уровня t в домене d (1 – верно, 0 – неверно), $i=1,\dots,n$

Tier Accuracy. Для уровня $t \in T$:

$$TierAcc(t) = \frac{1}{|D| \times n} \sum_{d \in D} \sum_{i=1}^n y_{t,d,i} \quad (1)$$

где $TierAcc(t)$ – точность на уровне t (например: Trainee, Junior или др.), $|D|$ – число доменов в множестве D (кардинальность множества D; здесь $|D|=9$), n – число вопросов для каждой пары «уровень $t \times$ домен d », $\sum_{d \in D} \sum_{i=1}^n y_{t,d,i}$ – суммарное число корректных ответов модели на уровне t по всем доменам и вопросам, $d \in D$ – перебор доменов из множества доменов D, i – индекс вопросов внутри пары (t,d) , $y_{t,d,i}$ – индикатор правильности ответа на i -й вопрос уровня t в домене d (1 – верно, 0 – неверно).

Для каждого уровня Tier Accuracy определяется как доля правильно отвеченных вопросов во всех девяти сферах (450 вопросов).

Аналогичным образом вычисляется и Domain Accuracy. Для каждой сферы программной инженерии Domain Accuracy равна доле верных ответов среди её 250 вопросов (5 уровней × 50 вопросов).

Общий индекс эффективности (OPS) агрегирует точности по уровням с использованием настраиваемых весов. Формула представлена ниже:

$$OPS = \sum_i w_i \times Acc_i \quad (2)$$

где OPS – общий индекс эффективности модели, $\sum_i w_i$ – сумма произведений веса уровня и точности на этом уровне по всем уровням, Acc_i – точность на i -м уровне компетенций.

По умолчанию используется равное взвешивание, что обеспечивает сбалансированное представление результатов по всем уровням компетенций. Итоги выводятся в формате JSON и в табличной форме, что облегчает сравнение моделей и уровней.

Этап I позволяет количественно оценить базовые знания в широком масштабе, но он не охватывает интерактивное диагностическое рассуждение. Этую задачу решает Этап II, реализованный через протокол LLM-in-the-loop, который описан в следующем разделе.

4. Этап II. Протокол диагностики и оценки LLM-in-the-Loop

Этап II расширяет парадигму оценки за пределы статических форматов «вопрос-ответ», вводя структурированную, многошаговую диагностическую оценку. На этом этапе каждая ситуация предоставляет модели-кандидату общий контекст, специфичный для данной сферы, и последовательность из двух целевых вопросов, имитирующих реальные рабочие процессы по устранению неполадок. Процесс специально построен так, чтобы фиксировать как широту первоначального диагностического рассуждения модели, так и глубину её последующих исследовательских шагов.

Отдельная модель-судья оценивает ответы кандидата по заранее определённому чек-листу критических действий, обеспечивая согласованность, воспроизводимость оценок и позволяя проводить детальный анализ диагностических возможностей модели по сферам и уровням компетенции.

4.1 Структура интерактивного сценария

Каждый сценарий включает три ключевых компонента:

- Контекст: автономное описание проблемы (например: «Плагин Container Network Interface (CNI) кластера Kubernetes не инициализируется, Поды остаются в состоянии Pending»).
- Вопрос 1 (Диагностика): «Какова наиболее вероятная первопричина проблемы?»
- Вопрос 2 (Уточнение): «Какие дополнительные проверки вы бы провели, чтобы подтвердить или уточнить вашу диагностику?»

Ниже описаны ключевые компоненты сценария, включающие контекст проблемы и два целевых вопроса, которые моделируют реальные шаги инженера при диагностике неполадок.

4.2 Формат оценки моделью-судьёй

Модель-судья в качестве заключительного шага в формировании оценки выдаёт JSON-объект с тремя полями:

- Covered – отображает каждый пункт чек-листа на логическое значение, показывающее, выполнен ли шаг;
- Score – процент выполненных пунктов;
- Missing – перечень пропущенных диагностических шагов.

Двухэтапный протокол LLM-in-the-loop позволяет зафиксировать как широту первоначального рассуждения, так и глубину последующих проверок, обеспечивая детализированное понимание диагностических возможностей модели [9].

