

УДК 004.94:656.2

Архитектура цифровых двойников на железнодорожном транспорте

Зуев Денис Владимирович — кандидат техн. наук, генеральный директор. Научные интересы: нейронные сети, цифровые двойники. E-mail: zuevdv@gmail.com

Бочкарев Сергей Владимирович — кандидат техн. наук, технический директор. Научные интересы: нейронные сети, цифровые двойники. E-mail: bochkareffsv@yandex.ru

ООО «Синтез АТ», Россия, 199004, Санкт-Петербург, В. О., Средний пр., д. 28/2

Для цитирования: Зуев Д. В., Бочкарев С. В. Архитектура цифровых двойников на железнодорожном транспорте // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 2 (46). С. 17–35. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-246-17-35

Аннотация. Представлен углубленный системный анализ архитектурных подходов к построению и внедрению цифровых двойников на железнодорожном транспорте, что является ключевым этапом цифровой трансформации отрасли. **Цель:** систематизация архитектурных подходов к созданию цифровых двойников, анализ ключевых технологических решений и выработка рекомендаций по их интеграции в единую цифровую экосистему управления инфраструктурой и подвижным составом. **Методы:** проведено сравнительное исследование ведущих мировых платформ (Siemens Railigent X, Bentley iTwin, Dassault 3DEXPERIENCE) и отечественных разработок, в ходе которого выявлены ограничения существующих решений в части адаптации к специфике железнодорожной автоматики и телемеханики. **Результаты:** в отличие от традиционных фрагментарных информационных систем предложена концепция «единого источника правды», базирующаяся на бесшовной интеграции технологий BIM, PLM и SCADA, что позволяет обеспечить сквозное управление жизненным циклом транспортных активов. Научная новизна исследования заключается в разработке и детализации пятиуровневой иерархической модели цифрового двойника, которая объединяет уровень физических объектов и датчиков, каналы передачи данных, платформу хранения и цифровых моделей, аналитический слой и интерфейсы визуализации. **Практическая значимость:** обусловлена описанием механизмов перехода от планово-предупредительного ремонта к предиктивному и риск-ориентированному управлению. Показано, что внедрение предложенной архитектуры позволяет прогнозировать критические неисправности (например, дефекты буксовых узлов) за несколько месяцев до их возникновения и проводить имитационное моделирование различных эксплуатационных сценариев. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании интеллектуальных систем управления инфраструктурой и подвижным составом для повышения безопасности и экономической эффективности перевозочного процесса.

Ключевые слова: цифровой двойник, железнодорожный транспорт, многоуровневая архитектура, предиктивная аналитика, промышленный интернет вещей, BIM-технологии, управление жизненным циклом, мониторинг технического состояния, интеллектуальные транспортные системы, риск-ориентированный подход

2.9.8 — интеллектуальные транспортные системы (технические науки); **1.2.2** — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)

Введение

Цифровая трансформация железнодорожного транспорта характеризуется переходом от фрагментарных информационных систем к интегрированным интеллектуальным платформам, обеспечивающим сквозное управление жизненным циклом технических систем. Одним из ключевых направлений данной трансформации является внедрение технологии цифровых двойников, позволяющей объединить физические объекты инфраструктуры и подвижного состава с их виртуальными моделями и аналитическими сервисами в едином информационном пространстве.

Актуальность исследования обусловлена ростом требований к надежности, безопасности и эффективности функционирования железнодорожной сети, а также необходимостью перехода к риск-ориентированному и предиктивному управлению. Традиционные подходы, основанные на регламентном обслуживании и разрозненных системах мониторинга, не обеспечивают своевременного выявления деградационных процессов и не позволяют учитывать комплексное влияние факторов эксплуатации.

В этих условиях цифровой двойник рассматривается как киберфизическая система, обеспечивающая непрерывную связь между реальным объектом, потоками диагностических данных и математическими моделями его поведения. Архитектурно такие системы представляют собой многоуровневые решения, включающие уровень датчиков и телеметрии, уровень передачи данных, платформу хранения и обработки, аналитические модули и пользовательские интерфейсы управления.

Несмотря на активное развитие зарубежных платформ (Siemens Railigent X, Bentley iTwin, Dassault 3DEXPERIENCE), а также появление отечественных решений, остается ряд нерешенных задач: отсутствие унифицированной архитектуры, сложность интеграции с BIM/PLM-системами, высокая зависимость от качества данных и ограниченная адаптация к специфике железнодорожной автоматики и телемеханики.

Целью статьи является систематизация архитектурных подходов к построению цифровых двойни-

ков на железнодорожном транспорте, анализ ключевых технологических решений и определение направлений их интеграции в единую цифровую экосистему управления инфраструктурой и подвижным составом.

Типовая многослойная архитектура цифрового двойника

Цифровой двойник железной дороги — это многокомпонентная система, объединяющая данные от физических активов железнодорожной инфраструктуры с их виртуальной моделью и аналитикой в реальном времени [1–5]. Реализация цифрового двойника железной дороги разделяется на уровни, каждый из которых отвечает за свою функцию обработки данных [4, 5]. Примерная схема такой архитектуры приведена на рисунке.

1. Уровень физических объектов и датчиков.

Включает сами железнодорожные активы (напольно-технологическое оборудование, пути, инженерные сооружения) и установленные на них специализированные датчики. Датчики в зависимости от назначения измеряют вибрацию, токи, напряжения, положения механизмов и др. Например, на современном локомотиве могут быть акселерометры, датчики температуры букс, токоприемников и тормозных систем [6]. На железнодорожной инфраструктуре применяются стационарные и мобильные системы диагностики, датчики которых позволяют измерять диагностические параметры активов и аккумулировать данные для мониторинга активов [7]. Этот уровень обеспечивает непрерывный мониторинг состояния объектов в полевых условиях.

2. Уровень связи и передачи данных.

Данные с датчиков передаются через встроенные контроллеры и шлюзы в коммуникационную сеть. Используются бортовые системы сбора телеметрии (например, «телеметрические модули» локомотивов) и промышленные контроллеры (ПЛК) на объектах инфраструктуры [8]. Связь осуществляется по каналам сотовой связи (GSM-R, 4G/5G), радиоканалам, спутниковым каналам или через проводные сети. Например, в грузовых локомотивах DB Cargo



Рисунок. Архитектура цифрового двойника

данные ~7000 параметров собираются системой TechLok и передаются почти в реальном времени по GSM на платформу аналитики [9]. Каналы связи зачастую дублируются для надежности. За рубежом появляется тренд использования сетей 5G/FRMCS для высокоскоростной передачи больших объемов данных с поездов [2]. Важную роль играют полевые шлюзы IoT — устройства, агрегирующие потоки сенсорных данных и передающие их на верхние уровни с первичной фильтрацией.

3. Уровень платформы данных и цифровой модели. Полученные сырые данные поступают в централизованную платформу, где выполняются их обработка и хранение [2, 5, 10]. Здесь располагается сама цифровая модель — виртуальное представление объектов. Платформа включает базы данных (например, исторический архив, облачное хранилище больших данных) и модели объектов: BIM-модели инфраструктуры, CAD-модели подвижного состава, схемы систем, а также физические модели для симуляции. Сырые данные очищаются, нормализуются и сохраняются в структурированном виде (таблицы баз данных,

файлы) [10]. Платформа обеспечивает интерфейсы для доступа к данным верхним приложениям. В архитектуре академических исследований этот слой называют сервисом данных [11]. Он служит «единым источником правды» о состоянии системы: интегрирует разнородные данные (проектные данные BIM/GIS, телеметрию сенсоров, оперативную информацию). Например, на проекте цифрового двойника железной дороги Transpennine (Великобритания) платформа Bentley iTwin объединила данные из 60 разных систем — от BIM-проектов до GIS-слоев, предоставив 1300 пользователям единый доступ к актуальной информации [11]. В российских проектах также создаются интеграционные платформы. Так, ОАО «РЖД» разработало «Доверенную среду локомотивного комплекса», объединяющую данные о тяговом составе в единую систему [6].

