

DIGITAL TECHNOLOGIES IN RAIL TRANSPORTATION: A SYSTEMATIC REVIEW

Shabonova Dilnoza

Tashkent State Transport University, Uzbekistan, dilishabon16@gmail.com

Аннотация. В данной работе рассматривается масштабный процесс цифровой трансформации железнодорожной отрасли в рамках глобальной концепции «Железная дорога 4.0» [1,2]. Основное внимание уделяется интеграции ключевых технологий Индустрии 4.0, таких как Интернет вещей (IoT), искусственный интеллект (AI), аналитика больших данных (Big Data) и цифровые двойники (Digital Twins) [3,4,5]. В статье анализируются три приоритетные области применения этих технологий: переход от традиционного ремонта к предиктивному (прогностическому) обслуживанию инфраструктуры и подвижного состава, оптимизация управления движением в реальном времени и повышение уровня безопасности, включая защиту на переездах и интеллектуальное видеонаблюдение [3,6]. Наряду с технологическими преимуществами, исследуются критические вызовы внедрения, такие как вопросы кибербезопасности в облачных средах, проблема гетерогенности (разнородности) технических систем, а также этические аспекты и необходимость развития «объяснимого AI». В заключении подчеркивается, что комплексная цифровизация является необходимым условием для повышения экономической эффективности, надежности и достижения целей устойчивого развития современного железнодорожного транспорта [4].

Ключевые слова: Железная дорога 4.0, Интернет вещей (IoT), искусственный интеллект, цифровые двойники, предиктивное обслуживание, цифровая трансформация, безопасность на транспорте.

Введение. В современных условиях железнодорожный транспорт рассматривается как основа мобильности будущего, обеспечивающая наиболее экологичный, устойчивый и надежный способ перемещения грузов и пассажиров [1,2]. Рост численности населения и потребность в эффективной логистике диктуют необходимость постоянного совершенствования отрасли [3]. Однако железнодорожная система представляет собой чрезвычайно сложную структуру, состоящую из множества взаимосвязанных активов и подсистем, распределенных по огромным территориям [3,4]. Традиционные методы управления и обслуживания, зачастую полагающиеся на ручной труд и реактивный подход, уже не могут в полной мере удовлетворить современные требования к безопасности и пропускной способности [4,5]. Ответом на эти вызовы стала концепция «Железная дорога 4.0» (Railway 4.0) или «Цифровая железная дорога», которая знаменует собой процесс конвергенции физического и виртуального миров. Цифровая трансформация отрасли базируется на внедрении ключевых технологий Индустрии 4.0, таких как Интернет вещей (IoT), искусственный интеллект (AI), аналитика больших данных (Big Data), облачные вычисления и цифровые двойники (Digital Twins). Эти инструменты позволяют перейти от простого сбора данных к глубокому анализу состояния инфраструктуры и подвижного состава в режиме реального времени [6].

Техническое обслуживание: переход от традиционного ремонта после поломки к предиктивному обслуживанию на основе фактического состояния узлов и агрегатов [6]. Управление операциями: оптимизация графиков движения, прогнозирование задержек и повышение энергоэффективности тяги. Безопасность: интеллектуальное видеонаблюдение,

системы предотвращения столкновений и автоматический мониторинг объектов инфраструктуры.

Несмотря на очевидные преимущества, процесс цифровизации сталкивается с рядом барьеров, включая проблемы кибербезопасности, сложности интеграции разнородных систем и дефицит качественных микроданных [3]. Данная работа направлена на комплексный анализ текущего состояния технологий Индустрии 4.0 на железнодорожном транспорте, исследование реализованных сценариев их применения и определение перспективных направлений развития интеллектуальных транспортных систем (рис.1).