После описания обоих этапов фреймворка следующим шагом представляется экспериментальная установка, включая выбор моделей, вычислительное окружение и распределение заданий [14].

5. Тестирование OMLS-Bench

Для проверки работы разработанного фреймворка OMLS-Bench было организовано тестирование с участием различных моделей, аппаратного окружения и распределения заданий.

5.1 Объекты тестирования

Для тестирования были выбраны десять публично доступных LLM. Среди выбранных моделей представлены разнообразные архитектуры, размеры и способы доступа. Перечень моделей представлен в таблице 2.

Таблица 2
Список использованных LLM

Модель	Размер	Провайдер
Qwen-2.5-coder-32B	32B	Alibaba Cloud
Qwen-2.5-coder-7B	7B	Alibaba Cloud
Qwen-2.5-coder-3B	3B	Alibaba Cloud
Qwen-2.5-coder-1.5B	1.6B	Alibaba Cloud
Devstral-24B	23.8B	Mistral AI SAS
Mistral-NeMo-12B	12B	Mistral AI SAS
Gemma3-1B	1B	Google LLC
Gemma3-4B	4B	Google LLC
Gemma3-12B	12B	Google LLC
Gemma3-27B	27B	Google LLC

Все модели были локально развернуты и вызывались через API Ollama, что обеспечивало унифицированный доступ к моделям.

5.2 Аппаратное обеспечение и окружение

Тестирование проводилось на следующей конфигурации:

- ОС: Windows 11
- CPU: AMD Ryzen 9 7950X
- GPU: NVIDIA GeForce RTX 5090
- Оперативная память: 64 GB DDR4
- Ollama: 0.11
- Скрипт оценки: eval_mc.py (используется для Этапа I) с параметром --model ollama/<model>

5.3 Распределение заданий по сфере инженерии и уровню компетенций

Для тестирования задания распределялись следующим образом:

- Сфера: Back-end, Front-end, Mobile, DevOps, Data Analysis, Machine Learning, Big Data, IoT, Embedded Systems;
- Уровни: Trainee, Junior, Junior⁺, Middle, Middle⁺;
- Количество вопросов: 50 на каждую комбинацию «сфера–уровень», всего 2 250 вопросов на все комбинации;
- Выполнение: каждая модель последовательно обрабатывала все 2 250 промптов, уровень за уровнем;
- Пакетная обработка: промпты отправлялись группами по 25 для оптимизации пропускной способности;
- Повторения: одна итерация с детерминированным декодированием (temperature = 0).

Такое структурированное распределение обеспечивает воспроизводимость результатов и позволяет корректно сравнивать производительность моделей по всем сферам и уровням компетенции.

6. Анализ результатов

6.1 Этап I: Точность ответов по уровням и сферам программной инженерии

В этом разделе представлены эмпирические результаты OMLS-Bench, с акцентом как на уровне компетенций (tiers), так и на уровне сфер инженерии (domains). Дополнительно приводится формализованный количественный анализ стратификации моделей [6].

Таблица 3
Результаты OMLS-Bench

Модель	Уровень компетенций				
	Trainee	Junior	Junior ⁺	Middle	Middle ⁺
Qwen-2.5-coder-32B	98.67	91.55	91.78	91.56	89.11
Qwen-2.5-coder-7B	87.78	86.44	85.11	83.56	78.22
Qwen-2.5-coder-3B	65.78	59.78	57.11	55.33	47.77
Qwen-2.5-coder-1.5B	53.78	50.22	48.89	47.11	36.23
Devstral-24B	94.89	93.78	90.67	89.33	75.12
Mistral-NeMo-12B	85.55	81.33	80.89	76.89	66.16
Gemma3-1B	50.09	46.67	43.11	42.21	42.24
Gemma3-4B	63.11	62.22	58.00	55.12	45.11
Gemma3-12B	90.22	84.89	83.78	82.44	78.44
Gemma3-27B	92.89	89.76	88.22	86.67	86.00

Таблица 3 демонстрирует точность ответов по уровням компетенции для всех десяти моделей. Наблюдается чёткая стратификация: лучшая модель – Qwen-2.5-coder-32B – достигла точности 98.67% на уровне Trainee и сохранила высокий результат 89.11% на уровне Middle⁺. В то же время небольшие модели, такие как Gemma3-1B, не превышали 50% на всех уровнях. Таким образом, разрыв между топовыми и слабыми моделями превысил 45 процентных пунктов, что указывает на сильную зависимость точности от масштаба модели.