4. Аналитический уровень и приложения. На основе собранных данных работают сервисы аналитики, моделирования и управления [10]. Сюда относятся алгоритмы предиктивной аналитики (прогнозирования отказов, остаточного

ресурса), модули оптимизации (например, расчет оптимального расписания поездов, их маршрутов), симуляционные модели (имитация работы станции или участка железнодорожной линии), а также прикладные приложения для конечных пользователей. Часто именно здесь реализуется «ядро» цифрового двойника — вычислительные модели, принимающие данные реального времени и выдающие рекомендации. Например, приложение Siemens Railigent X Health States анализирует в облаке данные о состоянии букс и ходовых частей поездов с помощью AI-моделей и выдает оценку состояния узлов (в виде светофора: зеленый/желтый/красный) для поддержки решений о ремонте [12]. Другое приложение, Remaining Useful Life, рассчитывает остаточный ресурс компонентов. В аналитическом уровне могут использоваться нейронные сети, статистические модели, алгоритмы распознавания образов (например, для анализа видеоданных с камер инспекции путей). Прогнозное обслуживание — одна из ключевых задач: по данным о вибрациях и температурах алгоритмы способны заранее выявить зарождающуюся неисправность (например, дефект буксы за 6–7 месяцев до отказа) [9]. Также в этом слое реализуются симуляции «что, если», например моделирование последствий введения нового расписания или строительства новой станции. Платформы высшего уровня (например, Dassault 3DEXPERIENCE) позволяют на цифровом двойнике прогонять различные сценарии для поддержки решений [13].

5. Уровень визуализации и управления. Верхний уровень — это интерфейс для пользователей и интеграция с системами управления [10]. Он предоставляет дашборды, 3D-визуализацию, отчеты и команды. Современные цифровые двойники часто имеют 3D-представление, например визуализацию железнодорожной сети на карте с наложением данных о движении поездов и инцидентах в реальном времени [10]. Используются технологии AR/VR для иммерсивного отображения, вплоть до виртуальных диспетчерских залов. На этом уровне осуществляется и обратная связь: операторы могут через интерфейс задавать команды системе — от настройки порогов срабаты-

вания до отправки управляющих воздействий на объекты. Например, Railigent позволяет при выявлении проблемы автоматически формировать наряд на ремонт в системе управления обслуживанием (CMMS) через открытый API [12]. В перспективе некоторые решения могут закрывать полный контур управления: цифровой двойник напрямую задействован в автоматизированном диспетчерском управлении или автоведении поездов, хотя пока чаще он используется как система поддержки решений.

Таким образом, архитектура цифрового двойника объединяет уровень IoT (Интернет вещей), платформу данных и уровень интеллектуальных сервисов с интерфейсом для человека. В исследованиях предлагаются сходные схемы — от четырехслойной архитектуры (подключение данных → сервисы данных → аналитика → визуализация) [11] до более сложных, включающих слои интеграции с внешними системами и управления жизненным циклом. Ключевая особенность заключается в наличии сквозной связи от физического сенсора до цифровой модели и обратно.

Основные аппаратно-программные компоненты

Развертывание цифрового двойника опирается на широкий спектр аппаратных и программных средств, обеспечивающих сбор и обработку данных.

1. Датчики и системы мониторинга. Как отмечалось, на подвижном составе и инфраструктуре устанавливаются разнообразные датчики, например, акселерометры и инклинометры для отслеживания вибраций и крена [14], термодатчики на буксах и двигателях, датчики износа тормозных колодок, датчики давления в тормозной магистрали, датчики тока тяговых двигателей, GPS/ГЛОНАСС для точного позиционирования. В пути широко применяются стационарные диагностические системы (их можно считать «датчиками» инфраструктуры), например, автоматический контроль нагрева букс, система обнаружения дефектов колес, датчики схода колесных пар, метеостанции около пути (фиксируют температуру рельса,

ветер, осадки), а также системы технической диагностики и мониторинга устройств железнодорожной автоматики. Кроме того, существуют встроенные системы диагностики самих поездов — бортовые ОТК. Все эти источники информации формируют массив данных для цифрового двойника объекта контроля. Пример масштаба: цифровой двойник нового поезда CRRC получает данные более чем с 2000 датчиков, установленных на поезде. Аналогично, инфраструктурный двойник моста или тоннеля может получать потоки от сотен датчиков (деформации, нагрузки, сенсоров вибрации).

2. Промышленные контроллеры и шлюзы.

Для сбора сигналов с датчиков и передачи их дальше используются контроллеры и IoT-шлюзы. Например, в депо при создании отечественного комплекса диагностики ОКТА разработчики сначала пробовали стандартные ПЛК Siemens SIMATIC и модули ICP DAS [8]. Эти устройства обычно хороши для локального мониторинга, но оказались ограничены по гибкости интеграции с облаком (нет поддержки современных веб-протоколов, сложность расширения) [5]. Поэтому был сделан акцент на собственные контроллеры с возможностью двусторонней связи через интернет. IoT-шлюз — это мини-компьютер или специализированный модем, который агрегирует данные от множества датчиков по локальным интерфейсам (например, Modbus, CAN, RS-485) и отправляет их пакетом через интернет-протоколы (HTTP(S), MQTT и другие) на сервер. В случае локомотива таким шлюзом может быть бортовой компьютер телеметрии с SIM-картой, а на инфраструктурном объекте — промышленный маршрутизатор с подключением к оптоволоконной сети. Шлюзы также могут выполнять предварительную обработку (фильтрацию, сглаживание данных, локальный анализ на простые аномалии), чтобы снизить нагрузку на канал связи [9]. Современные тренды включают перенос AI в контроллер для мгновенной реакции: например, датчики на пути могут локально определять дефект и сразу сообщать о нем, не передавая гигабайты исходных сырых данных [9].

3. Системы SCADA и телеметрия. Традиционные железнодорожные SCADA-системы (диспет-

черские системы контроля и сбора данных) продолжают играть свою роль. Например, энергетическая SCADA отслеживает состояние контактной сети, тяговых подстанций и может передавать эти данные в цифровой двойник инфраструктуры. Также к источникам данных можно отнести системы ЖАТ (автоматики и телемеханики) — данные релейных шкафов, состояние светофоров, стрелок, показания рельсовых цепей. Цифровой двойник интегрируется с системами источников данных через адаптеры (например, подключение к системам и устройствам ЖАТ, к системам верхнего уровня диспетчеризации). Таким образом, цифровой двойник не заменяет SCADA, а дополняет ее, предоставляя более высокий уровень анализа. В отрасли прослеживается переход от разрозненных SCADA к объединенным ситуационным центрам на базе цифровых двойников, где информация из разных подсистем собирается на общей модели для комплексного отображения и принятия решений.

4. Облачные платформы и хранилища данных. Большинство современных цифровых двойников реализованы с использованием облачных технологий. Это позволяет хранить и обрабатывать огромные массивы данных, использовать масштабируемые вычисления для AI/ML. Примером может служить платформа Siemens MindSphere, выступающая как облако IoT: она собирает данные от подключенных устройств (поездов, датчиков инфраструктуры) и предоставляет сервисы для их обработки [15]. Специализированное решение Siemens Railigent X фактически работает как надстройка над MindSphere, ориентированная на железнодорожные данные [15]. Облако обеспечивает и интеграцию сторонних сервисов: Railigent открыт для подключения приложений от других поставщиков. Так, компания Voith встроила в Railigent модуль мониторинга автосцепок Scharfenberg [9], а компания SKF подключила систему контроля букс Insight Rail [9]. Это достигается за счет стандартных API и микросервисной архитектуры облачной платформы. В России по понятным причинам ставка делается на отечественные облачные решения (например, платформы на базе российских ЦОД). Архитектура платформы

ОКТА, упомянутой выше, построена по принципу: все модули диагностических стендов депо управляются напрямую из облака в режиме онлайн [8]. То есть конфигурации, обновления алгоритмов, сбор данных — все централизовано, что решает проблемы территориальной рассредоточенности и ускоряет тиражирование изменений.

5. Аналитическое ПО и модели. Программные компоненты, выполняющие анализ, — это ядро цифрового двойника. Здесь используются библиотеки машинного обучения (например, TensorFlow, PyTorch для построения нейросетей), инструменты Big Data (Hadoop, Spark) для параллельной обработки потоков, специализированные алгоритмы обработки сигналов (цифровая фильтрация временных рядов, спектральный анализ для детекции дефектов). В области железных дорог есть и готовые аналитические решения: например, Alstom HealthHub — платформа от Alstom, аналог Railigent, «заточенная» под сбор данных с поездов и инфраструктуры для диагностики состояния [8]. Также применяются цифровые модели для имитации — от микроуровня (модель динамики экипажа для прогнозирования износа колес и рельсов) до макроуровня (имитация графика движения поездов). Например, платформа имитационного моделирования AnyLogic использована HCLTech для построения «когнитивного» цифрового двойника сортировочной станции: все данные IoT, АСУ, геоплатформ собираются и в режиме реального времени питают имитационную модель AnyLogic, которая отображает текущее состояние и прогнозирует развитие ситуации [16]. Благодаря таким моделям операторы могут прогонять различные сценарии (например, «что, если этот путь закроется?») и получать прогноз последствий.