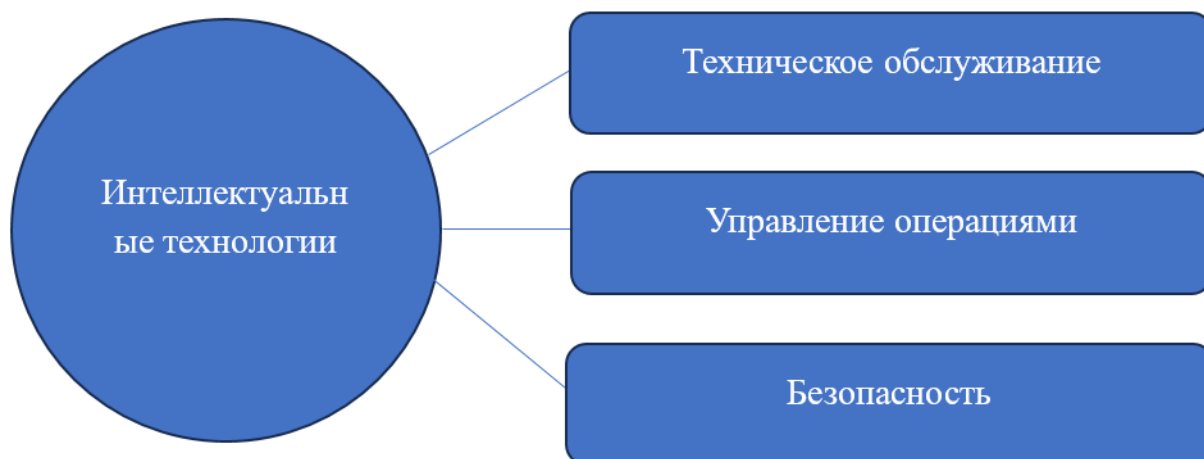


Рис 1. Направлений развития интеллектуальных транспортных систем

1. Технологический фундамент и концепция «Железной дороги 4.0»

Современная цифровая трансформация железных дорог, часто называемая «Железная дорога 4.0» (Railway 4.0), представляет собой процесс технологической эволюции и конвергенции физического и виртуального миров [1]. Основная цель этого перехода — создание интеллектуальной киберфизической системы, где информация от датчиков, установленных на физическом оборудовании, собирается, хранится (как правило, в облачных сервисах) и анализируется для принятия решений в режиме реального времени [1,2].

Внедрение технологий Индустрии 4.0 позволяет отрасли отойти от реактивного управления и перейти к проактивным стратегиям, повышая эффективность использования ресурсов и открывая возможности для создания новых транспортных продуктов [2,3].

Согласно результатам систематических обзоров, фундамент «Железной дороги 4.0» составляют следующие технологические направления:

- Интернет вещей (IoT): система из миллиардов подключенных устройств и датчиков, которые обеспечивают бесперебойную связь и обмен данными о состоянии инфраструктуры и подвижного состава (температура, вибрация, GPS-координаты и др.).
- Искусственный интеллект (AI) и машинное обучение (ML): технологии, способные к самообучению и имитации человеческих процессов рассуждения для автоматизации инспекций, прогнозирования поломок и управления трафиком.
- Аналитика больших данных (Big Data): методы обработки огромных массивов информации для извлечения ценных инсайтов и оптимизации сложных железнодорожных процессов.

- Облачные вычисления (Cloud Computing): обеспечивают повсеместный доступ к общим пулам вычислительных ресурсов и решают проблему хранения гигантских объемов данных, поступающих из множества источников [1].
- Моделирование и симуляция: позволяют проверять гипотезы и оценивать эффективность новых методов управления без риска для реальной эксплуатации [6].

