

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 004.896:355.691.21

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ МИРОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Озеров А.В., Начальник Международного управления, АО «НИИАС»,
Москва, Россия, E-mail: a.ozеров@vniias.ru,
Бочков А.В., д.т.н., ученый секретарь НТС, АО «НИИАС», Москва, Россия
E-mail: a.bochkov@vniias.ru

АННОТАЦИЯ

В статье представлен обзор ключевых проектов, представленных на международной выставке транспортных технологий InnoTrans¹, прошедшей в Берлине с 24 по 27 сентября 2024 года. На форуме были показаны передовые разработки в железнодорожной отрасли, включая электрификацию, цифровизацию, устойчивое развитие и искусственный интеллект (ИИ). ИИ подтвердил свой статус ключевого драйвера цифровой трансформации железнодорожной отрасли. Ведущие игроки рынка представили комплексные ИИ-решения, направленные на повышение безопасности, эффективности и экологичности транспортных систем. Особый акцент был сделан на предиктивной аналитике. Значительный прогресс наблюдается в области автоматизированного контроля инфраструктуры. Особое внимание уделено вопросам стандартизации данных и совместимости решений. Робототехнические системы начинают играть важную роль в обеспечении устойчивости железнодорожного транспорта. Обсуждаются ключевые направления развития железнодорожной отрасли в области автоматизации, роботизации и технического зрения в ближайшей и среднесрочной перспективе.

Ключевые слова: искусственный интеллект (ИИ), цифровизация, беспроводные технологии, техническое зрение, роботизация, стандартизация, устойчивое развитие, автономные системы.

THE CURRENT STATE AND PROSPECTS OF GLOBAL RESEARCH IN THE FIELD OF INTELLIGENT RAILWAY TRANSPORT

Ozerov A.V., Head of International Department, JSC NIAS,
Moscow, Russia, E-mail: a.ozеров@vniias.ru,
Bochkov A.V., Doctor of Technical Sciences, Scientific Secretary of the NTS, JSC "NIAS",
Moscow, Russia, E-mail: a.bochkov@vniias.ru

ABSTRACT

The article provides an overview of the key projects presented at the international exhibition of transport technologies InnoTrans, held in Berlin from 24 to 27 September 2024. The forum featured cutting-edge developments in the railway industry, including electrification, digitalization, sustainable development, and artificial intelligence (AI). AI has confirmed its status as a key driver of the digital transformation of the railway industry. Leading market players presented comprehensive AI solutions aimed at improving the safety, efficiency and environmental friendliness of transport systems. A special emphasis was placed on predictive analytics. Significant progress is being made in the field of automated infrastructure monitoring. Special attention is paid to the issues of data standardization and compatibility of solutions. Robotic systems are beginning to play an important role in ensuring the sustainability of rail transport. The key directions of development of the railway industry in the field of automation, robotics and technical vision in the near and medium term are discussed.

Keywords: artificial intelligence (AI), digitalization, wireless technologies, technical vision, robotics, standardization, sustainable development, autonomous systems.

¹ InnoTrans – крупнейшая международная выставка транспортных технологий, проводимая раз в два года. В этом году участие приняли 2 946 экспонентов из 59 стран, включая 600 новичков. На площадке площадью 116 459 м² было представлено 133 единицы подвижного состава, состоялось 226 мировых премьер. Выставку посетили 170 000 человек из 133 стран.

Введение

На выставке InnoTrans 2024 центральное место заняли вопросы формирования мобильности будущего через электрификацию, цифровизацию, автоматизацию и устойчивое развитие. Участники представили инновационные разработки, направленные на создание более безопасных, эффективных и экологичных транспортных решений. В ответ на стремительное развитие цифровых технологий организаторы впервые представили специализированную площадку AI Mobility Lab, где наряду с лекциями в AI Mobility Corner обсуждались актуальные вызовы, включая вопросы кибербезопасности и стандартизации. Особое внимание привлекли международные стандарты CLC/TS 50701 и IEC 62443, предлагающие комплексный подход к объединению функциональной и информационной безопасности. Компания CyberShield продемонстрировала инновационную концепцию, где меры кибербезопасности интегрированы на всех этапах жизненного цикла системы – от проектирования до вывода из эксплуатации.

Яркой тенденцией стал переход на беспроводные технологии, что наглядно продемонстрировала система PANDAS-V от Transmission Dynamics. Её беспроводные акселерометры для мониторинга пантографов позволяют значительно сократить эксплуатационные расходы. В сфере мониторинга инфраструктуры компания Avaron Technologies представила революционное решение на основе оптоволоконных сенсоров, обеспечивающее комплексный контроль состояния подвижного состава, пути и контактной сети.

Значительный интерес вызвали системы технического зрения, в частности разработка OSTIRION SLU, которая использует видекамеры и бесстыковые рельсовые цепи вместо традиционных евробализ. Эта технология не только снижает затраты, но и открывает новые возможности в автоматизации. Ключевым событием выставки стало обсуждение перспектив искусственного интеллекта в железнодорожной отрасли. Лидеры рынка, включая руководство Deutsche Bahn и Марокканских железных дорог, подчеркивали трансформационный потенциал ИИ в оптимизации эксплуатации и обслуживания, одновременно отмечая важность обеспечения безопасности данных и укрепления сотрудничества между бизнесом и научным сообществом. Выставка наглядно продемонстрировала, что будущее транспорта формируется на стыке цифровых инноваций и устойчивого развития.

Современные системы мониторинга, такие как KONUX Switch с автономными датчиками, позволяют прогнозировать износ оборудования и предотвращать аварии за счет анализа больших массивов данных в реальном времени.

Роботизированные системы постепенно заменяют человека при выполнении опасных и рутинных задач по инспекции путей и подвижного состава. В сфере управления движением поездов прорывные решения демонстрируют платформы вроде Signaling X от Siemens Mobility и HMAX от Hitachi Rail, которые за счет интеграции ИИ оптимизируют маршруты, сокращают энергопотребление и повышают пропускную способность железных дорог.

Формирование общих датасетов и единых протоколов признано необходимым условием для ускоренного внедрения ИИ-технологий в отрасли. Эти тенденции свидетельствуют о переходе железнодорожного транспорта на качественно новый уровень цифровой зрелости, где искусственный интеллект становится основой для безопасной и эффективной работы всей транспортной инфраструктуры.

На InnoTrans 2024 прослеживается явно растущий спрос на технологии автономного транспорта, однако реальный прогресс в этой сфере остается ограниченным. Крупные игроки пока сосредоточены на разработке систем помощи машинистам, тогда как полноценные беспилотные решения остаются на стадии прототипирования. Примечательно, что значительные успехи в области технического зрения демонстрируют преимущественно небольшие компании – они добились существенного прогресса в точности и дальности распознавания объектов, но не обладают ресурсами для создания комплексных систем автоматического управления.

Заметна активная консолидация усилий: большинство перспективных проектов, включая масштабную инициативу FP2-R2DATO, развиваются при государственной поддержке или в рамках международных консорциумов. Параллельно наблюдается тренд на оснащение подвижного состава внешними системами технического зрения >>>

– современные решения на базе ToF-камер и оптических сенсоров, устанавливаемые непосредственно на вагоны, демонстрируют высокую эффективность при контроле посадки/высадки пассажиров и мертвых зон, предлагая более экономичную альтернативу стационарным платформенным системам.

Важную роль в обеспечении устойчивости железнодорожного транспорта начинают играть робототехнические системы. С учетом кадрового голода необходимо повышать производительность труда за счет роботизации технологических процессов. На выставке InnoTrans 2024 основные технические решения были показаны в области автоматизации инспекции инфраструктуры и подвижного состава, технического обслуживания и уборки. Применение подобных роботов позволяет повысить эффективность процессов, уменьшить количество задействованного персонала. На текущий момент времени робототехнические системы достаточно дорогие, что ведет к значительным срокам окупаемости их внедрения, но текущие тенденции наглядно демонстрируют увеличение стоимости оплаты труда персонала, а также улучшение возможностей роботов и снижение их стоимости. Как следствие, ожидается ежегодное увеличение количества внедряемых роботов и рост их возможностей. В перспективе нескольких лет железнодорожная отрасль не сможет эффективно работать и сохранять конкурентоспособность без активного внедрения робототехнических систем. Хороший пример в этой области демонстрируют разработки таких компаний, как Downer, Loccioni, RFI, NGR и A2Mind.

1. Обзор основных трендов развития железнодорожной отрасли

Путевое хозяйство

Современные тенденции развития железнодорожного транспорта выходят далеко за рамки обновления подвижного состава. Сегодня ключевое внимание уделяется модернизации самой инфраструктуры – внедрению «умных» рельсовых систем, автоматизированных технологий обслуживания и принципиально новых подходов к организации движения. На выставке InnoTrans 2024 были представлены революционные решения, способные кардинально изменить облик железных дорог в ближайшем десятилетии.

Польская компания Nevomo разработала инновационную технологию MagRail Booster, которая объединяет преимущества традиционных железных дорог и магнитной левитации. Уникальность решения заключается в возможности совместной эксплуатации обычных поездов и составов на магнитном подвесе на одной и той же колее².

Ключевые особенности технологии:

- пассивная левитация, активируемая автоматически при достижении определенной скорости;
- линейный электропривод, интегрированный в путь, обеспечивающий разгон до 550 км/ч;
- гибридная система, позволяющая модернизировать существующие грузовые вагоны.

Особый интерес представляет применение технологии в туннелях, где ограниченные габариты не позволяют использовать традиционную контактную сеть.

Французская компания Pandrol представила революционную систему i+weld, которая кардинально меняет подход к обслуживанию путевого хозяйства. Комплекс включает семь взаимосвязанных устройств, среди которых особого внимания заслуживает запатентованная система i+align³.

Преимущества инновации заключаются в повышении качества сварных соединений на 40%, полной автоматизации процесса, компенсирующей дефицит квалифицированных сварщиков, а также в замене дорогостоящих традиционных методов сварки для небольших проектов. >>>

² Railway Gazette International: Nevomo and Captrain to trial MagRail technology

³ Pandrol official website: i+weld system

Немецкая компания smart-TEC GmbH & Co. KG разработала уникальную систему маркировки рельсов с помощью технологии AUTO-ID. Инновационное решение представляет собой специальные зажимные устройства с RFID-метками или 2D-кодами с возможностью автоматической идентификации участков пути на полной скорости движения и устойчивостью к экстремальным погодным условиям и механическим нагрузкам⁴. Эта технология особенно актуальна для автоматизации контроля состояния стрелочных переводов и критических участков пути.