6. Средства визуализации и взаимодействия. Пользователь взаимодействует с цифровым двойником через специализированные интерфейсы. Это могут быть веб-порталы с дашбордами, графиками, картами либо настольные приложения (например, 3D-Viewer для инфраструктурных моделей). Тенденция — отображение информации на геопространственной основе (карте или 3D-модели местности). Например, цифровой двойник пассажирского

движения может визуализировать на карте сеть, показывать движущиеся поезда и раскрашивать станции по уровню пассажиропотока в реальном времени [10]. Другой пример — 3D-модель тоннеля или моста, на которой цветом отображается степень износа конструкций по данным датчиков. Для персонала могут создаваться AR-приложения: взглянув через планшет на локомотив, специалист видит «наложение» — визуализацию внутренних параметров и подсказки по ремонту. На уровне управления предприятием используются центры управления: видеостены, совмещающие схему дороги, видео с камер, графики состояния техники. Цифровые двойники все чаще интегрируются с диспетчерскими системами. Например, программный комплекс для управления перевозками получает данные прогноза цифрового двойника и может корректировать график движения для предотвращения сбоев. Компания Dassault Systèmes отмечает, что их платформа объединяет планирование перевозок, управление инфраструктурой, ремонтами и даже расчет работы персонала в едином цифровом пространстве [17], то есть диспетчер, инженер по инфраструктуре и начальник депо работают с общим виртуальным «макетом» железной дороги, видя актуальные данные и прогнозы.

Сравнение ключевых платформ и решений

В настоящее время несколько крупных промышленных платформ лидируют в сфере цифровых двойников железных дорог. Рассмотрим их особенности и архитектурные подходы.

Siemens Railigent X

Siemens Railigent X — пакет приложений для обслуживания железнодорожных активов, работающий поверх IoT-платформы MindSphere [15]. Сервис решает задачи предиктивного обслуживания и мониторинга подвижного состава и смежной инфраструктуры. Архитектура сервиса выглядит следующим образом: Railigent собирает данные с оборудования поездов через бортовые системы диагностики и внешние датчики (например, стационарные пункты контроля колес) и передает данные в облако MindSphere, где работают

аналитические сервисы. Отличительная особенность сервиса — богатая библиотека приложений от Siemens для конкретных задач: состояние буксовых узлов, прогноз остаточного ресурса, мониторинг дверей, климатических систем и т. д. В архитектуру заложена открытость API: Railigent интегрируется с системами клиентов (например, с корпоративными CMMS для автоматического оформления заявок на ремонт [12]). Также Siemens допускает подключение сторонних модулей: есть примеры, когда к Railigent подключены решения по мониторингу автосцепок и система контроля вибрации букс для расширения функций [9]. Аппаратная часть включает в себя сенсоры (например, вибродатчики) и коммуникационные устройства (промышленные маршрутизаторы для подвижного состава). Railigent используется на высокоскоростных поездах Velaro и городских поездах Thameslink [9]. Немецкая DB Cargo применяет Railigent совместно с платформой GE для анализа данных со своих локомотивов [9]. В новых депо Siemens внедряет концепцию «цифрового депо» — все данные о прибывающем поезде (неисправности, износ) автоматически собираются в Railigent и прямо распределяются в задания ремонтным бригадам на планшеты [18].

Bentley OpenRail (платформа iTwin)

Bentley OpenRail и смежные решения (Bentley AssetWise, платформа iTwin) — это семейство продуктов, ориентированных на инфраструктурные цифровые двойники. Решение сфокусировано на жизненном цикле железнодорожной инфраструктуры — от проектирования (BIM-модели путей, мостов, тоннелей, станций) до эксплуатации и технического обслуживания объектов. Bentley продвигает концепцию «федеративного» цифрового двойника, где платформа iTwin объединяет различные данные: BIM-проекты, геодезические данные, GIS, таблицы и датчики. При этом данные не сводятся в одну монолитную модель, а хранятся как взаимосвязанные ресурсы с привязкой к пространству и времени. Например, в проекте модернизации Transpennine (Network Rail, Великобритания) на базе iTwin удалось свести данные более чем

из 60 разрозненных систем в единую цифровую среду, дополнив их 600 слоями GIS-данных [11]. Это дало всем участникам (более 1300 специалистов) доступ к актуальной информации в реальном времени, ускорив принятие решений и сэкономив ~20 тысяч человеко-часов за первые шесть месяцев [11].

К компонентам Bentley OpenRail относятся: OpenRail Designer — ПО для 3D-проектирования железных дорог (позволяет создать подробную модель пути, контактной сети и других элементов железнодорожной инфраструктуры), ContextCapture — инструмент для создания реалистичных 3D-моделей местности (из лазерного сканирования, съемки дроном), ProjectWise — система общих данных (CDE) для управления документацией и моделями. Над ними работает облачная служба Bentley iTwin, которая поддерживает версиюность и обновление цифрового двойника по мере изменений в реальном мире.

Особенности решения Bentley OpenRail — акцент на стандарты OpenBIM (IFC). Bentley поддерживает формат IFC Rail, обеспечивая интероперабельность данных инфраструктуры [19]. Кроме вышеупомянутого Transpennine, решение Bentley OpenRail применяется в проекте обновления сигнализации на вокзале Бристоль Темпл Мидс (Великобритания). С помощью OpenRail была создана 3D-модель путевого развития и сигналов, проведены виртуальные «проезды» машиниста для проверки видимости сигналов. Это позволило выявить и исправить ошибки размещения сигналов до строительства, сократить выезды на место и, по мнению Network Rail, свести месяцы работы к одному совещанию благодаря наглядному согласованию в цифровой модели [11]. Экономический эффект Bentley OpenRail — устранение переделок, ускорение ввода в эксплуатацию новых систем. Bentley также предлагает AssetWise Digital Twin для эксплуатации — это уровень интеграции с датчиками, например подключение беспроводных датчиков вибрации на мостах к модели AssetWise для предиктивного мониторинга состояния конструкций (решения такого типа

эксплуатируются на железных дорогах Италии и других стран ЕС).

Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE

Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE — платформа, изначально созданная для интеграции системы управления жизненным циклом продукта и 3D-моделирования, которая в настоящее время адаптирована под транспортную отрасль как основа «виртуальных двойников». Dassault продвигает термин Virtual Twin, подразумевая расширение концепции цифрового двойника до моделирования целой системы систем с учетом окружающей среды [13].

Основной фокус платформы делается на сквозном управлении всеми аспектами железнодорожной системы — от проектирования и производства подвижного состава и инфраструктуры до планирования перевозок и технического обслуживания. 3DEXPERIENCE представляет собой единое цифровое пространство, объединяющее всех участников и данные [13].

В основе платформы лежит интеграция продуктов Dassault: CATIA (3D-проектирование), DELMIA (моделирование производственных и операционных процессов), SIMULIA (инженерный анализ и симуляция), ENOVIA (управление данными и процессами). На железной дороге это выливается в то, что все службы — производственные, инфраструктурные, операционные — работают на общей модели. Например, Alstom использует 3DEXPERIENCE для управления конструкторскими данными и технологическими процессами при производстве вагонов [13]. А компания KiwiRail (Новая Зеландия) внедрила платформу для оптимизации грузовых перевозок, планирования парка и маршрутов [13].

Dassault делает упор на системную модель — виртуальный двойник учитывает не только отдельный объект, но и всю связанную систему и даже внешние факторы. Например, при выборе места для новой станции виртуальный двойник города позволяет проиграть множество сценариев, учитывая пассажиропотоки, подвоз пассажиров, влияние на окружающую инфраструктуру, и найти оптимальное решение [13]. Платформа

поддерживает 360-градусную визуализацию операций для операторов и совместную работу: все данные, идеи, ограничения находятся в одном пространстве, доступном безопасно с любого устройства [13]. Интеграция данных: виртуальный двойник 3DEXPERIENCE поглощает данные предиктивного обслуживания, состояния движения, планов путей, чтобы оптимизировать расписание и операции по перевозочному процессу [17]. Реализована связь с реальными датчиками: поток данных в реальном времени позволяет поддерживать «постоянный цикл улучшений», когда данные эксплуатации возвращаются в модель для анализа и корректировки проекта [13].

Европейские операторы перевозок запустили пилотные проекты по использованию виртуального двойника в управлении инфраструктурными мегапроектами. Например, проект Rail Baltica рассматривает использование 3DEXPERIENCE для унификации стандартов и совместного ведения огромного объема данных разных подрядчиков [17].