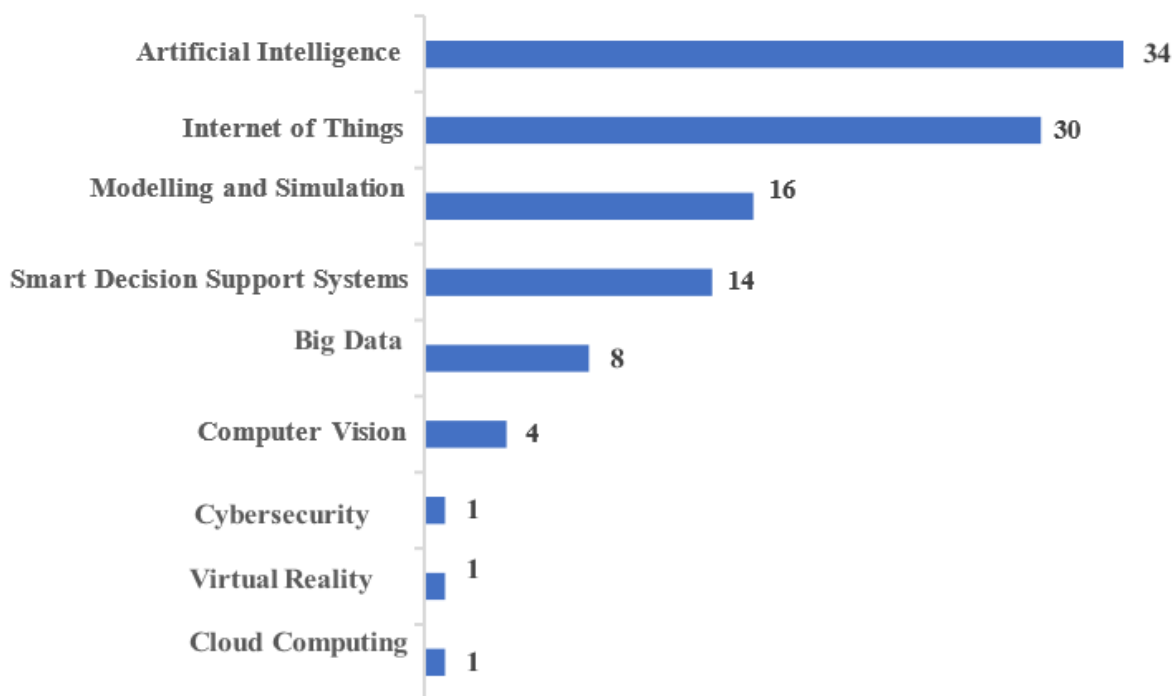


Рис 2. Технологические направления

Центральным элементом концепции Railway 4.0 является технология цифрового двойника (Digital Twins). Цифровой двойник определяется как динамическая виртуальная модель или представление физического объекта, системы или процесса, которое в реальном времени собирает и обрабатывает данные из реальной среды. Ключевое преимущество DT заключается в возможности тестировать изменения на виртуальной копии системы, не нарушая нормальную работу транспорта. Это позволяет прогнозировать сбои, оптимизировать техническое обслуживание и отслеживать состояние активов на протяжении всего их жизненного цикла — от проектирования и строительства до эксплуатации и утилизации.

Исследователи классифицируют применение вышеуказанных технологий по трем ключевым доменам:

1. Мониторинг: обнаружение дефектов рельсов, контроль состояния оборудования поездов и экологический мониторинг.
2. Технологии принятия решений и планирования: оптимизация транспортных потоков, сокращение задержек поездов и минимизация энергопотребления.
3. Связь и безопасность: развитие протоколов защиты данных (кибербезопасность), систем обеспечения безопасности на станциях и повышение качества связи для пассажиров [6].

Таким образом, переход к «Железной дороге 4.0» превращает отрасль в интегрированную цифровую экосистему, способную гибко адаптироваться к растущим требованиям мобильности [1].

2. Ключевые области применения технологий Big Data для железной дороги

Практическая реализация концепции «Железная дорога 4.0» охватывает широкий спектр задач — от технического обслуживания инфраструктуры до управления клиентским опытом. Согласно исследованиям, основные усилия сосредоточены в трех ключевых доменах: мониторинг, управление операциями и безопасность [1,2].

Наибольшее количество исследований и внедрений связано с мониторингом состояния активов, что позволяет перейти от планового ремонта к обслуживанию по фактическому состоянию [3,4]. Мониторинг инфраструктуры: Использование технологий машинного зрения и глубокого обучения позволяет автоматизировать инспекцию путей. Например, системы на базе нейронных сетей способны обнаруживать трещины на поверхности рельсов и дефекты крепежных элементов с высокой точностью [5,6]. Одним из успешных примеров является опыт компании ProRail, которая использует датчики вибрации и потребления энергии для прогнозирования сбоев в работе стрелочных переводов [2]. Контроль подвижного состава: Технологии Индустрии 4.0 позволяют осуществлять автоматизированную проверку колесных пар. Системы на основе глубокого обучения (например, архитектура ResNet-50) обеспечивают стопроцентную точность при проверке качества сборки колесных узлов на производстве. Также применяются акустические датчики для оценки состояния подшипников в движении [6].