Немецкая компания PINTSCH продемонстрировала инновационный стрелочный привод, устанавливаемый непосредственно внутри рельсовой колеи⁵ (рис. 1).

Ключевые преимущества состоят в отсутствии необходимости модификации существующей путевой системы, а также в компактности конструкции, не требующей работ на шпальном основании, повышенной надежности и простоте обслуживания.

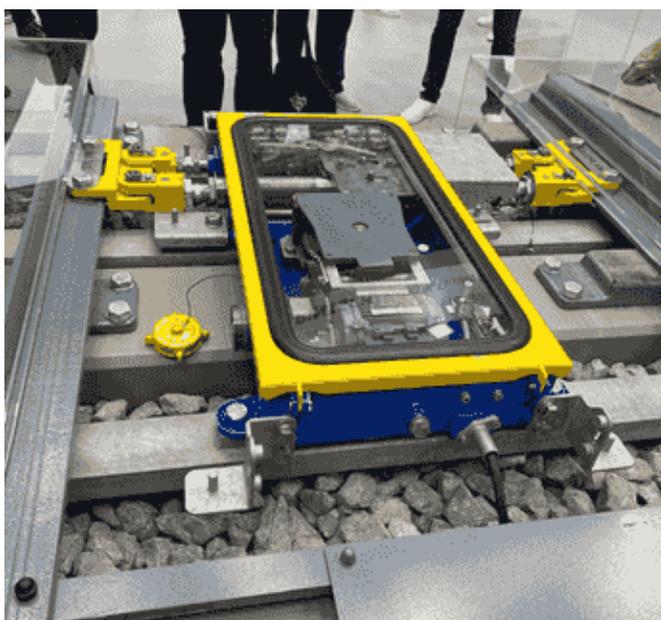


Рис. 1 – Стрелочный привод, устанавливаемый внутри рельсовой колеи (разработка компании PINTSCH)

Представленные на InnoTrans 2024 технологии свидетельствуют о том, что будущее железнодорожной инфраструктуры связано с гибридными транспортными системами, объединяющими разные принципы движения, полной автоматизацией процессов строительства и обслуживания, цифровой идентификацией всех элементов путевого хозяйства, а также компактными модульными решениями для модернизации без остановки движения⁶.

Эти инновации не просто улучшают существующую инфраструктуру – они создают принципиально новую парадигму «умных» железных дорог, где цифровые технологии, автоматизация и альтернативные принципы движения становятся стандартом. В ближайшие 5-7 лет мы можем стать свидетелями массового внедрения этих решений, что кардинально изменит показатели скорости, надежности и эффективности железнодорожного транспорта.

Подвижной состав

Железнодорожная отрасль переживает период глубокой трансформации, что ярко продемонстрировала выставка InnoTrans 2024. Ключевые направления развития сосредоточены вокруг экологической устойчивости [1], цифровой трансформации и принципиально новых подходов к проектированию подвижного состава, усовершенствования двигательных [2] и энергетических [3] систем, инноваций [4] в материалах и производстве [5]. >>>

⁴ smart-TEC product page: RFID rail labelling

⁵ PINTSCH company website: Point Machine

⁶ Industry reports on railway infrastructure trends 2024

Отрасль демонстрирует беспрецедентные темпы перехода на низкоуглеродные технологии. Водородные поезда перешли из стадии экспериментальных разработок в серийное производство. Ярким примером стал поезд CINOVA H2 от китайской компании CRRC, сочетающий водородные топливные элементы с литий-ионными аккумуляторами, что позволяет достигать дальности хода до 600 км без дозаправки.

Параллельно развивается инфраструктура для водородной заправки. Компании вроде Cummins инвестируют в создание водородных хабов рядом с депо, что критически важно для перевода региональных линий на экологичное топливо.

Аккумуляторные электропоезда также демонстрируют прогресс – новые модели от Stadler и Alstom показывают запас хода до 150 км при 30-минутной зарядке. Это делает их идеальным решением для неэлектрифицированных участков.

Железные дороги становятся частью экосистемы Industry 4.0. Проект Andromeda от Siemens Mobility использует сеть из тысяч датчиков и искусственный интеллект для прогнозирования износа деталей с точностью до 92%. Это позволяет перейти от планового к предиктивному обслуживанию, сокращая простои на 40%.

Автономное управление переходит в практическую плоскость. Немецкий консорциум в рамках проекта ARTE успешно испытал поезд, способный распознавать сигналы светофоров через компьютерное зрение, автоматически корректировать скорость, переходить на дистанционное управление при нештатных ситуациях.

Промышленный дизайн также становится важным аспектом развития подвижного состава. С ростом интеграции технологий, таких как внешние системы технического зрения, производители стремятся к эргономичной и эстетичной интеграции этих решений в конструкции вагонов. Компании, ориентированные на промышленный дизайн, уже внедряют решения, которые органично вписываются в конструкции вагонов, улучшая их внешний вид и функциональные характеристики.

Технические инновации не ограничиваются только внешними системами. Интеграция IoT и ИИ-систем для мониторинга инфраструктуры становится центральным элементом повышения уровня безопасности и эксплуатационной эффективности железнодорожных систем. Проект Andromeda, использующий Industrial IoT, собирает данные с сенсоров, установленных на подвижном составе, и с помощью ИИ проводит их анализ для выявления потенциальных неисправностей, что позволяет проводить профилактическое обслуживание, сокращать количество простоев и продлевать срок службы оборудования. Технические характеристики системы включают сбор данных в режиме 24/7 с таких узлов, как ходовая часть, сцепные устройства, тормозные системы и другие важные элементы.

Тенденция обновления парка подвижного состава подразумевает и внедрение новых конструкций сцепных устройств, которые улучшают процесс соединения вагонов и повышают надежность эксплуатации. В дополнение к этому, smart-вагоны получают своевременное обслуживание за счет использования IoT-устройств, которые позволяют осуществлять мониторинг ключевых узлов в реальном времени, обеспечивая более точную диагностику и предиктивное обслуживание. Стоит выделить и опытное внедрение цифровой автосцепки DAC, которая не только обеспечивает более быструю и надежную сцепку вагонов, но и позволяет создать общую шину данных для всего состава, что дает возможность контролировать количество вагонов, передавать данные о тормозных системах, а также выполнять автоматическое обновление программного обеспечения.

Подвижной состав становится не только более технологичным, но и более интегрированным с современными цифровыми системами, что позволяет повысить эффективность его эксплуатации, сократить издержки и улучшить безопасность всей железнодорожной инфраструктуры.

Современные требования к подвижному составу предполагают и принципиально новые подходы к конструкции: так, локомотив DualShunter 2000 демонстрирует радикальное уменьшение габаритов за счет виртуальной кабины, а компания CRRC внедряет проекционные дисплеи в пассажирские окна, создавая интерактивную среду. Кроме того, производители подвижного состава учитывают требования аэродинамики, интегрируя датчики непосредственно в кузов.



«Умной» становится даже строительная техника. Георадар Raptor от Impulse Radar проводит диагностику пути на скорости 130 км/ч с точностью до 1 мм, а система автоматической шлифовки рельсов от Schueerbau увеличивает межремонтный интервал на 30%. На выставке была также представлена ремонтная техника, включая специализированные машины для обслуживания и строительства железнодорожной инфраструктуры. Например, компания Plasser & Theurer продемонстрировала новую версию машины Catenary Crafter 15.4 E3, предназначенную для установки и обслуживания контактной сети и оснащенную электрической силовой установкой (рис. 2). Кроме того, компания Schueerbau представила обновленную версию своего поезда СМ-серии для шлифовки рельсов, который имеет новый дизайн и улучшенные эксплуатационные характеристики, включая возможность обработки рельсов на большой скорости с высокой точностью.



Рис. 2 – Путьевая техника Catenary Crafter 15.4 E3 от Plasser & Theurer

Навесные конструкции для инспекции дефектов верхнего строения пути, такие как Raptor от Impulse Radar, представляют собой современные решения для выявления дефектов железнодорожной инфраструктуры. Используемый георадар позволяет обнаруживать подземные дефекты (осыпи и провалы насыпей), изношенные или поврежденные рельсы, а также выявлять проблемы в конструкции пути вглубь до 4м.

Система Raptor оснащена несколькими антеннами и может проводить точные измерения на высокой скорости до 130 км/ч, что существенно ускоряет процесс осмотра путей. Данная технология снижает необходимость в замедлении движения поездов для проведения инспекций, что делает ее важным инструментом для повышения безопасности железнодорожной инфраструктуры.

Кроме того, строительная техника стала чаще оснащаться системами технического зрения и картографическими системами, которые помогают в автоматической инспекции путей, используя различные сенсоры и камеры для создания детализированных карт и распознавания потенциальных дефектов или деформаций.

Совмещение технологии обнаружения дефектов с картографическими системами предоставляет новые возможности для более точного и всестороннего мониторинга железнодорожной инфраструктуры. Благодаря интеграции данных о деформациях путей с картографическими системами, операторы могут не только выявлять потенциальные неисправности, но и визуализировать их местоположение на высокоточных картах, что позволяет более эффективно планировать профилактические работы и оптимизировать маршруты для обслуживания. В результате значительно сокращаются временные и финансовые затраты на ремонтные работы, а также повышается безопасность железнодорожных перевозок.

Подвижной состав продолжает развиваться в направлении более тесной интеграции цифровых технологий и систем автоматического мониторинга. Внедрение внешних систем технического зрения и инновационных решений для предиктивной диагностики обеспечивают повышение безопасности и эффективности эксплуатации. В то же время, компактные локомотивы и новые сцепные устройства демонстрируют дальнейший прогресс в эргономике и эксплуатации железнодорожного транспорта. Перспективы дальнейшего развития связаны с активной цифровизацией и роботизацией систем, что обеспечит улучшение эксплуатационных характеристик, снижение издержек и повышение уровня безопасности железнодорожной инфраструктуры.

DLR (Германия) представил NGT-TAXI – концепцию небольшого, легкого, эффективного модульного рельсового транспортного средства. Предполагается, что подвижной состав данного типа на аккумуляторах или иных топливных элементах будет эксплуатироваться в беспилотном режиме на малоделятельных направлениях. Самая короткая версия поезда имеет длину чуть менее десяти метров и 12 мест, а самая длинная – 17,5 метров и 54 места.