В целом Dassault предлагает унифицировать BIM, GIS, модели эксплуатации и обслуживания на одной платформе, разрывая узкие специализированные «силосы» данных между организациями [17]. Такой подход особенно актуален при создании транснациональных коридоров и повышении интероперабельности.

Отечественные решения

После 2022 года доступ российских железнодорожных компаний к западным платформам затруднен, поэтому акцент сместился на развитие отечественных программно-аппаратных комплексов. В ОАО «РЖД» цифровые двойники выделены как ключевое направление цифровой трансформации [20]. Основным направлением выбрана предиктивная диагностика локомотивов и инфраструктуры, а также создание цифровых моделей сети для планирования.

1. «Умный локомотив». Комплекс систем от РЖД, в котором применяются технологии IoT, нейронных сетей и цифровых двойников для мониторинга состояния узлов локомотива [1]. Данные с бортовых систем локомотивов передаются

в единую платформу, где AI-модели анализируют отклонения параметров, выявляют аномалии и формируют уведомления о состоянии оборудования [1]. Такая система уже позволила перейти от реактивного ремонта «по событию» к обслуживанию по состоянию. По оценкам, использование цифрового двойника локомотива может снизить затраты на его обслуживание до 20–30 % за счет своевременного планирования ремонтов и предотвращения серьезных отказов [1].

2. «Доверенная среда локомотивного комплекса». Это цифровая платформа РЖД для хранения и обмена информацией между всеми участниками, обеспечивающими работу локомотивов [1]. Она служит единой базой технических данных локомотивного парка. Такая платформа является фундаментом для построения цифровых двойников техники и связана с системой «Умный локомотив», обеспечивая интеграцию данных от локомотиворемонтных заводов, депо, эксплуатационных подразделений.

3. Цифровой двойник инфраструктуры. РЖД декларировали планы создать цифровую модель всей инфраструктуры сети. В рамках этих планов было реализовано несколько проектов по формированию цифрового двойника железнодорожной инфраструктуры на основе технической документации из единой корпоративной платформы ведения технической документации (ЕКП ТД) и данных из открытых картографических источников [21–23]. Полученные модели позволяют оперативно актуализировать информацию об объектах и использовать ее для оптимизации работ по техническому обслуживанию. Пока полная модель не создана, но локальные фрагменты внедряются. Так, в рамках развития ЕКП ТД в части технологии цифрового двойника реализованы следующие средства автоматизации: управление жизненным циклом аппаратуры и напольно-технологического оборудования железнодорожной автоматики [24, 25] и построение исполненной кабельной сети [26].

4. Аппаратные разработки. Компания «ТВЕМА» осваивает производство датчиков мониторинга пути. Создана система ОКТА для депо,

включающая облачную платформу и набор диагностических модулей (стационарные и мобильные стенды) [8]. В системе каждый стенд оснащен своими сенсорами и контроллерами, но они удаленно управляются из облака, загрузка новых алгоритмов, изменение настроек — все делается через интернет. Это решает проблему территориальной рассредоточенности депо: инженеру не требуется ехать за тысячу километров, чтобы обновить программное обеспечение на стенде, все происходит централизованно. Благодаря ОКТА удалось сократить простои в реальных депо, обеспечить полную прослеживаемость ремонта [8]. До 2022 года часть аппаратных разработок пытались строить на импортных решениях от Siemens, но столкнулись с их закрытостью и слабой интеграцией с облаком, поэтому был сделан выбор в пользу кастомных решений [8]. Российские разработчики стремятся создавать более открытые, программно-ориентированные системы, чтобы не столкнуться с ограничениями проприетарных западных стандартов.

В целом российские системы пока развиваются по нескольким направлениям: локальные (для депо, для конкретных узлов) и глобальные (масштаб компании ОАО «РЖД»). Российским компаниям приходится наверстывать то, что у Siemens, Alstom нарабатывалось годами. Плюсом является возможность учесть мировой опыт: новые системы сразу проектируются с учетом современных требований гибкости (поддержка REST API, веб-технологий, модульность) [8].

Китайские инициативы в части цифровых двойников

Китай активно внедряет цифровые двойники как в подвижном составе, так и в инфраструктуре, опираясь на собственную электронную базу и технологии больших данных. Основные направления — интеллектуальные поезда, высокоскоростные магистрали, диспетчеризация на основе AI.

1. Цифровой двойник поезда CINOVA2.0 (CRRC). В 2023 году корпорация CRRC представила первый в Китае умный межгородской электропоезд с технологиями ADAS (Advanced Driver Assistance) и Digital Twin [27]. Этот поезд

снабжен множеством сенсоров и бортовых систем, интегрированных в единую интеллект-систему. Поезд оснащен более чем 2000 датчиками, а для анализа данных применяются примерно 130 алгоритмов машинного обучения. Цифровой двойник поезда работает параллельно с реальным поездом: в реальном времени получает телеметрию и просчитывает состояние каждого узла, прогнозируя вероятность отказов. Например, на основе вибрации и температуры подшипников он предупреждает о приближающемся износе, на основе данных о профиле пути и нагрузке — оптимизирует управление тягой для экономии энергии. Таким образом, CRRC стремится к полной цифровой копии поезда, которую можно использовать и для автономного управления (ADAS предоставляет машинисту рекомендации, а в перспективе — автопилот). Также цифровой двойник повышает безопасность, например моделирует сценарии экстренного торможения на разном состоянии рельсов, чтобы оптимально настроить антиблокировочные системы.

2. Высокоскоростные магистрали. В Китае реализовано несколько пилотных проектов цифровых двойников на линиях ВСМ. Например, на новом высокоскоростном вокзале Гуанчжоу Байюнь была разработана концепция цифрового двойника станции с интеграцией BIM-модели, системы управления пассажиропотоками, IoT-датчиков оборудования станции и алгоритмов оптимизации расписания прибытия поездов. Цель — «интеллектуальный вокзал», где цифровой двойник в режиме реального времени отслеживает все системы и поток пассажиров и помогает операторам принимать решения. Также China State Railway Group (оператор сети) объявляла, что ведет создание Единой цифровой платформы диспетчеризации: собираются данные от всех поездов, инфраструктуры и внешней среды (погода, состояние энергосети) и на основе AI рассчитываются оптимальные сценарии управления движением. Уже сейчас на некоторых линиях в диспетчерских применяется Decision Support System с элементами цифрового двойника, который прогнозирует конфликтные ситуации в графике и предлагает диспетчеру решения.

3. Аппаратная часть. Китайские компании (например, Huawei, CASCO) разработали собственные IoT-контроллеры для железных дорог, промышленные 5G-модемы для подвижного состава и пр. Повсеместно на железной дороге внедряется связь 5G. Например, в новом метро Гуанчжоу запущена система, где поезд передает большой поток данных (видео с камер, данные сенсоров) в центр по сети 5G, и на основе этого цифровой двойник поезда и тоннеля обеспечивает автоматическое вождение (практически уровень АТО GoA4). Благодаря местным технологиям искусственного интеллекта китайские железные дороги активно внедряют системы мониторинга, основанные на компьютерном зрении: камеры на путях и поездах, объединенные в цифровой двойник, автоматически распознают препятствия, повреждения оборудования и др. Это повышает безопасность и уменьшает зависимость от человеческого фактора.

Отличительная черта китайского подхода — масштаб и централизованность. Реализуется концепция «Цифровая железная дорога», в которой вся национальная сеть рассматривается как единая киберфизическая система. Огромные инвестиции направлены на стандартизацию данных и интеграцию: например, ведется разработка национального стандарта данных для цифровых двойников железной дороги (аналог европейских RailML, IFC Rail). Китайские проекты часто достигают впечатляющих цифр: так, на одном из полигонов отмечена генерация 1 Тб данных с 40 км путей в час при плотном оснащении датчиками [9]. Для того чтобы справиться с такими потоками, уделяется внимание технологиям фильтрации и периферийным вычислениям.

Интеграция цифрового двойника с BIM- и PLM-системами и системами мониторинга и аналитики

Цифровой двойник приносит максимальную пользу, когда он не изолирован, а связан со всеми информационными контурами железной дороги — от систем проектирования (BIM/PLM) до оперативной диспетчеризации и управления жизненным циклом активов (EAM/RCM). Современные платформы это учитывают.