Таблица 4
Точность по сферам для уровня Middle

Модель	Сфера программной инженерии							
	Back-end	Big Data	Data Analysis	DevOps	Embedded systems	Front-end	Machine Learning	Mobile
Qwen-2.5-coder-32B	94	96	92	90	92	90	92	84
Qwen-2.5-coder-7B	86	86	74	86	90	82	92	68
Qwen-2.5-coder-3B	82	62	76	62	46	60	66	34
Qwen-2.5-coder-1.5B	32	60	34	54	44	58	54	34
Devstral-24B	92	88	90	90	94	88	92	76
Mistral-NeMo-12B	72	88	66	84	76	76	82	62
Gemma3-12B	84	90	84	78	78	88	80	56
Gemma3-27B	90	92	96	84	88	90	84	66

Таблица 4 отражает точность по отдельным сферам на уровне Middle. Видно, что задания по сферам Back-end и Front-end выполняются наиболее точно относительно остальных сфер, ведущие модели демонстрируют здесь более 90% точности. Наиболее сложными остаются сферы Mobile и Embedded: например, Qwen-2.5-coder-3B показала лишь 34% по направлению Mobile. Это свидетельствует о неравномерности распределения информации по различным сферам программной инженерии в обучающих наборах данных: задачи, связанные с веб-разработкой, решаются более надёжно, чем специализированные области вроде встроенных систем.

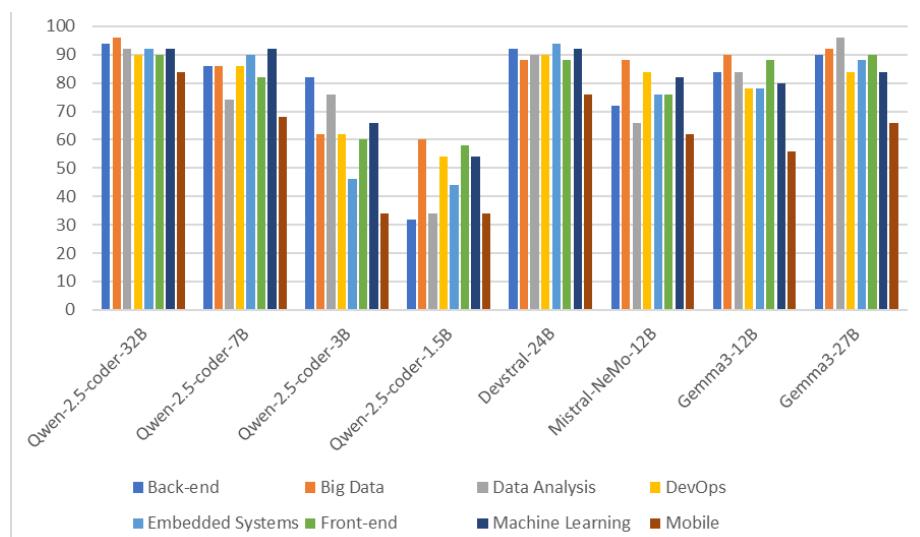


Рис. 6 – Распределение результатов различных LLM по сферам инженерии на уровне Middle

Рисунок 6 визуализирует указанные различия. Особенно заметно падение точности на задачах Mobile и Embedded, что резко контрастирует с устойчивыми результатами в Back-end и Data Analysis. Эта динамика подчёркивает, что успех модели во многом определяется представленностью сферы инженерии в обучающих данных.

6.2 Количественный анализ

Для формализации полученных результатов были рассчитаны агрегированные статистики по уровням компетенции и по сферам инженерии.