Рис. 3 – Модификация высокоскоростного электропоезда ETR 1000 (Frecciarossa 1000)

Компактное маневровое устройство на литиевых элементах питания представила компания G. Zwiehoff GmbH (Германия). По утверждению производителя, ROTRAC E1 – первое маневровое устройство, работающее на литиевой батарее, которое при этом имеет низкий профили за счет опускаемой сцепки. Это позволяет маневровому устройству ездить даже между вагонами. Сочетание указанных функций позволяет, помимо стандартных маневровых работ с отцепами массой до 200 тонн, выполнять специальные задачи, такие как безопасное перемещение тележек под вагонами. Техническое средство было разработано в рамках проекта финансирования, направленного на автоматизированное вождение ROTRAC E1.

Итальянский национальный пассажирский оператор Trenitalia и компания Hitachi Rail продемонстрировали новую модификацию высокоскоростного электропоезда ETR 1000 (Frecciarossa 1000) (рис. 3). Размещенный на открытой площадке выставки обновленный поезд ETR 1000 имеет новые тележки, более эффективные тяговые двигатели и обновленное силовое оборудование. Он также укомплектован разработанной Hitachi Rail системой управления и диагностики. Кроме того, поезд оснащен компонентами новой цифровой технологической платформы HMAX suite на основе искусственного интеллекта.

Внесены также изменения в интерьеры вагонов. В частности, увеличилось число мест и расширена зона для багажа в вагоне класса Executive при сохранении высокого уровня >>>

премиальных услуг. Обновилась также конструкция кресел, все пассажиры получили доступ к сети Интернет через точки доступа Wi-Fi.

InnoTrans 2024 показала, что железнодорожный транспорт стоит на пороге новой эры. Комплексный подход, объединяющий экологичные силовые установки, цифровые технологии и революционные решения в области дизайна, формирует транспортную систему будущего. В ближайшее десятилетие мы увидим массовый переход на водородные и аккумуляторные поезда, повсеместное внедрение автономного управления и создание полностью цифровых железных дорог с непрерывным мониторингом. Эти изменения не просто модернизируют отрасль – они создают принципиально новую парадигму экологичного, интеллектуального и эффективного транспорта.

Системы управления движением поездов

Железнодорожная отрасль переживает цифровую трансформацию систем управления движением [6], где ключевым трендом становится внедрение ERTMS/ETCS Level 2 и 3. Эти системы обеспечивают сквозную автоматизацию [7], заменяя традиционные светофоры непрерывной цифровой связью между поездом и центром управления. По данным исследования Международного союза железных дорог (2023), переход на ETCS позволяет увеличить пропускную способность линий на 20-40% за счет сокращения межпоездных интервалов. Особое внимание уделяется реализации технологии подвижного блок-участка, которая позволяет динамически менять интервал попутного следования, адаптируя его под плотность движения [8].

Вторым ключевым направлением является развитие автоведения и автономного управления на основе ИИ. Проекты типа АТО поверх ETCS (например, система, испытанная Deutsche Bahn в 2022 году) демонстрируют возможность полностью беспилотного вождения при сохранении совместимости с обычным подвижным составом.

Третьим стратегическим трендом является интеграция BIM-технологий в системы диспетчеризации. Передовые железные дороги (включая HS2 в Великобритании и Brightline West в США) используют цифровые двойники инфраструктуры для моделирования потоков в реальном времени. Согласно отчету Bentley Systems (2023), это сокращает время реакции на инциденты на 35% за счет предиктивной аналитики. Особенно перспективна комбинация BIM с LiDAR-сканированием пути, позволяющая автоматически корректировать графики при обнаружении препятствий.

И, наконец, еще одним трендом является переход к облачным платформам управления, таким как Siemens Railigent или Alstom HealthHub. Эти системы объединяют данные от 20+ источников (от датчиков пути до метеослужб) для оптимизации маршрутов. Исследование McKinsey (2024) показывает, что «облачные» ЦОДы снижают энергопотребление на 15% через AI-оптимизацию профилей скорости. Пилотный проект SNCF на линии Париж – Лион подтвердил экономию 2,1 млн евро в год только за счет динамического перераспределения мощностей.

Современные системы управления железнодорожным движением переживают период активной цифровизации и автоматизации. Ярким примером является система OPTIO от испанской компании CAF, представляющая собой реализацию технологии CBTC (Communication-Based Train Control) с четвертым уровнем полноты безопасности (SIL4)⁷. Эта гибкая и масштабируемая система позволяет реализовать принцип подвижного блок-участка с минимальным интервалом в 60 секунд и поддерживает автоматизацию вплоть до четвертого уровня. В Китае система автоведения высокоскоростных поездов Fuxing, разработанная China Academy of Railway Sciences, демонстрирует возможности автоматического управления на скоростях до 350 км/ч на базе комплекса CTCSS-3⁸.

Немецкая компания Siemens Mobility представила экосистему Signaling X⁹ - революционное решение для управления железнодорожной автоматикой из единого центра обработки **»»»**

⁷ Ссылка: www.caf.net/en/articles/optio/

⁸ Ссылка: www.plus.innotrans.de/product/350-km-h-HSR-ATO-System--68464802-67ed-4574-b21a-e5c9366109f6

⁹ Ссылка: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-mobility-presents-signaling-x-and-next-level-rail-services-innotrans-2024>

данных. Эта система, построенная на платформе DS3 (Distributed Smart Safe System), обеспечивает облачную обработку данных через стандартизированные API-интерфейсы. Аналогичные тенденции наблюдаются и в решениях других производителей: чешская Skoda Group разработала цифровую экосистему Smart Depot для автоматизации обслуживания городского транспорта, включая беспилотное движение трамваев на территории депо¹⁰.

Особого внимания заслуживают модульные решения, такие как стрелочный объектный контроллер FAdP Point Control от австрийской компании Frauscher¹¹. Это устройство, соответствующее стандарту EULYNX, отличается компактностью и широким температурным диапазоном работы (-40...+70°C). Швейцарская Stadler Signalling демонстрирует комплексный подход, предлагая широкий спектр решений – от светодиодных светофоров до системы обнаружения препятствий NOVA Smartsense, сочетающей камеры, радары и лидары¹².

Китайская компания Beijing Hollysys представила полный комплекс технологических решений для цифрового управления движением, включая системы диспетчерской централизации и радиоблокировки¹³. Их решения отличаются тщательной проработкой интерфейсов машиниста с отображением не только параметров движения, но и диспетчерской информации.

Современные тенденции в системах управления железнодорожным движением характеризуются несколькими ключевыми направлениями. В частности, их отличает глубокая цифровизация и переход на облачные технологии (Siemens Signaling X), повышение уровня автоматизации вплоть до беспилотного управления (Skoda Smart Depot), развитие модульных и стандартизированных решений (Frauscher FAdP), создание комплексных экосистем (Stadler Signalling, Beijing Hollysys), улучшение человеко-машинных интерфейсов и систем поддержки принятия решений и снижение стоимости жизненного цикла [9]. Эти инновации позволяют значительно повысить безопасность, эффективность и пропускную способность железных дорог, создавая основу для транспортных систем будущего. Особенно перспективным выглядит сочетание облачных технологий с модульными решениями, что позволяет гибко масштабировать системы управления под конкретные задачи инфраструктурных операторов.

Бортовые системы

Современные бортовые системы подвижного состава переживают потенциально революционные изменения, связанные с цифровизацией и внедрением интеллектуальных технологий. Ведущие производители активно разрабатывают комплексные решения, объединяющие системы управления, диагностики и связи в единую цифровую платформу. Особое внимание уделяется внедрению технологий искусственного интеллекта для прогнозной аналитики и автоматического принятия решений, что позволяет существенно повысить безопасность и эффективность эксплуатации. Примером такого подхода являются разработки корпорации CRRC, ведущего производителя подвижного состава в КНР, интегрирующие в модули бортовой диагностики нейросетевые алгоритмы, которые анализируют состояние оборудования в реальном времени, прогнозируя возможные отказы с точностью до 95%.

Ключевым направлением развития становится создание унифицированных бортовых архитектур с открытыми программными интерфейсами. Это позволяет адаптировать оборудование под различные эксплуатационные требования и легко интегрировать новые функции через программные обновления.

Немецкие компании Siemens и Bosch активно реализуют концепцию «цифрового двойника» подвижного состава, когда виртуальная копия поезда непрерывно анализирует данные тысяч датчиков, оптимизируя режимы работы всех систем. Подобные решения уже демонстрируют снижение энергопотребления на 12-15% при одновременном увеличении межремонтных пробегов. >>>

¹⁰ Ссылка: https://www.skodagroup.com/admin/wp-content/uploads/2024/09/SMART-DEPOT-_Produktovy_list_Digital_A4_EN_PREVIEW.pdf

¹¹ Ссылка: <https://plus.innotrans.de/product/Point-Object-Controller--df3ba733-0db1-4233-af83-a0d5d481457a>

¹² Ссылка: www.stadlerail.com/en/media/article/stadler--@-innotrans-2024/1730/

¹³ Ссылка: <https://plus.innotrans.de/company/Beijing-Hollysys-Co-Ltd--1004642>

Перспективным направлением является развитие автономных бортовых систем, способных функционировать без постоянного вмешательства оператора. В этом сегменте особенно выделяются разработки Alstom и Stadler, где комплекс датчиков компьютерного зрения, лидаров и радаров позволяет поездам самостоятельно идентифицировать препятствия и принимать решения в сложных эксплуатационных ситуациях. Параллельно идет активное внедрение блокчейн-технологий для защиты данных и кибербезопасности бортовых систем, что становится критически важным в условиях роста цифровизации железнодорожного транспорта.

На выставке были представлены современные бортовые системы железнодорожного транспорта, демонстрирующие значительный технологический прогресс, особенно в области высокоскоростных поездов. Так, Китайская академия железнодорожных наук (CARS) разработала комплексные решения для электропоездов Fuxing¹⁴, включающие микрокомпьютерную систему прямого электронного управления тормозами и тяговую систему нового типа, обеспечивающую движение поезда со скоростью до 350 км/ч¹⁵. Эти системы дополняются интегрированной системой мониторинга безопасности, которая в режиме реального времени отслеживает состояние тележек, подшипников и других критических компонентов, значительно повышая надежность эксплуатации.