1. BIM-системы и ГИС. На этапе проектирования инфраструктуры создаются подробные информационные модели объектов — пути, станции, мосты, тоннели и прочие активы железнодорожной инфраструктуры. Цифровой двойник может строиться на основе этих BIM-моделей, актуализируя их по данным эксплуатации. Например, Национальная компания железных дорог Люксембурга (CFL) все проекты ведет в BIM и ставит цель к 2035 году оцифровать всю существующую инфраструктуру в виде BIM-моделей, связав их с операционными данными [28]. Это позволит вносить изменения (например, результаты лазерного сканирования состояния туннеля) напрямую в цифровую модель, поддерживая ее синхронность с реальностью. Интеграция с ГИС дает геоконтекст: например, цифровой двойник может соотносить данные о поездах с информацией о рельефе, климатических зонах и т. д. Bentley и другие поддерживают слияние BIM-систем и ГИС: к цифровому двойнику были подключены сотни слоев ГИС (топография, инженерные сети, экологические ограничения) для улучшения решений [28]. При эксплуатации связывать BIM с реальными данными позволяют технологии реальности: регулярное сканирование обновляет 3D-модель, отражая износ, ремонты. Таким образом, BIM-модель эволюционирует в цифровой двойник, проживая вместе с объектом весь жизненный цикл.

2. PLM-системы управления активами. Для подвижного состава и оборудования важно связывать цифровой двойник с данными PLM/PDM, то есть конструкторской и ремонтной документацией. Dassault идет именно по этому пути: виртуальный двойник подключен к полной цифровой модели изделия. Это значит, что любая деталь локомотива в двойнике «знает» свой серийный номер, чертеж, материалы, историю изготовителя [13]. Когда двойник выявляет проблему, система сразу может подтянуть из PLM-системы аналоги случаев, чертежи для ремонта и даже внести предложение конструкторам по улучшению [13]. Системы управления активами (EAM/MCM), например Maximo и SAP PM, также интегрируются: цифровой двойник автоматически генерирует в них заявки, обновля-

ет статус работ. В Railigent, как уже упоминалось, есть возможность через API формировать рабочие задания в CMMS при срабатывании определенных условий [12]. То есть связка «цифровой двойник — EAM» реализует концепцию предиктивного обслуживания на практике — от датчика до конкретной ремонтной операции.

3. Мониторинг и диспетчеризация. Оперативное управление движением поездов и мониторинг состояния инфраструктуры — традиционные процессы, которые выигрывают от использования цифровых двойников. Например, виртуальный двойник инфраструктуры может эмулировать работу всей сети в ускоренном режиме, прогнозируя конфликты в расписании. Dassault сообщает, что их решения позволяют учитывать данные трафика, состояние инфраструктуры и подвижного состава вместе, оптимизируя расписание движения и распределение ресурсов [17]. Виртуальный двойник способен оценивать, к примеру, влияние закрытия перегона на ремонт: он смоделирует перераспределение поездопотоков, найдет узкие места и предложит оптимальный план. Также в диспетчерских системах появляются решающие автоматы на базе AI, использующие данные двойника. Например, в Китае на магистрали Пекин — Шанхай тестировалась система, которая в режиме реального времени перестраивает график при отклонениях, поддерживая максимальную пропускную способность. Цифровой двойник тут служит «песочницей» для AI — он постоянно прогоняет возможные варианты действий и выбирает лучший без риска для реальных поездов.

4. Предиктивная аналитика и Big Data. Многие железнодорожные компании накапливают огромные массивы исторических данных о поломках, задержках, погодных условиях, которые не всегда эффективно используются. Цифровой двойник с интегрированной системой анализа больших данных позволяет выявлять скрытые зависимости. Например, нидерландская ProRail создала DataLab, где на данных цифрового двойника сети обучаются модели для прогнозирования отказов стрелок, сбоях сигнализации, даже появления посторонних на путях [9]. Модель проникновения

на пути, учитывающая окружение, погоду, праздники, смогла предсказать места, где вероятны нарушения, и полиция, принимая меры превентивно, снизила инциденты на проблемных участках на 50–100% [9]. Такой междисциплинарный анализ стал возможен, когда данные разрозненных систем (охрана, движение поездов, погода) объединены в рамках единого цифрового представления.

5. Стандартизация данных. Интеграция множества систем требует общих стандартов. В BIM это IFC Rail (международный формат для инфраструктуры), в ж/д данных — формат RailML для

обмена данными расписаний, топологии, сигнализации. Современные платформы поддерживают эти стандарты, что облегчает совместную работу. Dassault, например, продвигает идею, что их платформа поможет унифицировать стандарты взаимодействия глобально [17]. В Европе инициативы Shift2Rail и Europe's Rail ставят задачу создать референсную архитектуру цифрового двойника железной дороги, чтобы любой компонент (модель вагона, модель инфраструктуры, алгоритм прогноза) мог быть подключен по единым интерфейсам.

Таблица

Сравнение ключевых платформ цифровых двойников

Платформа/решение	Основное направление применения	Архитектурные особенности и компоненты	Примеры внедрения/использования
Siemens Railigent X	Операции обслуживания подвижного состава и мониторинг инфраструктуры	<ul style="list-style-type: none"> – облачная IoT-платформа для сбора телеметрии поездов и путевых датчиков; – встроенные AI-приложения для предиктивной аналитики; – открытые API для интеграции с CMMS/ERP; – поддержка внешних модулей (например, Voith, SKF) через партнерскую экосистему 	<ul style="list-style-type: none"> – 5000 дверей поездов Thameslink на обслуживании через Railigent (автоматический мониторинг с ML); – высокоскоростные поезда Velaro (контроль редукторов, букс, движков); – снижение отказов благодаря прогнозам; – DB Cargo: оснащение 2000 локомотивов телеметрией TechLok с передачей ~7000 сигналов, аналитика через GE RailConnect и Railigent
Bentley OpenRail & iTwin	Цифровые двойники инфраструктуры и управление жизненным циклом железнодорожных объектов	<ul style="list-style-type: none"> – BIM-система и ГИС-платформа: объединение инженерных 3D-/4D-моделей (проектов) с данными датчиков и эксплуатационными сведениями; – Federated data — связь более чем с 10 источниками вместо единой БД: ProjectWise CDE, ContextCapture для 3D-реальности, iTwin для облачной консолидации; – поддержка открытых стандартов (IFC Rail) для совместимости; – API для интеграции с корпоративными системами 	<ul style="list-style-type: none"> – Network Rail: проект Transpennine — консолидация данных 60 систем в единый цифровой двойник (100 км линии, 600+ GIS-слоев), что сэкономило ~1 млн фунтов за счет ускорения доступа к данным; – Bristol Signal Renewal: виртуальная прокатка сценариев размещения сигналов на 3D-модели пути; – обнаружение ошибок до стройки; – железные дороги Италии: интеграция Bentley AssetWise с беспроводными датчиками на мостах — предиктивный SHM вместо плановых осмотров
Dassault 3DEXPERIENCE (Virtual Twin)	«Система систем»: сквозное планирование, моделирование и эксплуатация всей железнодорожной инфраструктуры	<ul style="list-style-type: none"> – единая платформа: объединение людей, данных, процессов в одном пространстве (3D-модели (CATIA), симуляция процессов (DELMIA), анализ (SIMULIA)); – концепция Virtual Twin: модель учитывает окружение и всю инфраструктуру, позволяет имитировать любое изменение и видеть его влияние на инфраструктуру 	<ul style="list-style-type: none"> – Alstom: применение 3DEXPERIENCE для виртуального двойника производства поездов — оптимизация технологий, снижение брака, синхронизация поставок в реальном времени; – KiwiRail: цифровая платформа для планирования грузовых перевозок — улучшение планирования флота и расписаний на основе единой модели; – пилот пассажирской железной дороги: моделирование сценариев размещения новой станции в виртуальном городе — отработка десятков вариантов для информированного решения