Цифровизация позволяет оптимизировать использование пропускной способности сети и снизить эксплуатационные расходы за счет точного прогнозирования и автоматизации. Прогнозирование задержек и времени прибытия: Аналитика больших данных (Big Data) и алгоритмы машинного обучения, такие как SVM (метод опорных векторов), позволяют предсказывать время прибытия грузовых поездов с точностью, на 16% превышающей традиционные методы. Это критически важно для минимизации «цепной реакции» задержек в сложных сетях. Системы поддержки машинистов (DAS): Интеллектуальные алгоритмы дают рекомендации по выбору оптимального режима вождения в реальном времени. Например, приложение AftelAPP помогает машинистам грузовых поездов плавно входить в зоны слияния путей, избегая ненужных остановок и сокращая время в пути. Энергоэффективность: Для снижения затрат на тягу применяются методы оптимизации, такие как алгоритм имитации отжига (Simulated Annealing), который позволяет минимизировать потребление энергии, не нарушая при этом установленное расписание движения.

Безопасность, связь и мобильность пассажиров: Современные системы безопасности выходят за рамки простого наблюдения, становясь проактивными и интеллектуальными. Интеллектуальное видеонаблюдение: Нейронные сети используются для анализа плотности пассажиропотока на станциях. Это позволяет выявлять риски переполнения платформ и предотвращать несчастные случаи, такие как давка. Также внедряются системы автоматического обнаружения посторонних объектов на железнодорожных переездах [5]. Связь и передача данных: Развиваются концепции обеспечения высокоскоростной связи (5G+/6G) для пассажиров даже в труднодоступных районах. Одной из инновационных идей является использование беспилотных летательных аппаратов (UAV) в качестве ретрансляторов для обеспечения непрерывного интернет-соединения в движущихся поездах. Кибербезопасность: С ростом числа IoT-устройств критическое значение приобретает защита каналов связи. Внедряются специализированные алгоритмы контроля доступа для предотвращения несанкционированного вмешательства в системы управления движением.

Таким образом, технологии Индустрии 4.0 не просто улучшают отдельные процессы, а создают единую информационную среду, где данные от физических объектов напрямую влияют на управленческие решения в реальном времени.

3. Основные барьеры и вызовы цифровизации железной дороги

Несмотря на значительный потенциал, реализация концепции «Железная дорога 4.0» сталкивается с рядом серьезных препятствий, которые требуют комплексного решения:

- **Качество и гетерогенность данных:** Одной из главных проблем является то, что железнодорожные данные часто поступают из разрозненных источников, имеют разные форматы и могут быть непоследовательными или неполными [1,2]. Объединение этих массивов для извлечения ценной информации остается технически сложной задачей [1].

- **Кибербезопасность и защита частной жизни:** Переход к облачным вычислениям и широкое использование IoT-устройств создают новые векторы угроз [3,4]. Конфиденциальность данных пассажиров (например, из систем оплаты проезда) и защита критически важных систем управления движением являются приоритетными направлениями [1,5]. Это заставляет многие компании проявлять осторожность в вопросах обмена данными [1].

- **Высокие затраты на внедрение:** Переход на интеллектуальные системы мониторинга требует значительных первоначальных инвестиций, хотя в долгосрочной перспективе это позволяет снизить расходы на ручные инспекции и ликвидацию аварий [6].

Для преодоления существующих вызовов исследователи предлагают использовать современные вычислительные парадигмы: Облачные и распределенные вычисления: Для обработки огромных объемов данных (Big Data) используются такие инструменты, как Apache Hadoop и архитектура MapReduce, позволяющие распределять задачи между множеством серверов. Примером служит опыт железных дорог Китая, внедривших облачную систему для отслеживания грузов и диспетчеризации. Связь нового поколения и БПЛА: Для обеспечения непрерывной связи в 5G+/6G сетях рассматривается использование беспилотных летательных аппаратов (UAV) в качестве мобильных ретрансляторов, что особенно актуально для поездов, движущихся через географически сложные районы. Интеллектуальные системы поддержки (SDSS) и VR: Внедрение «умных» систем поддержки принятия решений помогает операторам оптимизировать траектории движения и графики обслуживания. Кроме того, технологии виртуальной реальности (VR) уже применяются для обучения персонала действиям в чрезвычайных ситуациях при железнодорожных авариях.