В Европе разработчики сосредоточены на создании интеллектуальных систем управления и безопасности. Французская компания Clearys представила независимую систему контроля платформенных дверей метро, соответствующую строгим стандартам безопасности SIL3, которая обеспечивает точную синхронизацию работы дверей поезда и платформы¹⁶. Немецкий центр авиации и космонавтики (DLR) продемонстрировал инновационную технологию виртуальной сцепки, обеспечивающую автоматическую сцепку вагонов с помощью радиомодулей¹⁷.

Значительные достижения наблюдаются в области искусственного интеллекта и компьютерного зрения. Швейцарская Syslogic AG разработала мощный бортовой компьютер RML A4AGX с производительностью 275 TOPS, способный обрабатывать сложные алгоритмы компьютерного зрения для автономного управления¹⁸. Испанская компания OSTIRION предложила оптическую систему позиционирования поездов на основе ИИ, которая определяет местоположение состава с помощью специальных маркеров вдоль пути¹⁹. Британская Transmission Dynamics создала систему PANDAS-V для мониторинга контактной сети, которая использует ИИ для мгновенного выявления проблем (в течение 1 минуты) в любых погодных условиях²⁰. В отличие от традиционных систем, требующих 1-2 недель постобработки данных, PANDAS-V сообщает о потенциальных проблемах в течение 1 минуты с момента обнаружения. Система надежно функционирует как днем, так и ночью в самых сложных погодных условиях: от сильного дождя и ветра до экстремальных температур от -40°C до +85°C.

Инновации в развитии бортовых систем позволяют не только повысить безопасность и эффективность железнодорожного транспорта, но и закладывают основу для полностью автономных систем управления будущего. Особенно перспективным выглядит сочетание технологий ИИ с традиционными системами управления, что открывает новые возможности для оптимизации эксплуатационных процессов и снижения затрат на обслуживание.

Электросвязь

Современные железнодорожные системы управления и связи демонстрируют стремительное технологическое развитие, направленное на повышение эффективности, безопасности и качества обслуживания. Китайская академия железнодорожных **»»»**

¹⁴ Ссылка: www.plus.innotrans.de/product/Key-systems-of-Fuxing-Intelligent-EMUs--6026154d-7b38-49e1-82a4-58b005fce84e

¹⁵ Ссылка: www.plus.innotrans.de/product/Key-systems-of-Fuxing-Intelligent-EMUs--6026154d-7b38-49e1-82a4-58b005fce84e

¹⁶ Ссылка: <https://plus.innotrans.de/product/Railway-safety-systems-for-opening-and-closing-landing-doors--711e1c71-7b0c-47ca-9b57-d40c8095ccfc>

¹⁷ Ссылка: <https://www.dlr.de/en/latest/news/2024/dlr-at-the-innotrans-2024>

¹⁸ Ссылка: <https://www.syslogic.com/blog/innotrans-2024-computer-vision-at-a-new-level---railway-computer-rml-a4agx>

¹⁹ Ссылка: <https://www.ostirion.net/services-transportation>

²⁰ Ссылка: <https://plus.innotrans.de/product/PANDAS-V-r--57aa2940-07ff-4e87-9a22-69f73aaa42f0>

наук представила на выставке передовую систему управления сетью для высокоскоростных электропоездов Fuxing, использующую двухуровневую архитектуру Ethernet²¹. Эта инновационная система обеспечивает гибкую конфигурацию составов от 8 до 17 вагонов, что значительно расширяет эксплуатационные возможности подвижного состава.

В Германии реализуется амбициозный проект Gigabit Innovation Track (GINT), в рамках которого создается опытная зона 5G-связи протяженностью 10 км²². Этот проект, поддерживаемый Министерством цифровизации и транспорта Германии, объединяет усилия Deutsche Bahn, Ericsson, O2 Telefónica и Vantage Towers. Особенностью проекта стало рекордно быстрое развертывание инфраструктуры - 15-метровые вышки с антеннами были установлены менее чем за месяц благодаря использованию стальных распорок вместо традиционных бетонных фундаментов. Тестирование системы проводится с помощью специального лабораторного поезда Advanced TrainLab, а к 2030 году ожидается достижение пропускной способности до 5 Гбит/с на один состав.

Компания Huawei представила важные разработки в области железнодорожной связи, включая «Белую книгу FRMCS» и революционное решение для оптических сетей связи²³. Рассмотрен широкий круг вопросов, включая основные отраслевые тенденции, толкование требований стандартов, выбор спектра, сетевой архитектуры и ключевых технологий беспроводной связи. В документе перечислены основные проблемы, с которыми сталкиваются клиенты железнодорожных компаний при модернизации мобильной связи, даны толкования новейших стандартов FRMCS и подчеркнуты преимущества FRMCS по сравнению с традиционными узкополосными системами.

Новая технология мелкоструктурной оптической транспортной сети (fgOTN), представленная компанией Huawei, предлагает десятикратное увеличение пропускной способности по сравнению с традиционными системами на основе SDH, поддерживая скорости до 100G с перспективой перехода на 800G. Это решение снижает задержки и упрощает техническое обслуживание благодаря интеллектуальным функциям визуализации.

Американская компания Piper Networks продемонстрировала усовершенствованную систему определения местоположения (ETLS), использующую технологию сверхширокополосной связи (UWB)²⁴. Эта система обеспечивает сантиметровую точность позиционирования поездов в реальном времени за счет сети интеллектуальных датчиков, установленных как на инфраструктуре, так и на подвижном составе. Облачная платформа мониторинга позволяет оперативно получать данные о местоположении через сети LTE, значительно повышая безопасность и эффективность управления движением.

Представленные на выставке технологические решения демонстрируют ключевые тенденции развития современных железнодорожных систем управления и связи:

1. Переход к гибким и масштабируемым сетевым архитектурам;
2. Активное внедрение технологий 5G и оптических сетей нового поколения;
3. Повышение точности позиционирования подвижного состава;
4. Увеличение пропускной способности каналов связи;
5. Интеграция облачных технологий и IoT-решений.

Особенно перспективным представляется сочетание высокоскоростных сетей связи с точными системами позиционирования, что открывает новые возможности для повышения безопасности и эффективности железнодорожных перевозок. Реализация этих проектов позволит существенно улучшить качество обслуживания пассажиров и оптимизировать эксплуатационные процессы железнодорожных операторов. >>>

²¹ Ссылка: <https://plus.innotrans.de/product/Key-systems-of-Fuxing-Intelligent-EMUs--6026154d-7b38-49e1-82a4-58b005fce84e>

²² Ссылка: <https://plus.innotrans.de/product/GINT--ed93fe7d-b460-460f-b9c2-06a759791e82>

²³ Ссылка: <https://e.huawei.com/en/news/2024/industries/roadway/railway-paper-world-intelligence> и <https://e.huawei.com/en/news/2024/solutions/enterprise-optical-network/industry-first-railway-optical-communication>

²⁴ Ссылка: <https://plus.innotrans.de/product/Piper-ETLS-UWB-Vital-Train-Positioning--82038285-3744-4154-921a-1f41b084b2a4>

Компьютерное зрение

В последние годы железнодорожная отрасль активно внедряет современные системы обнаружения препятствий, основанные на компьютерном зрении, лидарах и искусственном интеллекте. Эти технологии позволяют повысить безопасность движения, особенно на участках с повышенным риском столкновений, таких как переезды или зоны с ограниченной видимостью [10]. Например, европейские железные дороги тестируют системы на базе нейросетей, способные распознавать людей, животных и посторонние объекты на путях в реальном времени²⁵.

Еще одним ключевым трендом является интеграция беспроводных сенсорных сетей и спутниковых технологий (например, ГНСС) для мониторинга состояния путей и обнаружения препятствий.

В Китае и Японии уже применяются системы, сочетающие датчики вибрации, тепловизоры и радиолокацию, что значительно снижает количество ложных срабатываний²⁶.

Перспективным направлением также считается использование дронов и БПЛА для патрулирования железнодорожных путей, особенно в труднодоступных районах. Такие системы уже тестируются в США и Канаде, где они помогают выявлять оползни, повреждения инфраструктуры и даже несанкционированное проникновение на пути²⁷. В будущем ожидается дальнейшая конвергенция этих технологий с системами автоматического управления поездами (АТО) и ERTMS.

В России разработки систем обнаружения препятствий для железнодорожного транспорта также развиваются активно. Одним из ключевых игроков в этой сфере является ОАО «РЖД», которое совместно с научными институтами и частными компаниями тестирует решения на основе компьютерного зрения, радиолокации и инфракрасных датчиков. Например, система «ОПС-1М» (Обнаружение Препятствий на Станциях) использует видеокамеры и алгоритмы машинного обучения для выявления посторонних объектов в зоне движения поездов [11].

Еще одной перспективной разработкой является система «Безопасный переезд», которая включает лидары и тепловизоры для мониторинга ж/д переездов в режиме реального времени. Эта технология тестируется на ряде участков Свердловской и Московской железных дорог. Аналогичные решения разрабатывают компании «СТМ-Сервис» и «Лабмедиа», предлагающие комплексные системы видеонаблюдения с функцией аналитики поведения объектов (например, распознавание пешеходов или автомобилей, задержавшихся на путях)²⁸.

На стендах выставки InnoTrans 2024 представлена система помощи машинисту HORUS²⁹ (разработка австралийской компании 4AI Systems) (рис. 4). То мультисенсорная система обнаружения и классификации препятствий на основе машинного зрения, искусственного интеллекта и глубокого обучения. Предусмотрена поддержка различных типов датчиков, включая лидар, радар, ГНСС с инерциальной коррекцией, цветные видеокамеры, тепловизионные камеры.



²⁵ Подробнее об этом можно прочитать в исследовании UIC (International Union of Railways) [“Railway Technical Publications on Obstacle Detection”, URL: <https://uic.org>].

²⁶ Исследования в этой области публикуются в журналах IEEE, таких как «IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems», URL: <https://www.ieee.org>, где рассматриваются алгоритмы машинного обучения для обработки данных с множества датчиков.

²⁷ Анализ успешных кейсов можно найти в отчетах Федерального управления железных дорог США (FRA) «Emerging Technologies in Rail Safety», URL: <https://railroads.dot.gov>.