Тенденции по уровням компетенций. Во всех моделях средняя точность на уровне Trainee составила 75.2%, тогда как на уровне Middle⁺ снизилась до 65.1%. Это отражает среднее падение примерно на 10 процентных пунктов по мере увеличения сложности заданий. Кроме того, разброс значений между моделями увеличился: стандартное отклонение составило $\sigma = 15.3$ на уровне Middle⁺ против $\sigma = 9.8$ на уровне Trainee. Это подтверждает, что более сложные задачи усиливают различия между моделями.

Тенденции по сферам. Наибольшая медианная точность зафиксирована в сферах Back-end (88%) и Front-end (86%), что согласуется с их высокой представленностью в обучающих данных. В противоположность этому, направления Mobile и Embedded оказались наименее успешными: медианные значения составили всего 58% и 61%. Таким образом, можно сделать вывод о недостаточной представленности определённых сфер инженерии в обучающих данных, что систематически снижает производительность LLM.

Эффект насыщенности данных. Крупные модели, такие как Qwen-2.5-coder-32B, Devstral-24B и Gemma3-27B, стабильно показывали точность выше 85-90% практически во всех сферах и уровнях. Модели же с количеством параметров менее 7B быстро теряли качество уже начиная с уровня Junior⁺, что подчёркивает критическую важность как масштаба, так и разнообразия обучающих данных для устойчивой инженерной продуктивности.

В совокупности описанные выше результаты дают как качественные, так и количественные подтверждения того, что OMLS-Bench эффективно выявляет систематические различия между моделями – по архитектуре, числу параметров и охвату сфер программной инженерии.

Исходя из оценок OMLS-Bench, наиболее сложными для всех протестированных LLM оказались задачи в областях мобильной разработки и встроенных систем. Эти направления требуют межплатформенной экспертизы, знания в области современных стремительно развивающихся инструментов и умения работать с гетерогенными средами выполнения. Напротив, веб-ориентированные сферы, такие как Back-end и Front-end, показали наивысшие результаты, что объясняется богатым и структурированным присутствием в обучающих наборах данных.

Такое различие выявляет важное ограничение: современные пайплайны обучения LLM склонны переоценивать высокочастотные сферы и одновременно недопредставлять более узкие, но не менее значимые инженерные компетенции.

Подводя итоги вышесказанного, можно утверждать, что полученные с помощью OMLS-Bench выводы формируют системное представление об уровне владения знаниями LLM в различных сферах и на разных уровнях компетенции.

Заключение

В данном исследовании представлена система оценки больших языковых моделей OMLS-Bench (Open Multi-Level Skills Benchmark) – представляющая из себя двухэтапный фреймворк для оценки больших языковых моделей (LLM) в области программной инженерии по девяти доменным областям и пяти уровням компетенции. В отличие от существующих бенчмарков, которые либо концентрируются на отдельных подзадачах, либо используют единый уровень сложности, OMLS-Bench сочетает масштабируемое тестирование в формате множественного выбора со структурированной интерактивной диагностикой. Такой подход позволяет одновременно фиксировать как широту базовых знаний, так и глубину пошагового решения инженерных задач.

Результаты тестирования первого этапа, проведенного на десяти передовых LLM, выявили явную стратификацию по масштабу моделей и по доменам. Крупные модели стабильно демонстрировали точность выше 85-90% в хорошо представленных областях, таких как Back-end и Front-end разработка. В то же время меньшие по размеру модели значительно уступали, особенно в направлениях Mobile и Embedded systems, где обучающие данные ограничены. Эти результаты подчёркивают двойственную значимость как мощности моделей, так и полноты охвата специфических доменов при обучении. Более того, они показывают, что даже самые сильные универсальные LLM сталкиваются с систематическими слабостями в специализированных инженерных задачах [7].

Интеграция многоуровневой оценки с протоколом интерактивной диагностики делает OMLS-Bench целостным и воспроизводимым инструментом для оценки LLM в инженерных задачах. Такая архитектура устраняет на выявленные в предыдущих исследованиях пробелы: она выходит за рамки статического тестирования, обеспечивая более детализированную диагностическую оценку, и при этом остаётся расширяемой по доменам и моделям [2].