Платформа/решение	Основное направление применения	Архитектурные особенности и компоненты	Примеры внедрения/использования
Wabtec/GE RailConnect 360	Asset Performance Management для локомотивов и грузовых вагонов	<ul style="list-style-type: none"> – потомок платформы GE Predix на железной дороге: сбор данных о состоянии локомотивов в облако, аналитика по отказам; – интеграция с оперативными данными (рейсы, профили путей) для оптимизации эксплуатации, например рекомендации по экономичному ведению (Trip Optimizer); – модуль Fleet: панель состояния парка, приоритизация ремонтов по состоянию 	<ul style="list-style-type: none"> – применяется крупными грузовыми операторами в США (Union Pacific, BNSF и др.) для перехода к техобслуживанию по состоянию; – DB Cargo: тестирование RailConnect 360 параллельно с Railigent, получая преимущества от обеих систем (Railigent глубже по компонентам, GE — по топливной эффективности и надежности локомотивов); – Kazakhstan Temir Zholy: проект с Wabtec в рамках контракта 2023 года по оснащению локомотивов и депо системой Predix APM для снижения простоев
Отечественные решения	<ul style="list-style-type: none"> – предиктивная диагностика локомотивов; – цифровые модели инфраструктуры 	<ul style="list-style-type: none"> – собственные платформы: «Умный локомотив» — IoT + AI для оценки состояния узлов, аномалий, прогноз отказов локомотивов; – облачные решения: платформа ОКТА — централизованное управление диагностическими устройствами депо, дистанционная настройка и сбор данных; – BIM-/ГИС-инициативы: масштабное сканирование инфраструктуры, создание 3D-моделей, связь с системами Главгосэкспертизы и Ростройконтроля 	<ul style="list-style-type: none"> – РЖД: пилот по цифровому двойнику Восточного полигона — интеграция данных о пропускной способности, состояниях инфраструктуры для оптимизации графика; – локомотивное депо: 10 депо подключены к облаку — каждое изменение методики ремонта мгновенно транслируется на все, что дает экономию ~5 млн руб. на командировках специалистов при масштабировании на 100 депо; – мосты и тоннели: внедрение датчиков и моделей на мостовые сооружения (ожидается продление ресурса инженерных сооружений на 15–20 % при том же уровне безопасности за счет раннего обнаружения дефектов)
Китай (CRRC, CASCO)	<ul style="list-style-type: none"> – интеллектуальные поезда; – высокоскоростная сеть; – автоматизация управления движением 	<ul style="list-style-type: none"> – IoT-насыщенность: в новых поездах тысячи датчиков, 5G-модули — поток данных обрабатывается бортовым Edge и передается в облако. Встроенные в борт алгоритмы AI для безопасности (ADAS); – платформы Big Data: национальная сеть центров данных железных дорог, анализ терабайтов данных в реальном времени. Использование технологий Baidu/Huawei для ML и Computer Vision на видео с камер инфраструктуры; – интеграция с диспетчеризацией: единые централизованные системы, моделирующие движение поездов по всей стране с учетом состояния каждого элемента инфраструктуры; – оптимизация энергоэффективности и пропускной способности посредством цифрового двойника всей сети 	<ul style="list-style-type: none"> – CRRC CINOVA2.0: первый intercity-поезд с цифровым двойником — более 2000 датчиков, 130 алгоритмов — полный контроль над состоянием в реальном времени, повышение надежности и возможность автономного вождения; – ВСМ Пекин — Чжанцзякоу: пилот 5G + DT — вся линия оцифрована, цифровой двойник обеспечивает автопилотирование поездов на участках (GoA3) и дистанционный контроль тоннелей (с 3D-моделями); – метро Шанхая: система управления движением с AI-диспетчером, использующим цифровой двойник линий — увеличение интервалов движения на 10 % без новых путей, снижение сбоев на 15 % (данные CASCO, 2021)

Сравнение ключевых решений по цифровым двойникам

Выше приведена сводная таблица, сравнивающая ключевые платформы цифровых двойников и их архитектурные особенности.

Приведенные в таблице примеры — лишь небольшая часть реализованных проектов. Рассмотренные проекты показывают потенциал технологий. В действительности платформы часто пересекаются: например, инфраструктурный

цифровой двойник может потребовать интеграции с данными подвижного состава для комплексного анализа. Поэтому границы между решениями условны — идет конвергенция к интегрированным экосистемам. Как отмечают эксперты, цифровой двойник железной дороги — это не отдельное ПО, а совокупность взаимодействующих систем, объединенных архитектурно для достижения общей цели: повышения эффективности, безопасности и экономичности железнодорожных перевозок в реальном времени.

Заключение

В статье проведен комплексный анализ архитектуры цифровых двойников железнодорожного транспорта и рассмотрены ключевые аппаратно-программные компоненты, обеспечивающие их функционирование. Показано, что эффективная реализация цифрового двойника возможна только при наличии сквозной интеграции всех уровней — от датчиков и телеметрии до аналитических моделей и систем управления.

Основной вывод заключается в том, что цифровой двойник представляет собой не отдельную информационную систему, а интеграционную платформу, объединяющую разнородные источники данных, математические модели и прикладные сервисы в рамках единой архитектуры. Такой подход обеспечивает переход от реактивного к предиктивному управлению и позволяет реализовать риск-ориентированные стратегии [29] обслуживания технических систем.

Сравнительный анализ зарубежных и отечественных решений показал, что мировые плат-

формы ориентированы на экосистемный подход и глубокую интеграцию с BIM, PLM и IoT, тогда как российские разработки находятся на этапе активного формирования, но обладают потенциалом за счет гибкости, открытости архитектуры и адаптации к отраслевой специфике.

Отдельно установлено, что ключевыми факторами эффективности цифровых двойников являются:

- качество и полнота исходных данных;
- уровень интеграции с существующими системами;
- применение методов предиктивной аналитики и искусственного интеллекта;
- масштабируемость и модульность архитектуры.

К ограничениям текущего этапа развития следует отнести высокую сложность внедрения, необходимость стандартизации данных и значительные требования к вычислительной инфраструктуре.

Перспективные направления развития включают:

- интеграцию цифровых двойников с методами интеллектуального управления (в том числе на основе POMDP [29]);
- развитие edge-аналитики и распределенных вычислений;
- формирование отраслевых стандартов данных и интерфейсов.

Таким образом, цифровые двойники являются базовой технологией формирования интеллектуальной железнодорожной инфраструктуры и создают предпосылки для повышения надежности, безопасности и экономической эффективности перевозочного процесса в условиях цифровой трансформации отрасли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Цифровые двойники // РЖД Цифровой. 03.12.2022. URL: <http://rzdigital.ru/technology/tsifrovye-dvoyniki/> (дата обращения: 12.02.2026).
2. Прохоров А. Н., Лысачев М. Н. Цифровой двойник: анализ, тренды, мировой опыт: корпоративное издание / науч. ред. А. И. Боровков. 1-е изд., испр. и доп. М.: АльянсПринт, 2020. 400 с.
3. Зуев Д. В., Бочкарев С. В. Цифровой двойник инфраструктуры железнодорожной автоматизации и телемеханики ОАО «РЖД» // Транспорт Российской Федерации. 2022. № 3 (100). С. 19–22.
4. Преимущества технологии цифрового двойника инфраструктуры / С. С. Юханов, Д. В. Зуев, С. В. Бочкарев, А. А. Федоров // Автоматика, связь, информатика. 2021. № 4. С. 25–27. DOI: 10.34649/AT.2021.4.4.002