²⁸ Обзор таких технологий представлен в журнале «Локомотив» и на портале «РЖД-Партнер», URL: rzd-partner.ru

²⁹ Ссылка: <https://plus.innotrans.de/product/HORUS-Advanced-Rail-Artificial-Intelligence--6c751e6c-f9d4-4986-a66e-031e9bc3a849>



Рис. 4 – Обнаружение элементов инфраструктуры и прочих объектов в системе HORUS (Австрия)

Австрийская компания EYYES GmbH представила систему помощи машинисту RailEye³⁰, включающую технологию обнаружения препятствий RailEye DIGITAL Exterior Mirror, которая на основе методов ИИ отслеживает людей и объекты в слепой зоне, рассчитывает их направление движения и предупреждает машиниста о потенциальных опасностях, а также RailEye Collision Assistant Suite – систему, разработанную для легкорельсового транспорта, которая обнаруживает критические ситуации вокруг транспортного средства и активно предупреждает машинистов с помощью визуальных и звуковых сигналов.

Американская компания Piper Networks Inc. (США) представила мультисенсорное решение, которое использует лидар, UWB и другие технологии позиционирования³¹. Система позволяет точно обнаруживать и отслеживать подвижные объекты в режиме реального времени. Она включает в себя несколько датчиков для обеспечения:

- предотвращения столкновений – сверхширокополосные (UWB) радиостанции для предотвращения столкновений между оборудованными транспортными средствами и локализации на участках со сложным путевым развитием, сортировочных станциях и/или в зонах, где сигнал GPS недоступен;
- обнаружения препятствий – LiDAR использует фирменные алгоритмы Piper Virtual Tunnel для надежного обнаружения препятствий;
- соблюдения ограничений – GPS-RTK обеспечивает высокоточный расчет местоположения и скорости для соблюдения ограничений и синхронизации времени;
- обнаружения столкновений – бортовой инерциальный измерительный блок (IMU) для обнаружения столкновений;
- регистрации событий – HD-камеры фиксируют внешнее и внутреннее видео исключительно для судебных целей.

Helix™ использует запатентованную технологию Piper Solid State LiDAR для сравнения изображений в реальном времени с бортовой базой данных. Она сохраняет изображение железной дороги, чтобы бортовой компьютер мог находить различия и обнаруживать объекты в зоне движения транспортного средства.

Цифровое моделирование

Технологии цифрового моделирования занимают центральное место в цифровой трансформации железнодорожной отрасли [12]. Одним из наиболее значимых трендов стало создание «цифровых двойников» инфраструктурных объектов. Такие комплексные модели, объединяющие данные BIM, IoT-датчиков и геопространственной **»»»**

³⁰ Ссылка: <https://www.eyyes.com/en/products/raileye-digital-mirror/>, <https://www.eyyes.com/en/products/raileye-front-collision-warning/>

³¹ Ссылка: <https://plus.innotrans.de/product/Piper-Helix-Maintenance-of-Way-Safety-Solution--35394c9f-db9e-46fd-98cb-5a7124880575>

информации, позволяют проводить виртуальные испытания новых решений и прогнозировать эксплуатационные характеристики с точностью до 95%. Например, проект HS2 в Великобритании использует цифровые двойники для оптимизации строительства и последующего управления высокоскоростной магистралью.

Особое внимание уделяется развитию предиктивных аналитических систем на основе ИИ. Нейросетевые алгоритмы анализируют данные тысяч датчиков, установленных на подвижном составе и инфраструктуре, прогнозируя возможные отказы оборудования и оптимальные сроки технического обслуживания. Компания Siemens Mobility внедрила подобную систему Railigent, которая снижает эксплуатационные расходы на 15-20% за счет точного планирования ремонтов.

Перспективным направлением также является так называемое «облачное моделирование транспортных потоков», позволяющее в режиме реального времени оптимизировать графики движения и распределение ресурсов. Такие системы, как HealthHub компании Alstom, обрабатывают данные от множества источников (погодные условия, пассажиропоток, состояние инфраструктуры) для динамического управления железнодорожными операциями. Пилотные проекты SNCF показали экономию до €2 млн в год на отдельных направлениях.

Новые возможности обещает развитие технологий дополненной реальности (AR). Инженеры получают доступ к интерактивным 3D-моделям оборудования через AR-очки, что ускоряет диагностику и ремонт на 30-40%. Deutsche Bahn тестирует подобные решения на сортировочных станциях.

Основные перспективы развития связаны с созданием комплексных цифровых двойников всей транспортной системы, внедрением предиктивной аналитики на основе ИИ, развитием облачных платформ для управления транспортными потоками, использованием AR/VR-технологий в техническом обслуживании и интеграцией моделирующих систем с BIM-платформами. Эти технологии не только повышают эффективность эксплуатации, но и создают основу для полностью автономного управления железнодорожным транспортом в будущем. Особенно перспективным представляется сочетание цифровых двойников с технологиями ИИ, что позволит перейти от реагирования на проблемы к их предупреждению. Массовое внедрение этих решений в будущем может кардинально изменить подходы к проектированию, строительству и эксплуатации железных дорог.

Выставка InnoTrans 2024 продемонстрировала, что современные технологии цифрового мониторинга железнодорожной инфраструктуры достигли нового уровня точности и эффективности. Австрийская компания DGNSS Sensors GmbH в сотрудничестве с Техническим университетом Вены разрабатывает систему ARTEMIS³², предназначенную для автономного лазерного сканирования железнодорожных путей. Этот инновационный проект сочетает передовые технологии геодезической съемки с роботизированными решениями, что позволяет проводить комплексный мониторинг инфраструктуры, включая сложные объекты типа мостов. Особенностью системы является интеграция гидрографических измерений с использованием одно- и многолучевого гидролокатора, что обеспечивает всесторонний анализ состояния объектов.

Немецкая группа DBE.C.O., входящая в состав Deutsche Bahn, представила мультисенсорную платформу 360° MSP, устанавливаемую на специальной автомотрисе³³ (рис. 5).

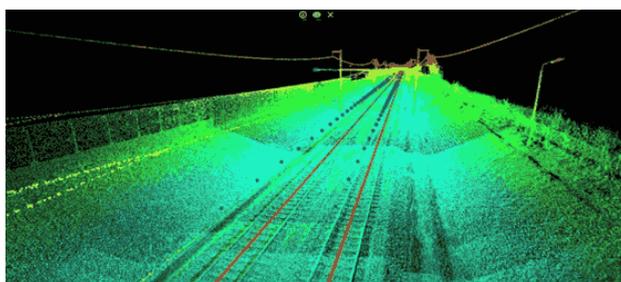


Рис. 5 – Пример результата работы системы

³² Ссылка: <https://plus.innotrans.de/product/ARTEMIS--cf1d920d-61af-4635-88a7-3ee570b7dd88>

³³ Ссылка: <https://db-engineering-consulting.com/en/insights/multisensor-platform/>

Эта комплексная система объединяет спутниковую навигацию, лазерное сканирование, панорамную съемку и георадарное профилирование, позволяя создавать детализированные трехмерные BIM-модели железнодорожной инфраструктуры. Уникальность решения заключается в возможности сбора данных при движении со скоростью до 80 км/ч, что позволяет за сутки оцифровать до 200 км пути. Полученные информационные модели находят применение в различных подразделениях Deutsche Bahn для оптимизации эксплуатации, технического обслуживания и модернизации объектов железнодорожной сети.

Современные железнодорожные решения активно используют картографические системы и навигацию, интегрируя сенсоры технического зрения, такие как лидары и камеры. Эти технологии позволяют создавать высокоточные карты (HDMaps) и отслеживать дефекты земляного полотна, электроснабжения и других элементов инфраструктуры. Лидары обеспечивают точные данные о расстояниях и объектах, а камеры дополняют их визуальной информацией.

Дроны также играют важную роль в картографировании и инспекции железнодорожной инфраструктуры [13]. Компании Infrabel и TUC RAIL используют дроны с точностью до 2 см в режиме RTK для мониторинга путей, мостов и туннелей. Condor, сотрудничая с Deutsche Bahn, оснащает дроны платформами для автономной подзарядки и защиты в сложных погодных условиях, что позволяет круглосуточно контролировать объекты. Дроны RIEGL, такие как miniVUX-1UAV, достигают точности сканирования до $\pm 2,5$ см, что критически важно для построения 3D-карт. Эти системы могут применяться для оперативной инспекции аварийных ситуаций, особенно в контексте беспилотных поездов, хотя их использование требует регулирования полетных планов и учета радиоэлектронных помех.

В области инерциальной навигации на конференции InnoTrans 2024 были представлены решения от JAE (датчик JIMS-80S с точностью до $0,1^\circ$), SBG Systems (Ekinox Micro с поддержкой RTK и точностью $0,03^\circ$), и Jewell Instruments (серия RailStar с точностью $0,001^\circ$). Однако новых прорывов в этой сфере не отмечено — акцент смещается на интеграцию с GNSS и другими сенсорами для повышения точности в сложных условиях.

Компания SAEYOUNG TECHNOLOGIES представила автоматическую тележку ARC:rc для измерения шероховатости рельсов с точностью до 2 микрон, а также устройство ARC:pr для оповещения персонала о приближении поездов. Оба решения работают автономно, но имеют ограничения в зимних условиях.

Системы от DRAIVE, RideOnTrack и Vecow используют лидары и камеры для автономного мониторинга инфраструктуры, включая классификацию объектов и предотвращение аварий. Vecow заявляет точность 3D-карт до 0,1–1 см на скорости до 40 км/ч. DGNS Sensors GmbH комбинирует GNSS и лидары для детального картографирования в реальном времени.

RIEGL, лидер в области LiDAR-решений, предлагает систему VMX-RAIL для подвижного состава, обеспечивающую точность до 3 мм на скорости 80 км/ч. Это позволяет создавать цифровые модели пути и инфраструктуры, включая контактную сеть.

Эти разработки демонстрируют переход от традиционных методов обследования к комплексным цифровым решениям, сочетающим мобильность, высокую точность и автоматизированную обработку данных. Крайне перспективным направлением представляется интеграция различных технологий сканирования в единые платформы, что позволяет получать всестороннюю информацию о состоянии инфраструктуры в режиме реального времени [14]. Такие системы не только повышают эффективность мониторинга, но и создают основу для цифровых двойников железнодорожных объектов, открывая новые возможности для предиктивного обслуживания и оптимизации эксплуатационных процессов.

Платформы данных

Современная железнодорожная отрасль активно трансформируется под влиянием цифровых технологий, и ключевым элементом этой трансформации становятся платформы данных. Они позволяют агрегировать, обрабатывать и анализировать большие объемы информации, повышая эффективность управления инфраструктурой, подвижным составом и логистическими процессами.