Совокупность полученных результатов не только позволяет количественно зафиксировать текущие возможности, но и выявляет структурные ограничения, которые необходимо преодолеть, чтобы LLM могли стать надёжными помощниками инженеров ПО [3]. В рамках будущих исследований планируется расширение второго этапа: уточнение доменных чек-листов, повышение реалистичности заданий и включение сценариев устранения неполадок, что позволит максимально приблизить тестирование к условиям профессиональной практики.

Таким образом, OMLS-Bench будет продолжать развиваться как бенчмарк, который не только оценивает современные модели, но и направляет развитие будущих, более ориентированных на практику LLM [8].

Список использованной литературы

4. Ануров А. О., Булгаков Г. Г., Ярушев С. А. OMLS-Bench [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/Blgkff/OMLS-BENCH> (дата обращения: 14.06.2025).
5. D. Hendrycks et al., “Measuring Massive Multitask Language Understanding,” in Proc. Int. Conf. Learn. Represent. (ICLR), 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2009.03300>
6. T. B. Brown et al., “Language Models are Few-Shot Learners,” Adv. Neural Inf. Process. Syst. (NeurIPS), vol. 33, pp. 1877–1901, 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2005.14165>
7. A. Wang et al., “GLUE: A Multi-Task Benchmark and Analysis Platform for Natural Language Understanding,” in *Proc. 2019 Conf. Empir. Methods Nat. Lang. Process. 9th Int. Jt. Conf. Nat. Lang. Process. (EMNLP-IJCNLP)*, pp. 353–361, 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1804.07461>
8. A. Wang et al., “SuperGLUE: A Stickier Benchmark for General-Purpose Language Understanding Systems,” in Proc. 3rd Workshop Eval. Compar. NLP Syst., 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1905.00537>
9. S. Lu et al., “CodeXGLUE: A Machine Learning Benchmark Dataset for Code Understanding and Generation,” in Proc. 2021 Conf. Empir. Methods Nat. Lang. Process. (EMNLP), 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2102.04664>
10. M. Chen et al., “Evaluating Large Language Models Trained on Code,” arXiv preprint arXiv:2107.03374, 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2107.03374>
11. M. Mitchell and D. C. Krakauer, “The Debate Over Understanding in AI’s Large Language Models,” arXiv preprint arXiv:2210.13966, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2210.13966>
12. D. Hendrycks et al., “Aligning AI With Shared Human Values,” in Proc. Int. Conf. Learn. Represent. (ICLR), 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2008.02275>
13. M. Suzgun et al., “Challenging BIG-Bench Tasks and Whether Chain-of-Thought Can Solve Them,” in Find. Assoc. Comput. Linguist.: ACL, pp. 4670–4685, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2210.09261>
14. M. Kazemi et al., “BIG-Bench Extra Hard,” arXiv preprint arXiv:2502.19187, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2502.19187>
15. H. Li et al., “CMMLU: Measuring Massive Multitask Language Understanding in Chinese,” in Find. Assoc. Comput. Linguist.: ACL, pp. 6543–6558, 2024. [Online]. Available: <https://aclanthology.org/2024.findings-acl.671>
16. Y. Wang et al., “MMLU-Pro: A More Robust and Challenging Multi-Task Language Understanding Benchmark,” arXiv preprint arXiv:2406.01574, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2406.01574>
17. L. Austin et al., “Program Synthesis with Large Language Models,” in NeurIPS Workshop Mach. Learn. Syst., 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2108.07732>
18. K. Cobbe et al., “Training Verifiers to Solve Math Word Problems,” Adv. Neural Inf. Process. Syst. (NeurIPS), vol. 34, 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2110.14168>
19. A. Radford et al., “Language Models are Unsupervised Multitask Learners,” OpenAI Tech. Rep., 2019. [Online]. Available: https://cdn.openai.com/better-language-models/language_models_are_unsupervised_multitask_learners.pdf



КОНТАКТЫ

Редакция

+7 (495) 967-77-01
jurnal@vniias.ru

Адрес

АО «НИИАС»,
Россия, г. Москва, Орликов переулок, д.5, стр.1 ком. 824 1

+7 (495) 967-77-06
info@vniias.ru