5. Об утверждении временной концепции технологии цифрового двойника инфраструктурного комплекса ОАО «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 09.06.2021 № 1281/р.
6. Колесников К. Цифровые двойники и их применение в железнодорожной отрасли // *vc.ru*. 24.08.2020. URL: <http://vc.ru/transport/152429-cifrovye-dvoyniki-i-ih-primenenie-v-zheleznodorozhnoy-otrasli> (дата обращения: 12.02.2026).
7. Ефанов Д. В., Лыков А. А. Основы построения и принципы функционирования систем технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: учебное пособие. СПб.: ПГУПС, 2012. 59 с.
8. От «недиагностируемого утюга» к цифровому двойнику // Хабр. 23.09.2025. URL: <http://habr.com/ru/articles/949184> (дата обращения: 12.02.2026).
9. Barrow K. Bridging the Big Data Gap // *Railway Age*. 11.07.2018. URL: <http://www.railwayage.com/news/bridging-the-big-data-gap/> (дата обращения: 11.01.2026).
10. Rail Digital Twin and Deep Learning for Passenger Flow Prediction Using Mobile Data / Y. Ou [et al.] // *Electronics*. 2025. Vol. 14, iss. 12. Art. 2359. 16 p. DOI: 10.3390/electronics14122359
11. Bentley Systems. Digital Twins Drive Better Outcomes Across Rail Lifecycle. 2022. 14 p. URL: <http://www.bentley.com/wp-content/uploads/ebook-digital-twins-rail-asset-lifecycle-en.pdf> (дата обращения: 12.02.2026).
12. Siemens Railigent X Health States: Optimized Maintenance Decisions Through AI // *Railway USA*. 23.05.2024. URL: <http://railway-usa.com/news/81317-railigent-x-health-states-optimized-maintenance-decisions-through-ai> (дата обращения: 12.02.2026).
13. Luczak M. Dassault Systèmes Spotlights ‘Virtual Twin’ Tech at Railway Interchange 2025 // *Railway Age*. 21.05.2025. URL: <http://www.railwayage.com/news/dassault-systemes-spotlights-virtual-twin-tech-at-railway-interchange-2025/> (дата обращения: 12.02.2026).
14. Zhang Z.-Y., Shang D., Su. S. Digital Twin in Railway Industry: A Bibliometric Analysis and Systematic Review // *Digital Twin*. 2026. Vol. 3, iss. 1. Art. no. 2533858. 25 p. DOI: 10.1080/27525783.2025.2533858
15. Mobility Software Suite X // Siemens Mobility. URL: <http://www.mobility.siemens.com/us/en/portfolio/digital-solutions-software/digital-services/railigent-x.html> (дата обращения: 12.02.2026).
16. How Cognitive Digital Twins Enable Predictive Rail Management // The AnyLogic Company’s Blog. 01.07.2025. URL: <http://medium.com/@anylogic/how-cognitive-digital-twins-enable-predictive-rail-management-7c90cc963067> (дата обращения: 14.11.2025).
17. Chen M. Unleashing the Benefits of Virtual Twins in Rail // Dassault Systèmes Blog. 03.07.2023. URL: <http://blog.3ds.com/industries/business-services/unleashing-the-benefits-of-virtual-twins-in-rail> (дата обращения: 12.02.2026).
18. Siemens расширяет цифровое депо для региональных поездов в Дортмунде // *Железные дороги мира*. 08.05.2024. URL: <http://zdmira.com/news/siemens-rasshiryet-tsifrovoe-depo-dlya-regionalnykh-poezdov-v-dortmunde> (дата обращения: 12.02.2026).
19. Digital Twin Railway: The Future of Railway Management // *BibLus — News and insights on AEC industry and BIM*. 06.12.2024. URL: <http://biblus.accasoftware.com/en/digital-twin-railway-the-future-of-railway-management> (дата обращения: 12.02.2026).
20. Зуев Д. В., Бочкарев С. В. Цифровой двойник инфраструктуры ОАО «РЖД» // *Автоматика, связь, информатика*. 2020. № 11. С. 11–14. DOI: 10.34649/AT.2020.11.11.001
21. Ядро ЕКП ТД. Цифровой двойник ОАО «РЖД». Цифровое моделирование инфраструктуры Трансэнерго (Сервис ЦД-ТЭ) (ЕКП ТД. Сервис ЦД-ТЭ): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686974 Российская Федерация. № 2023686296 / Д. В. Зуев [и др.]; заявл. 30.11.2023; опубл. 11.12.2023; заявитель ОАО «Российские железные дороги». 1 с.
22. Ядро ЕКП ТД. Цифровой двойник ОАО «РЖД». Цифровое моделирование активов Центральной дирекции инфраструктуры (ЦДИ) (Сервис ЦД-ЦДИ) (ЕКП ТД. Сервис ЦД-ЦДИ): свидетельство о государственной

регистрации программы для ЭВМ № 2023660018 Российская Федерация. № 2023619409 / Д. В. Зуев [и др.]; заявл. 12.05.2023; опубл. 17.05.2023; заявитель ОАО «Российские железные дороги». 1 с.

23. Ядро ЕКП ТД. Цифровой двойник инфраструктуры хозяйства автоматики и телемеханики. Сервис работы с BIM моделью в цифровом двойнике (Сервис ЦДШ-BIM) (ЕКП ТД Сервис ЦДШ-BIM): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667187 Российская Федерация. № 2022666465 / Д. В. Зуев [и др.]; заявл. 07.09.2022; опубл. 15.09.2022; заявитель ОАО «Российские железные дороги». 1 с.

24. Бочкарев С. В. Методика оценки и анализа числа срабатываний релейной аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики // Информационные технологии. 2023. Т. 29, № 1. С. 51–56. DOI: 10.17587/it.29.51-56

25. Бочкарев С. В. Расчет сроков замены релейной аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики // Информационные технологии. 2023. Т. 29, № 8. С. 437–444. DOI: 10.17587/it.29.437-444

26. Зуев Д. В., Бочкарев С. В., Федоров А. А. Методология формирования исполненной кабельной трассы на двухниточном плане станции // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 5. С. 21–24. DOI: 10.34649/AT.2022.5.5.001

27. CRRC's New Smart Intercity Train CINOVA2.0 Was Officially Launched // CRRC Group Official Website. 19.05.2023. URL: http://www.crrcgc.cc/en/2023-05/30/article_29BA86E691944B61A73EB514217EE0D9.html (дата обращения: 12.02.2026).

28. К 2035 году будет создан цифровой двойник железнодорожной инфраструктуры Люксембурга // Цифровое Строительство. 27.12.2024. URL: <http://digital-build.ru/news/k-2035-godu-budet-sozdan-czifrovoj-dvojn timer-zheleznodorozhnoj-infrastruktury-lyuksemburga> (дата обращения: 12.02.2026).

29. Бочкарев С. В., Бубнов В. П., Зуев Д. В. Применение метода риск-ориентированной диагностики для технических средств ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. 2026. № 3. С. 23–26. DOI: 10.62994/AT.2026.3.3.004

Дата поступления: 28.04.2026

Решение о публикации: 25.05.2026

Digital Twin Architecture for Rail Transport

Denis V. Zuev

— PhD in Engineering, General Director. Research interests: neural networks, digital twins.
E-mail: zuevdv@gmail.com

Sergey V. Bochkarev

— PhD in Engineering, Technical Director. Research interests: neural networks, digital twins.
E-mail: bochkareffsv@yandex.ru

Sintez AT LLC, 28/29 Sredny ave., Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199004, Russia

For citation: Zuev D. V., Bochkarev S. V. Digital Twin Architecture for Rail Transport, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 2 (46), pp. 17–35. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-246-17-35 (In Russian)

Abstract. *An in-depth system analysis of architectural approaches to the construction and implementation of digital twins in railway transport is presented, which is a key stage in the digital transformation of the industry. **Purpose:** to systematize architectural approaches to the creation of digital twins, analyze key technological solutions and develop recommendations for their integration into a single digital ecosystem of infrastructure and rolling stock management. **Methods:** a comparative study of the world's leading platforms (Siemens Railigent X, Bentley iTwin, Dassault 3DEXPERIENCE) and domestic developments was conducted,*

which revealed the limitations of existing solutions in terms of adaptation to the specifics of railway automation and telemechanics. **Results:** unlike traditional fragmented information systems, the concept of a “single source of truth” is proposed, based on the seamless integration of BIM, PLM and SCADA technologies, which allows for end-to-end lifecycle management of transport assets. The scientific novelty of the research lies in the development and detailing of a five-level hierarchical model of the digital twin, which combines the level of physical objects and sensors, data transmission channels, a storage platform and digital models, an analytical layer and visualization interfaces. **Practical significance:** due to the description of the mechanisms of transition from planned preventive maintenance to predictive and risk-oriented management. It is shown that the implementation of the proposed architecture makes it possible to predict critical malfunctions (for example, defects in axle boxes) several months before their occurrence and to conduct simulation of various operational scenarios. The research results can be used in the design of intelligent infrastructure and rolling stock management systems to improve the safety and economic efficiency of the transportation process.

Keywords: digital twin, railway transport, multilayer architecture, predictive analytics, industrial internet of things, BIM technologies, product lifecycle management, condition monitoring, intelligent transport systems, risk-based approach