Внедрение цифровых двойников (Digital Twins) железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава становится стандартом для ведущих операторов. Эти модели в реаль- >>>

ном времени отражают состояние объектов, что позволяет прогнозировать износ оборудования и предотвращать аварии. Например, Deutsche Bahn использует цифровые двойники для мониторинга путевой инфраструктуры, что сокращает простои и повышает безопасность. Платформы данных интегрируют информацию с датчиков IoT и исторических данных, применяя машинное обучение для предиктивного обслуживания³⁴.

Железнодорожные компании переходят от разрозненных систем к единым экосистемам данных, которые объединяют операционные, логистические и финансовые потоки. Например, ОАО «РЖД» внедряет платформу «Единый цифровой контур», позволяющую автоматизировать управление перевозками и оптимизировать маршруты [15]. Аналогичные решения разрабатываются в Европе в рамках проекта Shift2Rail, направленного на создание интеллектуальных транспортных систем³⁵.

В сфере грузоперевозок растет применение блокчейн-платформ, обеспечивающих прозрачность цепочек поставок. Например, компания Maersk совместно с IBM разработала платформу TradeLens, которая используется для отслеживания грузов, включая железнодорожные перевозки. В России эксперименты с блокчейном проводит ПАО «ТрансКонтейнер», тестируя смарт-контракты для автоматизации таможенных процедур³⁶.

Железные дороги внедряют AI-решения для анализа видеопотоков и автоматического обнаружения дефектов. Китайские железные дороги используют компьютерное зрение для мониторинга состояния путей, что позволило сократить количество инспекций вручную. В Европе SNCF применяет ИИ для прогнозирования пассажиропотоков и оптимизации расписаний³⁷.

Для обработки данных в режиме реального времени используются облачные платформы (например, Microsoft Azure и AWS) и edge-вычисления, которые позволяют снизить задержки при анализе данных с датчиков. Японская JR East применяет edge-аналитику для мониторинга состояния поездов, что ускоряет реакцию на неисправности³⁸.

Развитие API-интерфейсов позволяет интегрировать железнодорожные системы с внешними сервисами, такими как мультимодальные перевозки и умные города. Например, Amtrak в США предоставляет открытые API для разработчиков, что упрощает создание приложений для пассажиров. В Европе железнодорожное агентство ERA (European Union Agency for Railways) продвигает стандарты Open Rail Data³⁹.

Наконец, с ростом цифровизации неизбежно повышаются риски кибератак. Внедряются стандарты IEC 62443, а также системы защиты на основе ИИ. Например, Network Rail (Великобритания) использует машинное обучение для обнаружения аномалий в сетевом трафике⁴⁰.

На выставке InnoTrans 2024 представлены несколько интересных разработок в этой области. Например, платформа данных LEADMIND, разработанная CAF Digital Services (Испания) для совершенствования процесса эксплуатации железнодорожного транспорта с помощью технологий на основе искусственного интеллекта⁴¹. Платформа обеспечивает мониторинг в режиме реального времени и комплексную аналитику данных для предиктивного обслуживания, оптимизации управления парком, повышения эффективности эксплуатации, а также общей безопасности и удовлетворенности пассажиров. Возможности платформы включают в себя управление энергопотреблением, информирование пассажиров в реальном времени и упреждающее техническое обслуживание.

Цифровой реестр, представленный немецкой компанией DSD Digitale Schiene Deutschland GmbH, предназначен для осуществления общеевропейской стандартизации данных об инфраструктуре, поступающих от всех операторов, и реализации стандартных



³⁴ Подробнее об этом можно прочитать в исследовании McKinsey “Digital twins in rail: A foundation for the autonomous railway”, URL: <https://www.mckinsey.com>

³⁵ Подробности доступны в отчете Европейской комиссии «Digitalisation in rail», URL: <https://rail-research.europa.eu>.

³⁶ Подробнее об этом в статье «Blockchain in logistics», URL: <https://www.ibm.com/blogs/blockchain>

³⁷ Исследование «AI in rail transport», URL: <https://www.sciencedirect.com> подробно раскрывает эти кейсы.

³⁸ Подробнее – в отчете “Edge computing in transportation”, URL: <https://www.gartner.com>.

³⁹ Подробнее – на официальном сайте, URL: <https://www.era.europa.eu>

⁴⁰ Подробнее – в докладе “Cybersecurity in rail”, URL: <https://www.enisa.europa.eu>

⁴¹ Ссылка: <https://www.cafdigitalservices.com/en/leadmind>

интерфейсов для полностью автоматизированного вождения⁴². Целью является обеспечение эксплуатационной совместимости железнодорожных перевозок.

Данные Цифрового реестра можно условно разделить на трехмерные данные и топологические данные (Рис. 6). Трехмерные данные описывают высокоточные локализованные объекты, такие как трехмерные оси пути, платформы, опоры контактной сети, знаки, щиты, светофоры и т.д. Эти данные хранятся в виде упрощенных трехмерных объектов и более подробно описываются различными атрибутами.

Топологические данные содержат общие описания логических связей элементов пути, например, стрелочных переводов или тупиков в виде так называемой «модели вершин и ребер». Затем эта информация дополняется данными о соответствующих элементах инфраструктуры, например, о железнодорожных переездах или туннелях, и данными об эксплуатируемой инфраструктуре, например, профилями скорости или уклонами.

В рамках проекта «Цифровая автоматизация железных дорог вплоть до автономного движения поездов» (Rail to digital automated up to autonomous train operation, R2DATO) цифровой реестр разрабатывается как «единый источник истины» для надежных статических данных об инфраструктуре (рис. 7). Это важнейшая система как для неответственных информационных приложений, так и для ответственных систем, связанных с безопасностью. Помимо предоставления надежных данных об инфраструктуре, цифровой реестр также включает в себя такие важные функции, как подготовка данных, синхронизация, управление версиями, активация и хранение.

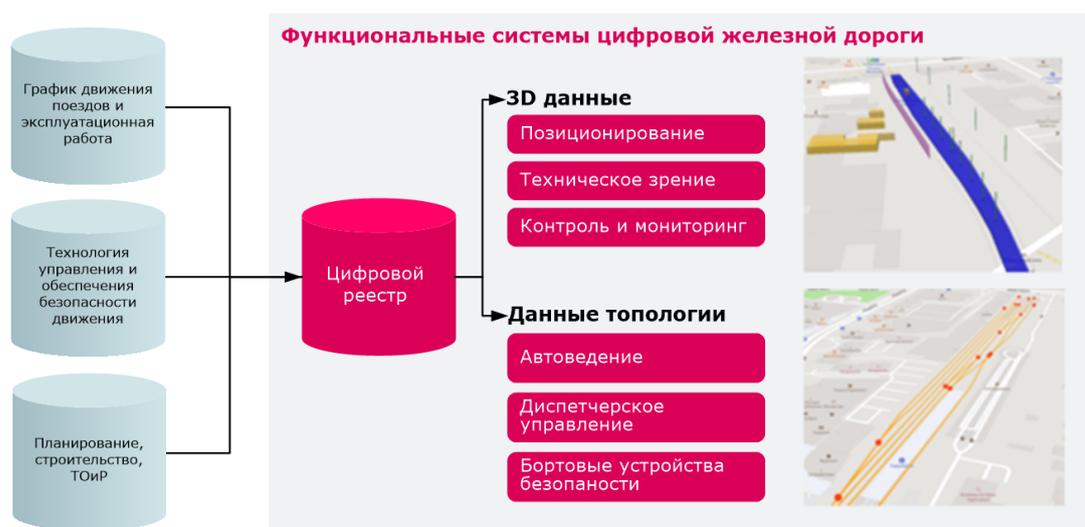


Рис. 7 – Цифровой реестр как центральное хранилище данных в задачах цифровой железной дороги Германии

Платформа Hyper Mobility Asset Expert (HMAX) – Платформа управления цифровыми активами на базе искусственного интеллекта – разработана⁴³ Hitachi Rail (Италия) в сотрудничестве с NVIDIA и функционирует на базе искусственного интеллекта промышленного уровня NVIDIA IGX. Такое решение должно позволить внедрять передовые ИИ-решения непосредственно на отдельных железнодорожных объектах, что даст возможность операторам использовать аналитику на основе данных для оптимизации эксплуатационной работы, составления и исполнения графиков технического обслуживания и использования инфраструктурных активов. >>>

⁴² Ссылка: www.digitale-schiene-deutschland.de/de/aktuelles/2024/dsd-auf-der-innotrans-2024-nachbericht

⁴³ Ссылка: www.hitachirail.com/products-and-solutions/digital-asset-management/

Пакет NMAX объединяет существующие цифровые средства, включая датчики, которые обеспечивают дистанционное управление объектами инфраструктуры. Внедрение интеллектуальных решений позволит проводить более быстрый, глубокий и всесторонний анализ данных. Платформа собирает актуальную информацию, что позволяет операторам корректировать работу управляемой системы в режиме реального времени для улучшения качества и более эффективного прогнозирования потребностей в техническом обслуживании. Подсистема Holoscan платформы NVIDIA IGX позволяют обрабатывать показания датчиков в режиме реального времени непосредственно на борту поезда и объектах инфраструктуры.

Архитектура платформы «от периферии к облаку» (edge to cloud) обеспечивает сотрудников компании-оператора удаленным доступом к аналитическим данным через единый портал. Платформа может интегрироваться с техническими комплексами диспетчерского управления и отдельными рабочими местами.

Можно сказать, что железнодорожная отрасль движется к полной цифровизации, где платформы данных становятся основой для принятия решений. Ключевые направления – предиктивная аналитика, интеграция IoT и AI, а также создание безопасных и открытых экосистем. Эти тренды не только повышают эффективность перевозок, но и способствуют переходу к «умным» железным дорогам будущего.

Роботизация

Современные технологии роботизации активно трансформируют железнодорожную отрасль, повышая безопасность, эффективность и автономность перевозочных процессов. Ключевые направления включают автоматизацию подвижного состава, внедрение роботизированных систем обслуживания и применение искусственного интеллекта для управления инфраструктурой.

Ведущие железнодорожные операторы мира активно тестируют **автономные поезда**. Например, в Австралии компания Rio Tinto уже несколько лет эксплуатирует полностью автономные грузовые составы AutoHaul на расстояниях до 1700 км, что позволило повысить точность доставки на 30%⁴⁴. Беспилотные поезда курсируют на около 1000 км линий метрополитена в целом ряде стран.

