

УДК 656.212:681.532

РОБОТИЗАЦИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

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

E-mail: a.dolgiy@vniias.ru

Хатламаджиян Агоп 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 «NIAS», Russia (Moscow), Email: a.dolgiy@vniias.ru

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

E-mail: a.hatlamadzhiyan@vniias.ru

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

E-mail: a.ozerov@vniias.ru

Alexander V. Bochkov, Doctor of Technical Sciences, Scientific Secretary, JSC «NIAS», 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 «Индустрия 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. Используются 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 микротрещин 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 простой 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 четырехопорные шагающие биоморфные роботы, которые могут использоваться как автономно, так и в коллаборативном 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 многозвенных 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 коллаборации, 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 робот 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).

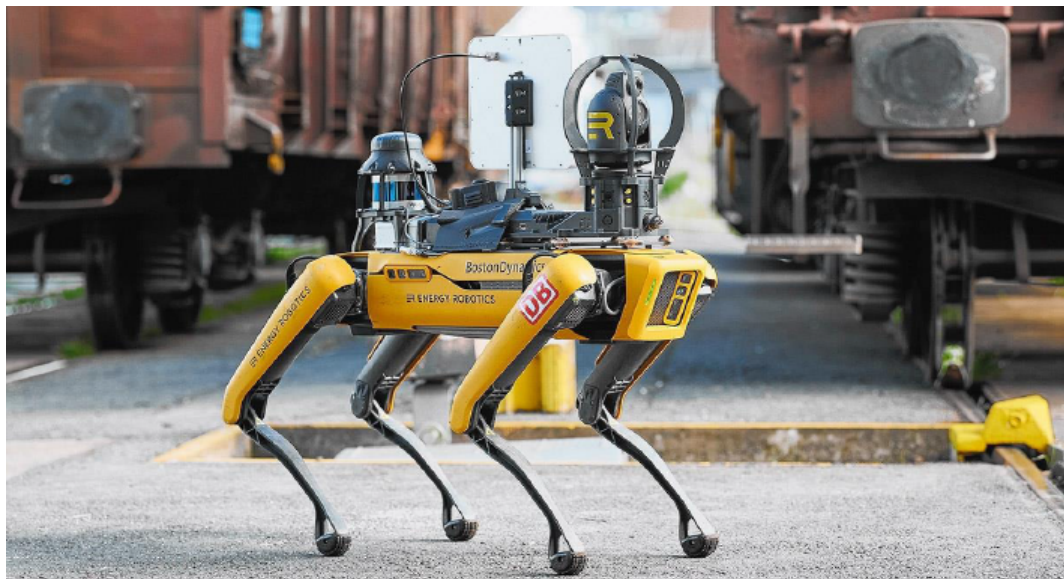


Рис. 2 – Робот Spot компании Boston Dynamics, применяемый корпорацией Deutsche Bahn для инспекции подвижного состава

Spot способен самостоятельно перемещаться по путям и спускаться в смотровые каналы, 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 передает 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 оснащённости 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 управляется 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	Требуется свободный путь	Высокая	Полная (автономный маршрут)
ANYmal	Мобильн.	Ходовые части, низ вагонов	Доступ в опасные зоны, устойчивость	Ограниченная 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)	Требуется интеграция в депо	Средняя	Средняя (работает по заданной программе)
Spot (Deutsche Bahn)	Мобильн.	Подвижной состав, территория депо	Высокая проходимость, адаптивность	Ограниченное 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, RHIS1005, 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, специализирующегося 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 коллаборативный 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)

² Особенно 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 антикоррозионной 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 железных 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 hyberBots для ремонта и строительства новых подземных туннелей для региональной железнодорожной инфраструктуры Великобритании [27]. Роботы способны к 3D-печати оболочек туннелей и разворачиванию строительных материалов непосредственно на землю.

ОАО «Российские железные дороги» внедряет роботизированные системы для обеспечения бесперебойного функционирования сортировочных станций, включая автоматическое растормаживание 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, оснащённый 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 человеко-машинного 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 помощь человека в 85% необходимых ситуаций, при этом оператор контролирует работу только 25% времени эксперимента. Это обеспечивает оптимальный баланс между автономностью и контролем со стороны человека.

Станционные роботизированные системы включают модули человеко-машинного 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-технология 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-гида [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 преимуществ 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, формы 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 геополитической 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 ограничивают 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, опасющегося сокращения рабочих мест. Подготовка квалифицированных кадров требует времени и значительных инвестиций в образовательные программы, при этом текущие темпы подготовки не успевают за скоростью 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 (eLogan), 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 протяженных 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 управленческих 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 переосмысления 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 коллаборативных 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 м²/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 коллаборативные 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 железных 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 достигнутый эффект	Основные ограничения и барьеры внедрения	Перспективы развития
1. Автономные мобильные роботы (AMR) для диагностики инфраструктуры и подвешивки состава <i>Проблема: Низкая скорость, частота и точность ручного осмотра; риск для персонала.</i>	- Высокая скорость обследования (до 200 км/ч). - Непрерывный сбор данных в реальном времени. - Доступ в опасные/труднодоступные зоны (канавы, тоннели). - Снижение зависимости от человеческого фактора.	- Высокая первоначальная стоимость систем. - Ограниченное время автономной работы (проблема энергообеспечения). - Сложности навигации в GPS-тенях (тоннели) и при плохих погодных условиях. - Проблемы кибербезопасности и стабильной связи на удаленных участках.	- Повышение автономности за счет новых источников энергии (водородные элементы, беспроводная зарядка). - Развитие роевого интеллекта для координации групп роботов. - Интеграция с цифровыми двойниками для прототипного моделирования.
2. Роботизированные системы для строительства и ремонта путей <i>Проблема: Высокие риски, длительные сроки, зависимость от погоды и квалификации рабочих.</i>	- 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.	- 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.	- 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>	- Повышение комфорта и качества услуг (навигация, справки). - Круглосуточное патрулирование и мониторинг. - Снижение эксплуатационных расходов (уборка, проверка билетов). - Работа в экстремальных ситуациях (задымление, разлив химикатов).	- Социальное сопротивление и низкий уровень доверия пассажиров. - Сложность создания надежных систем Human-Robot Interaction (HRI). - Проблемы конфиденциальности (обработка персональных данных, распознавание лиц). - Ограниченная функциональность в плотном пассажиропотоке.	- Развитие эмоционального и социального интеллекта роботов для лучшего взаимодействия. - Интеграция в единую «умную» экосистему станций (IoT). - Персонализация сервисов на основе ИИ.
4. Предиктивные аналитические системы и цифровые двойники <i>Проблема: Планово-предупредительное обслуживание неэффективно; неожиданные отказы.</i>	- 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.	- 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.	- Создание самообучающихся систем, адаптирующихся к изменяющимся условиям. - Разработка стандартов для сертификации ИИ в критической инфраструктуре. - Глубокая интеграция с системами управления активами.
5. Коллаборативные роботы (коботы) для ремонтных работ <i>Проблема: Необходимость совместить гибкость человека с точностью и силой робота.</i>	- Безопасное совместное выполнение задач с человеком. - Быстрая окупаемость за счет гибкости и универсальности. - Простое программирование и переналадка. - Снижение физической нагрузки на персонал.	- Ограниченная грузоподъемность и скорость по сравнению с промышленными роботами. - Требуется высокая квалификация и переобучение персонала. - Необходимость тщательного проектирования рабочих зон для безопасности.	- 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/ICASERT.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 vysshîh uchebnyh 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. М. 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 naukoëmkie 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.
-