REFERENCES

1. Tsifrovye dvoyniki [Digital Twins], *RZhD Tsifrovoy [RZD.Digital]*. Published online at December 03, 2022. Available at: <http://rzdigital.ru/technology/tsifrovye-dvoyniki/> (accessed: February 12, 2026). (In Russian)
2. Prokhorov A. N., Lysachev M. N. Tsifrovoy dvoynik: analiz, trendy, mirovoy opyt: korporativnoe izdanie [Digital Twin: Analysis, Trends, and Global Experience: Corporate Edition]. Moscow, AlyansPrint Publishing House, 2020, 400 p. (In Russian)
3. Zuev D. V., Bochkarev S. V. Tsifrovoy dvoynik infrastruktury zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki OAO “RZhD” [Digital Twin of Railway Automation and Telemechanics Infrastructure of JSC RZD], *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 2022, no. 3 (100), pp. 19–22. (In Russian)
4. Yukhanov S. S., et al. Preimushchestva tekhnologii tsifrovogo dvoynika infrastruktury [Benefits of Infrastructure Digital Twin Technology], *Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2021, no. 4, pp. 25–27. DOI: 10.34649/AT.2021.4.4.002 (In Russian)
5. Ob utverzhdenii vremennoy kontseptsii tekhnologii tsifrovogo dvoynika infrastruktornogo kompleksa OAO “RZhD” [On the Approval of the Temporary Concept of the Digital Twin Technology of the Infrastructure Complex of JSC “Russian Railways”]: Order of JSC “Russian Railways” dated June 09, 2021 no. 1281/r. (In Russian)
6. Kolesnikov K. Tsifrovye dvoyniki i ikh primenenie v zheleznodorozhnoy otrasli [Digital Twins and Their Application in the Railway Industry], *vc.ru*. Published online at August 24, 2020. Available at: <http://vc.ru/transport/152429-cifrovye-dvoyniki-i-ih-primenenie-v-zheleznodorozhnoy-otrasli> (accessed: February 12, 2026). (In Russian)
7. Efanov D. V., Lykov A. A. Osnovy postroeniya i printsipy funktsionirovaniya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: uchebnoe posobie [Fundamentals of Construction and Principles of Functioning of Technical Diagnostics and Monitoring Systems for Railway Automation and Telemechanics Devices: A Textbook]. Saint Petersburg, PSTU, 2012, 59 p. (In Russian)
8. Ot “nediagnostiruemogo utyuga” k tsifrovomu dvoyniku [From an “Undiagnosed Iron” to a Digital Double], *Khabr [Habr]*. Published online at September 23, 2025. Available at: <http://habr.com/ru/articles/949184> (accessed: February 12, 2026). (In Russian)
9. Barrow K. Bridging the Big Data Gap, *Railway Age*. Published online at July 11, 2018. Available at: <http://www.railwayage.com/news/bridging-the-big-data-gap/> (accessed: January 11, 2026).
10. Ou Y., et al. Rail Digital Twin and Deep Learning for Passenger Flow Prediction Using Mobile Data, *Electronics*, 2025, vol. 14, iss. 12, art. no. 2359, 16 p. DOI: 10.3390/electronics14122359

11. Bentley Systems. Digital Twins Drive Better Outcomes Across Rail Lifecycle. 2022. 14 p. Available at: <http://www.bentley.com/wp-content/uploads/ebook-digital-twins-rail-asset-lifecycle-en.pdf> (accessed: February 12, 2026).
12. Siemens Railigent X Health States: Optimized Maintenance Decisions Through AI, *Railway USA*. Published online at May 23, 2024. Available at: <http://railway-usa.com/news/81317-railigent-x-health-states-optimized-maintenance-decisions-through-ai> (accessed: February 12, 2026).
13. Luczak M. Dassault Systèmes Spotlights ‘Virtual Twin’ Tech at Railway Interchange 2025, *Railway Age*. Published online at May 21, 2025. Available at: <http://www.railwayage.com/news/dassault-systemes-spotlights-virtual-twin-tech-at-railway-interchange-2025/> (accessed: February 12, 2026).
14. Zhang Z.-Y., Shang D., Su. S. Digital Twin in Railway Industry: A Bibliometric Analysis and Systematic Review, *Digital Twin*, 2026, vol. 3, iss. 1, art. no. 2533858, 25 p. DOI: 10.1080/27525783.2025.2533858
15. Mobility Software Suite X, *Siemens Mobility*. Available at: <http://www.mobility.siemens.com/us/en/portfolio/digital-solutions-software/digital-services/railigent-x.html> (accessed: February 12, 2026).
16. How Cognitive Digital Twins Enable Predictive Rail Management, *The AnyLogic Company’s Blog*. Published online at July 01, 2025. Available at: <http://medium.com/@anylogic/how-cognitive-digital-twins-enable-predictive-rail-management-7c90cc963067> (accessed: November 14, 2025).
17. Chen M. Unleashing the Benefits of Virtual Twins in Rail, *Dassault Systèmes Blog*. Published online at July 03, 2023. Available at: <http://blog.3ds.com/industries/business-services/unleashing-the-benefits-of-virtual-twins-in-rail> (accessed: February 12, 2026).
18. Siemens rasshiryayet tsifrovoe depo dlya regionalnykh poezdov v Dortmunde [Siemens Expands Digital Depot for Regional Trains in Dortmund], *Zheleznye dorogi mira*. Published online at May 08, 2024. Available at: <http://zdmira.com/news/siemens-rasshiryayet-tsifrovoe-depo-dlya-regionalnykh-poezdov-v-dortmunde> (accessed: February 12, 2026). (In Russian)
19. Digital Twin Railway: The Future of Railway Management, *BibLus — News and insights on AEC industry and BIM*. Published online at December 06, 2024. Available at: <http://biblus.accasoftware.com/en/digital-twin-railway-the-future-of-railway-management> (accessed: February 12, 2026).
20. Zuev D. V., Bochkarev S. V. Tsifrovoy dvoynik infrastruktury OAO “RZhD” [The Digital Twin of the Russian Railways Infrastructure], *Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2020, no. 11, pp. 11–14. DOI: 10.34649/AT.2020.11.11.001 (In Russian)
21. Zuev D. V., et al. Yadro EKP TD. Tsifrovoy dvoynik OAO “RZhD”. Tsifrovoe modelirovanie infrastruktury Transenergo (Servis TsD-TE) (EKP TD. Servis TsD-TE) [EKP TD Core. Digital Twin of JSC “Russian Railways”. Digital Modeling of TransEnergO Infrastructure (CD-TE Service)]. Certificate of State registration of a computer program RU no. 2023686974. Published at December 11, 2023. 1 p. (In Russian)
22. Zuev D. V., et al. Yadro EKP TD. Tsifrovoy dvoynik OAO “RZhD”. Tsifrovoe modelirovanie aktivov Tsentralnoy direktzii infrastruktury (TsDI) (Servis TsD-TsDI) (EKP TD. Servis TsD-TsDI) [EKP TD Core. Digital Twin of JSC “Russian Railways”. Digital Modeling of Infrastructure Assets (CD-CDI Service)]. Certificate of State registration of a computer program RU no. 2023660018. Published at May 17, 2023. 1 p. (In Russian)
23. Zuev D. V., et al. EKP TD. Tsifrovoy dvoynik infrastruktury khozyaystva avtomatiki i telemekhaniki. Servis raboty s BIM modelu v tsifrovom dvoynike (Servis TsDSh-BIM) (EKP TD Servis TsDSh-BIM) [Digital Twin of Railway Automation Infrastructure. BIM Model Integration Service (CDSh-BIM)]. Certificate of State registration of a computer program RU no. 2022667187. Published at September 15, 2022. 1 p. (In Russian)
24. Bochkarev S. V. Metodika otsenki i analiza chisla srabatyvaniy releynoy apparatury zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Methodology of Estimation and Analysis of the Number of Actuations of Relay Equipment of Railway Automation and Telemechanics], *Informatsionnye tekhnologii [Information Technologies]*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 51–56. DOI: 10.17587/it.29.51-56 (In Russian)

25. Bochkarev S. V. Raschet srokov zameny releyonoy apparatury zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Calculation of the Timing of the Replacement of Relay Equipment for Railway Automation and Telemechanic], *Informatsionnye tekhnologii [Information Technologies]*, 2023, vol. 29, no. 8, pp. 437–444. DOI: 10.17587/it.29.437-444 (In Russian)
26. Zuev D.V., Bochkarev S.V., Fedorov A.A. Metodologiya formirovaniya ispolnennoy kabelnoy trassy na dvukhnitochnom plane stantsii [Methodology of Forming a Completed Cable Route on a Two-Line Plan of the Station], *Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2022, no. 5, pp. 21–24. DOI: 10.34649/AT.2022.5.5.001 (In Russian)
27. CRRC's New Smart Intercity Train CINOVA2.0 Was Officially Launched, *CRRC Group Official Website*. Published online at May 19, 2023. Available at: http://www.crrecg.cc/en/2023-05/30/article_29BA86E691944B61A73EB514217EE0D9.html (accessed: February 12, 2026).
28. K 2035 godu budet sozdan tsifrovoy dvoynik zheleznodorozhnoy infrastruktury Lyuksemburga [By 2035, A Digital Twin of Luxembourg's Railway Infrastructure will be Created], *Tsifrovoe Stroitelstvo [Digital Build]*. Published online at December 27, 2024. Available at: <http://digital-build.ru/news/k-2035-godu-budet-sozdan-czifrovoj-dvoynik-zheleznodorozhnoj-infrastruktury-lyuksemburga> (accessed: February 12, 2026). (In Russian)
29. Bochkarev S. V., Bubnov V. P., Zuev D. V. Primenenie metoda risk-orientirovannoy diagnostiki dlya tekhnicheskikh sredstv ZhAT [Application of the Risk-Oriented Diagnostics Method for Railway Automation Equipment], *Avtomatika, svyaz, informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2026, no. 3, pp. 23–26. DOI: 10.62994/AT.2026.3.3.004 (In Russian)

Received: April 28, 2026

Accepted: May 25, 2026