Перспективы «Железной дороги 4.0» не ограничиваются только технической эффективностью:

- **Устойчивость и экология:** Глобальный вызов изменения климата заставляет отрасль фокусироваться на минимизации выбросов углерода через оптимизацию энергопотребления. Использование алгоритмов имитации отжига (Simulated Annealing) позволяет подбирать режимы тяги, экономящие энергию без нарушения расписания.

- **Анализ общественных настроений:** Использование методов интеллектуального анализа текста (Sentiment Analysis) в социальных сетях позволяет компаниям в реальном времени отслеживать удовлетворенность пассажиров и выявлять потенциальные угрозы безопасности.

• Коллаборативные экосистемы: Будущее отрасли за созданием единых цифровых платформ, объединяющих операторов, владельцев инфраструктуры, ремонтные бригады и государственные органы для совместного использования данных и управления рисками.

Заключение Цифровая трансформация железных дорог — это переход к высокоадаптивной киберфизической системе. Технологии Индустрии 4.0 позволяют превратить железную дорогу в наиболее надежный, безопасный и экологически чистый вид транспорта XXI века, способный отвечать на растущие запросы глобальной мобильности.

4. Архитектурная реализация и кибербезопасность интеллектуальных платформ

Для перехода к полноценной модели «Железной дороги 4.0» требуется не просто внедрение отдельных датчиков, а создание интеллектуальной платформы совместного использования данных, объединяющей эксплуатацию и техническое обслуживание (O&M) [1,2]. Такая платформа позволяет преодолеть проблему «информационных островов», когда различные системы (сигнализация, связь, электроснабжение) работают изолированно друг от друга [3,4].

Согласно источникам, современная система интеллектуального обслуживания железных дорог состоит из пяти ключевых уровней [4,5]:

1. Интеллектуальная сенсорная сеть: включает в себя бортовые (поездные), станционные и линейные сети мониторинга. Они превращают абстрактные рабочие процессы в конкретные количественные данные о положении, вибрации, температуре и влажности оборудования [6].

2. Широкополосная и повсеместная связь: выступает в роли «нервного центра», соединяющего датчики с облачным центром обработки данных. Это обеспечивает беспрепятственный обмен информацией в любом месте и в любое время.

3. Облачный центр вычислений: обеспечивает унифицированное и гибкое управление ресурсами [2].

4. Центр интеллектуального анализа: использует Большие данные для быстрого обнаружения точек отказа и прогнозирования тенденций работы оборудования [5].

5. Вспомогательное принятие решений: на основе глубокого обучения система формирует стандартные шаблоны и правила, обеспечивая самосовершенствование алгоритмов.

Внедрение облачных технологий приносит не только удобство, но и новые риски безопасности. Источники предлагают строить защиту на основе модели разделения ответственности, которая варьируется в зависимости от типа услуг (IaaS, PaaS или SaaS).

Архитектура безопасности делится на два вектора:

- Вертикальная защита: включает в себя базовую защиту облачной платформы (физическая среда и оборудование) и облачную защиту безопасности (логические сети, виртуализация и данные).
- Горизонтальная эволюция (модель «скользящей шкалы»): предполагает постепенное наращивание компетенций — от безопасности инфраструктуры и глубокой защиты до активной обороны и использования данных об угрозах (Threat Intelligence)[2].

В отличие от статических механизмов, концепция «Железной дороги 4.0» требует создания динамической системы ситуационной осведомленности. Централизованная платформа управления безопасностью собирает информацию о производительности всего

дата-центра, анализирует её с помощью ИИ и автоматически выдает политики безопасности для отражения атак в режиме реального времени.