В России проект «Безопасный городской поезд» (реализуемый ОАО «РЖД» совместно с АО «НИИАС») предусматривает создание поездов с элементами автономного управления. Технология построена на использовании компьютерного зрения для обнаружения препятствий [16]⁴⁵.

Техническое обслуживание путей и контактной сети все чаще доверяют роботам-дефектоскопам и дронам. Швейцарские железные дороги (SBB), например, используют⁴⁶ роботизированные комплексы для автоматизированного осмотра тоннелей, что сокращает время проверки на 40%.

В Японии компания JR East внедрила роботов-путевых обходчиков, оснащенных тепловизорами и датчиками вибрации. Они способны обнаруживать микротрещины в рельсах, предотвращая возможные аварии⁴⁷.

Логистические хабы также переходят на роботизированную обработку грузов. В Германии DB Schenker использует автономных роботов-погрузчиков в сортировочных центрах, что ускоряет обработку контейнеров на 25%⁴⁸.

В Китае компания CRRC разработала роботизированную систему перегрузки контейнеров с применением машинного зрения и искусственного интеллекта, что позволило сократить простои вагонов⁴⁹.



⁴⁴ Подробнее см. в отчете Rio Tinto, 2023. URL: <https://www.riotinto.com>

⁴⁵ Подробности на сайте АО «НИИАС», URL: <https://nias.ru>

⁴⁶ См. исследование SBB, 2022. URL: <https://company.sbb.ch>

⁴⁷ См. материалы JR East Technical Review, URL: <https://www.jreast.co.jp>

⁴⁸ См. кейс DB Schenker Robotics, URL: <https://www.dbschenker.com>

⁴⁹ Подробнее – в публикации CRRC, 2023. URL: <https://www.crregc.cc>

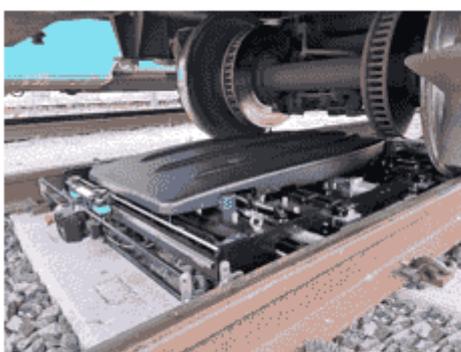
Железные дороги все чаще используют AI-алгоритмы для оптимизации графиков движения. Британская Network Rail применяет⁵⁰ систему «умного планирования», которая в реальном времени корректирует маршруты при возникновении задержек, сокращая простои на 15%.

Среди новых направлений:

- роботы-инспекторы для мониторинга контактной сети (разрабатываются Alstom и Siemens);
- автономные дроны-курьеры для доставки грузов на станции (тестируется Deutsche Bahn);
- роботизированные ремонтные платформы (тестируются SNCF во Франции).

Итальянская компания Locomotion представила на выставке мобильного робота Felix B1⁵¹ для инспекции железнодорожной инфраструктуры. Он позволяет создавать трехмерные модели inspectируемых частей железной дороги. Система позволяет хранить, обрабатывать и отображать в режиме реального времени все интересующие показатели и выдавать соответствующие отчеты. Робот весит менее 50 кг.

Итальянская компания Next Generation Robotics Srl представила семейство робототехнических систем ARGO, специально разработанных для осмотра подвижного состава⁵² (рис. 8). ARGO 2.0. – коллаборативный робот, предназначенный для автоматизации, цифровизации и «дистанционного» визуального осмотра подвижного состава. ARGO может свободно перемещаться по железному пути под подвижным составом и удаленно предоставлять оператору изображения и видео в формате Full HD ходовой части подвижного состава.



ARGO 2.0



ARGO 3.0

Рис. 8 – Семейство робототехнических систем ARGO, разработанных для осмотра подвижного состава

Бортовые алгоритмы ИИ позволяют ARGO автономно обнаруживать наиболее важные компоненты поезда для их тщательного осмотра. Робота можно использовать удаленно в ручном режиме или запустить автономные процедуры осмотра.

Вес робота составляет 140 кг, максимальная скорость движения – 1,5 м/с, скорость сканирования – 2,5 мин/с, автономная работа на протяжении 10 ч, удаленное управление осуществляется с помощью web-приложения. ARGO 3.0. – коллаборативный робот массой 220 кг. Максимальная скорость движения – 3 м/с. Комплект датчиков включает в себя камеру с горизонтальной перспективой (12 Мп) и камеру для роботизированной руки (5 Мп). Автономия – 10 ч.

Роботизация железнодорожного транспорта развивается по нескольким ключевым направлениям: автономные поезда, роботизированное обслуживание инфраструктуры и AI-управление.

Эти технологии уже демонстрируют значительный экономический эффект и повышение безопасности. В ближайшие годы стоит ожидать их массового внедрения, что приведет к созданию полностью автономных железнодорожных систем⁵³. >>>

⁵⁰ См. отчет Network Rail Digital Railway, URL: <https://www.networkrail.co.uk>

⁵¹ Ссылка: <https://plus.innotrans.de/product/Felix-r-B1--0cc21a1b-b34e-48b5-ad49-98e36f98ef35>

⁵² Ссылка: <https://plus.innotrans.de/product/ARGO--9a1cb13f-7b56-4356-ab17-d395451a9c1d>

⁵³ Дополнительные материалы можно найти в отчетах International Union of Railways (UIC) и European Railway Agency)

Немецкая Deutsche Bahn совместно с Техническим университетом Дрездена создала автономную платформу RailInspector, способную проводить диагностику путей с точностью до 0,1 мм, используя комбинацию лазерного сканирования и тепловизионного контроля. Этот робот перемещается со скоростью до 15 км/ч и за одну смену может проверить до 30 км железнодорожного полотна.

Значительный прогресс наблюдается в области роботизированного ремонта и обслуживания. Швейцарская компания Stadler разработала роботизированный комплекс для автоматической сварки рельсов, который повышает качество соединений на 40% по сравнению с ручными методами. Особенностью системы является использование искусственного интеллекта для адаптации к различным погодным условиям и типам рельсов. В то же время японская JR East тестирует роботов-манипуляторов для очистки и покраски подвижного состава, что сокращает время технического обслуживания на 35%.

Перспективным можно назвать создание модульных робототехнических платформ для работы в опасных условиях. Британская Network Rail внедряет роботизированные системы для обследования туннелей и мостов, оснащенные датчиками структурного мониторинга и системами компьютерного зрения. Эти комплексы способны работать в условиях ограниченной видимости и при высоком уровне радиации, обеспечивая безопасность персонала.

Особый интерес представляют разработки в области грузовой робототехники. Так, например, китайская CRRC демонстрирует автономные системы сортировки грузов на станциях, где роботы-погрузчики с точностью до 5 мм размещают контейнеры на платформах. Эти решения сочетают технологии SLAM-навигации и машинного обучения для работы в сложных погодных условиях.

На выставке InnoTrans 2024 были представлены инновационные решения, кардинально меняющие подходы к обслуживанию инфраструктуры и подвижного состава. Эти разработки не только повышают безопасность, выводя персонал из опасных зон, но и значительно улучшают эффективность эксплуатационных процессов.

Итальянская компания RFI представила революционный 21-тонный диагностический комплекс URV, способный автономно контролировать состояние инфраструктуры со скоростью до 200 км/ч (рис. 9). Его система технического зрения с дальностью обнаружения 500 метров открывает новые возможности для мониторинга высокоскоростных линий. Параллельно RFI демонстрирует компактные инспекционные тележки, которые за один заряд могут проверить до 50 км путей, используя передовые сенсорные технологии для анализа геометрии рельсового полотна.



Рис. 9 – Диагностический комплекс URV (Unmanned Railway Vehicle) от RFI - FSI Group

Австралийская компания Downer показала комплексный подход к автоматизации, представив сразу два специализированных робота. Первый – для комплексной уборки вагонов, способный самостоятельно ориентироваться в сложном пространстве пассажирских салонов. Второй – инспекционная система TRES с роботизированной рукой, позволяющая обследовать труднодоступные участки подвижного состава, включая использование вспомогательных дронов для осмотра надвагонного пространства.

Особый интерес вызвали узкоспециализированные решения, такие как робот-расцепщик TTG-DG01 от китайской Quick High Robot, уже успешно внедренный на нескольких сортировочных станциях. Его 98% эффективность расцепки вагонов и система технического зрения с временем реакции 100 мс демонстрируют зрелость технологии для промышленного применения. Не менее впечатляющим оказался покрасочный робот SJMAN-20C, способный за 4 часа полностью обработать вагон, значительно снижая вредное воздействие на персонал.

Корейские разработчики представили нестандартные решения, включая робота-навигатора для экстренной эвакуации пассажиров из метро, способного работать в экстремальных температурных условиях. Этот проект подчеркивает потенциал робототехники в обеспечении безопасности пассажиров.

Несмотря на впечатляющие достижения, отрасль сталкивается с вызовами. Высокая стоимость роботизированных систем и необходимость их адаптации к сложным климатическим условиям остаются ключевыми барьерами для массового внедрения. Однако стремительное совершенствование технологий и растущие затраты на ручной труд создают мощный экономический стимул для автоматизации.

Перспективы очевидны: в ближайшие годы железнодорожная отрасль не сможет сохранять конкурентоспособность без активного внедрения робототехнических решений. Уже сегодня пилотные проекты демонстрируют 30-50% повышение эффективности ключевых процессов, что делает роботизацию не просто модным трендом, а стратегической необходимостью для транспортных систем будущего. К 2030 году ожидается появление полностью автономных роботизированных депо, где все операции по обслуживанию и ремонту подвижного состава будут выполняться автоматизированными системами. Особое внимание будет уделено разработке энергоэффективных решений с автономным питанием и системам коллективного взаимодействия роботов (swarm robotics) для масштабных инфраструктурных проектов. Эти инновации позволят сократить затраты на содержание инфраструктуры на 25-30% при одновременном повышении точности и качества работ.

Дистанционное управление

Железнодорожная отрасль активно развивает технологии дистанционного управления, открывающие новые возможности для повышения эффективности и безопасности перевозок. Ведущие производители внедряют централизованные диспетчерские центры, где операторы могут управлять несколькими поездами одновременно на расстоянии сотен километров. Китайские железные дороги уже используют такие системы на высокоскоростных линиях, где один диспетчер контролирует до 10 составов через интегрированную платформу на базе технологий 5G и искусственного интеллекта.

Особое внимание уделяется гибридным моделям управления, сочетающим автономное вождение с возможностью дистанционного вмешательства. Немецкая Deutsche Bahn тестирует систему, где поезда работают в автономном режиме на простых участках, а при возникновении нештатных ситуаций управление перехватывают операторы из центрального диспетчерского пункта. Такой подход особенно востребован на грузовых перевозках, позволяя оптимизировать человеческие ресурсы [17].

Технологии виртуальной и дополненной реальности революционизируют подготовку операторов дистанционного управления. Французская Alstom внедряет VR-тренажеры, воспроизводящие реальные условия управления с точностью до 95%, что сокращает время обучения новых специалистов на 40%. Одновременно развиваются AR-решения для дистанционной технической поддержки, когда эксперты могут видеть происходящее в кабине через smart-очки машиниста. >>>

Ключевым направлением стало управление инфраструктурой на расстоянии. Швейцарская Stadler Signalling разработала облачную платформу для мониторинга и дистанционного обслуживания стрелочных переводов, светофоров и других критических элементов. Система анализирует данные с 20 000 датчиков, прогнозируя необходимость технического вмешательства.

Дистанционное управление постепенно становится стандартом модернизации железнодорожных систем, о чем ярко свидетельствовали экспонаты последней выставки InnoTrans. Развитие технологий 5G, совершенствование радиоканалов и систем технического зрения открывают новые возможности для удаленного контроля подвижного состава, особенно в сложных условиях сортировочных станций или при ограниченной видимости.

Современные решения в этой области демонстрируют заметный прогресс. Бельгийская компания OTIV представила интегрированные пульта управления с функциями тренажера для машинистов, а корейская KoRail сделала ставку на использование сетей 5G для минимальных задержек при передаче видеопотоков. Особый интерес вызвала система CAF, позволявшая в реальном времени управлять трамваем, находящимся в Норвегии, хотя конкретные показатели задержки сигнала не раскрывались.

В сегменте носимых устройств управления выделяются решения компании Cattron, сочетающие эргономичный дизайн с надежными механическими элементами управления. Эти компактные пульта, дополненные специальными жилетами, особенно востребованы при маневровых операциях и работе с роботизированными системами, такими как гибридные локомотивы-роботы VLEX с грузоподъемностью до 1000 тонн (рис. 10). Примечательно, что голосовое управление в представленных решениях пока не получило широкого распространения, хотя подобные технологии уже активно тестируются в отдельных сегментах отрасли.

Система OTIV.ONE демонстрирует новый подход к обеспечению безопасности маневровых операций. Ее камеры с обзором 200 градусов и защитой IP64 позволяют полностью контролировать слепые зоны, передавая изображение через сети 4G/5G на планшеты машиниста.

Японская Catana дополнила этот технологический ландшафт решением для эффективного сжатия и хранения данных, получаемых от систем технического зрения, что особенно важно для последующего анализа инцидентов.



Рис. 10 – Роботизированный комплекс VLEX 20

Параллельно развивается направление тренажеров и симуляторов, где особенно выделяются решения AZD Praha с реалистичной графикой и поддержкой сложных сценариев. Эти системы становятся неотъемлемой частью подготовки операторов дистанционного управления, позволяя отрабатывать навыки в виртуальной среде, максимально приближенной к реальным условиям. >>>

Общий тренд отрасли показывает постепенный, но уверенный переход к комплексным решениям дистанционного управления, где ключевыми факторами становятся надежность связи, качество визуализации и эргономика рабочих мест операторов [18, 19]. При этом сохраняется важная роль человеческого фактора, что подчеркивает гибридный характер современных систем управления железнодорожным транспортом. Перспективы на ближайшие 5 лет включают массовое внедрение цифровых двойников для дистанционного управления, которые будут отражать состояние инфраструктуры и подвижного состава в реальном времени. Особенно важным станет развитие защищенных каналов связи (FRMCS [20], квантовое шифрование) для обеспечения кибербезопасности.

Заключение

Не вызывает сомнений, что к выставке InnoTrans 2026 отрасль подойдет с новыми технологическими достижениями, причём искусственный интеллект и робототехника останутся ключевыми драйверами трансформации. Ожидается глубокая интеграция ИИ в системы мониторинга, предиктивной аналитики и управления движением, что позволит повысить эффективность, безопасность и адаптивность железнодорожных систем. С увеличением числа ИИ-решений особую актуальность приобретет стандартизация и унификация технологий, обеспечивающая их совместимость и модульность.

Это откроет путь для более гибкого внедрения инноваций и быстрого реагирования на меняющиеся требования рынка.

В числе приоритетов скорее всего останется экологическая повестка: развитие водородных поездов, гибридных систем и технологий утилизации аккумуляторов станет неотъемлемой частью общей стратегией декарбонизации транспорта. Параллельно продолжится роботизация процессов – от инспекции путей до автоматизированных сортировочных станций. Беспилотные технологии, включая системы автономного управления (УА4), получают новый импульс благодаря совершенствованию компьютерного зрения и машинного обучения. Эти решения позволят сократить эксплуатационные расходы на 15-25% при одновременном повышении надежности и пропускной способности железных дорог.

Важнейшим фактором успеха на этом пути остаётся международное сотрудничество в области стандартизации, особенно в сфере функциональной безопасности, ИИ и автономных систем. Только совместные усилия регуляторов, производителей и операторов позволят создать устойчивую экосистему, в которой инновации будут внедряться быстро, безопасно и эффективно. Выставки InnoTrans становятся площадкой, где эти тренды получают конкретные очертания, определяя будущее железных дорог на годы вперед.

Список использованной литературы

1. Watanabe, T. (2003). Some Aspects of Rolling Stock Technologies in the Future. Quarterly Report of Rtri, 44(1), 4–7. <https://doi.org/10.2219/RTRIQR.44.4>.
2. Ronanki, D. (2022). Overview of Rolling Stock. 249–281. <https://doi.org/10.1002/9781119812357.ch11>.
3. Ronanki, D., Singh, S. A., & Williamson, S. S. (2017). Comprehensive Topological Overview of Rolling Stock Architectures and Recent Trends in Electric Railway Traction Systems. 3(3), 724–738. <https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2703583>.
4. Kallee, S. W., & Davenport, J. (2007). Trends in design and fabrication of rolling stock. European Railway Review, 1. <https://trid.trb.org/view/839051>.
5. Gomes, V. M. G., & De Jesus, A. M. P. (n.d.). Additive Manufacturing in the Railway Rolling Stock: Current and Future Perspective. Procedia Structural Integrity. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.035>.
6. Rumsey, A. F. (2006). Developments in Train Control Worldwide. 223–232. <https://doi.org/10.1049/IC.2006.0689>.
7. Baturin, A. P., & Osipov, A. P. (2023). Modern Systems of Train Traffic Interval Control on World Railways. Мир Транспорта. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-2>.



8. Rozenberg, E., & Ozerov, A. (2022). Evolution of Rail Operations Control Centres. *Journal of Information Technology and Applications*, 24(2). <https://doi.org/10.7251/jit2202166r>.
 9. Vantuono, W. C. (2002). New-tech train control takes off. *Railway Age*, 203(5). <https://trid.trb.org/view/720206>.
 10. Охотников, А. Л. Интегрирование систем технического зрения и высокоточного позиционирования для интервального регулирования движения поездов / А. Л. Охотников // Интеллектуальные транспортные системы: Материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 30 мая 2024 года. – Москва: Российский университет транспорта (МИИТ), 2024. – С. 710-719. – DOI 10.30932/9785002446094-2024-710-719. – EDN GVNXDDE.
 11. Долгий, А. И. Применение методов визуальной аналитики в системах интеллектуального мониторинга динамических процессов / А. И. Долгий, С. М. Ковалев // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте (ИММВ-2024): Сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции. В 2-х томах, Коломна, 14–17 мая 2024 года. – Смоленск: Универсум, 2024. – С. 129-139. – EDN KEIXPU.
 12. Павловский, А. А. К концепции внедрения информационного моделирования в железнодорожном транспортном комплексе / А. А. Павловский, А. В. Озеров, А. П. Куроптева // Наука и технологии железных дорог. – 2022. – Т. 6, № 3(23). – С. 20-31. – EDN XCVJSI.
 13. Павловский, А. А. Проверка возможности применения беспилотных авиационных систем при решении задач железнодорожного транспорта / А. А. Павловский, А. И. Карелов, М. А. Щеглов // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2023. – № 4(64). – С. 14-28. – EDN BVEKNT.
 14. Мониторинг объектов строительства железнодорожной инфраструктуры с применением данных с беспилотных авиационных систем / М. А. Щеглов, А. И. Карелов, А. А. Майоров, А. А. Павловский // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2023. – Т. 67, № 5. – С. 153-164. – DOI 10.30533/GiA-2023-069. – EDN JZMDAD.
 15. Махутов Н., Розенберг И., Шепитько Т., Балановский В. Писарев Ю., Чирков А. Зязнов Г. Единый безопасный технологический цифровой контур в сфере транспорта. Системы безопасности, № 1, 2023. URL: <https://www.secuteck.ru/articles/edinyj-bezopasnyj-tekhnologicheskij-cifrovoj-kontur-v-sfere-transporta>. Дата доступа: 01.04.2025.
 16. Долгий, А. И. Технические аспекты и перспективы развития системы автоматического управления движением электропоездов / А. И. Долгий // Железнодорожный транспорт. – 2024. – № 5. – С. 15-18. – EDN DAXYGB.
 17. Popov, P.A. Prospects of autonomous railway transport development / P.A. Popov, A.V. Ozerov, A.S. Marshova // *BRICS Transport*. – 2024. – Vol. 3, No. 3. – DOI 10.46684/2024.3.4. – EDN HPYXEZ.
 18. Cogan, B., & Milius, B. (2023). Remote control concept for automated trains as a fallback system: needs and preferences of future operators. <https://doi.org/10.1108/srt-11-2022-0018>
 19. Vantuono, W. C. (2002). New-tech train control takes off. *Railway Age*, 203(5). <https://trid.trb.org/view/720206>.
 20. Chérif, W., Vitry, C., & Durieux, L. (2023). Adaptable Communications System for train remote driving. 1–5. <https://doi.org/10.1109/vtc2023-spring57618.2023.10200708>.
-