Экономическая эффективность и стандартизация. Внедрение единой интеллектуальной архитектуры позволяет решить проблему дублирования инвестиций, возникающую из-за отсутствия единых стандартов для программного и аппаратного обеспечения [3,4]. Исследования показывают, что использование структурированной архитектуры безопасности в сочетании с интеллектуальным анализом данных напрямую влияет на ежегодную прибыльность сектора и позволяет оптимизировать затраты на эксплуатацию и ремонт (О&М) в долгосрочной перспективе. Таким образом, создание защищенной облачной инфраструктуры является фундаментом для автоматизации сбора данных, глубокого анализа неисправностей и перехода к полностью автономным системам управления железнодорожным транспортом [4].

Заключение

Цифровая трансформация железнодорожной отрасли, реализуемая в рамках концепции «Железная дорога 4.0», представляет собой неизбежный процесс конвергенции физического и виртуального миров [1,2]. Внедрение технологий Индустрии 4.0 превращает железную дорогу в сложную киберфизическую систему, способную обеспечить беспрецедентный уровень эффективности, безопасности и устойчивости [3,4]. Как показывают исследования, наибольшее развитие на текущий момент получили приложения в области интеллектуального мониторинга и предиктивного обслуживания, что позволяет отрасли перейти от реактивного ремонта к управлению активами на основе их фактического состояния [5].

Несмотря на значительный прогресс, полная реализация потенциала Railway 4.0 требует решения ряда критических задач:

- Обеспечение кибербезопасности: Переход к облачным вычислениям и распределенным сетям IoT создает новые риски, требующие внедрения стратегий активной обороны и многоуровневой защиты.
- Преодоление «информационных островов»: Будущее отрасли зависит от создания коллаборативных цифровых двойников и единых платформ совместного использования данных, которые объединят операторов, производителей и владельцев инфраструктуры.
- Этика и объяснимость ИИ (ХАИ): Для внедрения полностью автономных систем управления крайне важно развивать методы, которые сделают решения искусственного интеллекта понятными и прозрачными для человека, особенно в вопросах обеспечения безопасности жизни.

В долгосрочной перспективе синергия таких технологий, как связь 6G/7G, аналитика больших данных и передовое машинное обучение, позволит оптимизировать пропускную способность сетей и минимизировать экологический след транспорта. Хотя некоторые направления, такие как управление доходами и транспортная политика, пока остаются менее изученными с точки зрения ИИ, они представляют собой перспективные ниши для будущих исследований. Таким образом, комплексная цифровизация является ключом к превращению железных дорог в основу мобильности XXI века, способную гибко адаптироваться к вызовам глобальной экономики [4].

Список литературы

1. Singh, P., Elmi, Z., Meriga, V. K., Pasha, J., & Dulebenets, M. A. Internet of Things for sustainable railway transportation: Past, present, and future. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, Vol. 4, 2022, 100065.
2. Bešinović, N., De Donato, L., Flammini, F., Goverde, R. M. P., Lin, Z., Liu, R., ... & Vittorini, V. Artificial Intelligence in Railway Transport: Taxonomy, Regulations, and Applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 23, No. 9, 2022, pp. 14011-14024.
3. Krmac, E., & Djordjevic, B. Digital Twins for Railway Sector: Current State and Future Directions. *IEEE Access*, Vol. 12, 2024, pp. 114631-114649.
4. Ghofrani, F., He, Q., Goverde, R. M. P., & Liu, X. Recent applications of big data analytics in railway transportation systems: A survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 90, 2018, pp. 226-246.
5. Yu, S.-D. Research on cloud computing in the key technologies of railway intelligent operation and maintenance sharing platform. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1800, No. 1, 2021, 012010.
6. Laiton-Bonadiez, C., Branch-Bedoya, J. W., Zapata-Cortes, J., Paipa-Sanabria, E., & Arango-Serna, M. Industry 4.0 Technologies Applied to the Rail Transportation Industry: A Systematic Review. *Sensors*, Vol. 22, No. 7, 2022, 2491.
7. B.Zaripov, N.Aripov, D.Shabonova, S.Mirzaliev. Methods for Recognizing the Structure of Mounting Schemes in Railway Automation and Remote Control Systems // ACM International Conference Proceeding SeriesOpen source preview, 2025, pp. 175–179, DOI: 10.1145/3726122.3726148