

УДК 629.4:004.94

*А. В. ВОРОЖУН*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь*

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Представлен обзор работ, связанных с практическим использованием цифровых двойников железнодорожных вагонов и локомотивов. Рассмотрены особенности цифровых моделей, теней и двойников. Приведены конкретные технические решения, которые применяются при анализе различных процессов, встречающихся при эксплуатации железнодорожного подвижного состава. Определены актуальные тенденции интеграции цифровых технологий в транспортную инфраструктуру.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, грузовой вагон, цифровой двойник, цифровая тень, моделирование.

Под цифровым двойником (Digital Twin) в настоящее время понимается обучаемая система, которая включает комплекс уточняемых в ходе натуральных экспериментов математических моделей объекта и позволяет предсказать его поведение на всём жизненном цикле [1]. На транспорте цифровой двойник рассматривается как компьютерный аналог физического устройства, моделирующий его реакцию на воздействия различных внешних факторов. Он может использоваться на всех этапах жизненного цикла транспортного средства: при разработке конструкции, производстве и эксплуатации.

В ходе эскизного проектирования для выбора оптимального технического решения создается ряд вариаций моделей разрабатываемого изделия с использованием программного обеспечения для системного и имитационного моделирования [2]. На этапе технического проектирования полученная ранее модель дорабатывается с использованием более точных моделей элементов, которые являются результатом многовариантных численных расчетов. Данная уточненная модель позволяет оптимизировать функционирование изделия, учитывая особенности режимов работы и воздействия окружающей среды. В процессе эксплуатации цифровой двойник обеспечивает обратную связь с процессами разработки и производства, диагностику и прогнозирование неисправностей и при необходимости дорабатывается с целью повышения эффективности функционирования, перекалибровки и выявления новых потребностей потребителей.

В статье [3] рассматриваются различные подходы к созданию цифровых двойников, их классификация. Отмечается, что внедрение таких технологий позволяет улучшить контроль за производственными процессами, снизить расходы на обслуживание и повысить качество продукции. Однако для их успешной реализации требуется наличие широких математических и ИТ-компетенций.

В работе [4] представлен обзор программных средств, предназначенных для создания цифровых двойников разных типов. Отмечается, что существующие программные решения основываются на четырех основных подходах: функционально-ориентированном, процессно-ориентированном, предметно-ориентированном и отраслевом (таблица 1) [5, 6].

**Таблица 1 – Программные продукты для создания цифровых двойников изделий, объектов, систем**

Подход	Программное обеспечение
Функционально-ориентированный	Autodesk Digital Twin Bosch IoT Suite AnyLogic ANSYS Twin Builder
Процессно-ориентированный	SAP Leonardo Internet of Things Oracle IoT Production Monitoring Cloud
Предметно-ориентированный	Cohesion, iTwins
Отраслевой	Cerebra Flutura Decision Science Tekvel Park

Целью представленной работы является анализ современных подходов к созданию и применению цифровых двойников железнодорожного подвижного состава, а также оценка их возможных областей применения.

На железнодорожном транспорте процессы, связанные с эксплуатацией подвижного состава, имеют нерегулярный и случайный характер. Это обусловлено не только широким диапазоном значений эксплуатационных воздействий, которым подвергается подвижной состав, но и тем, что он используется в условиях, окруженных разнообразными физическими объектами и инфраструктурой. Их свойства и параметры могут изменяться со временем под воздействием различных факторов, таких как износ, климатические условия или техническое состояние. Управление и прогнозирование работы подвижного состава требуют при моделировании процессов учета возникающей неопределенности.

Развитие интеллектуальных транспортных систем в контексте железнодорожного транспорта с особым акцентом на роль технологий цифровых двойников инфраструктуры и подвижного состава, а также проекты и разработки в разных регионах анализируются в работе [7]. В ЕС и Китае внедряются инновационные решения, направленные на интеграцию цифровых двойников в транспортную инфраструктуру. В ОАО «РЖД» (Россия) нашли применение системы автоматизированного управления строительством и эксплуатацией (АСУ ВМ), разрабатывается проект «Умный локомотив» и создается цифровой двойник сортировочной станции.

В работе [8] рассмотрены разработки цифровых двойников для компонентов инфраструктуры с целью повышения точности прогнозирования их эксплуатационного состояния. Описаны модели, предназначенные для диагностики усталостных повреждений рельсов с целью предотвращения аварий и организации предиктивного обслуживания. Также значительное внимание уделено системам мониторинга состояния мостов, основанным на искусственном интеллекте и методах конечных элементов, что позволяет точно прогнозировать деформации и выявлять ранние признаки разрушений.

Общий анализ показывает, что все регионы опираются на схожие технологические платформы и решения: BIM-платформы, сети IoT и 5G, системы искусственного интеллекта и машинного обучения, а также моделирование и симуляцию процессов. Единый технологический базис развития цифровых двойников в железнодорожной отрасли способствует повышению ее эффективности и инновационному развитию.

При анализе процессов, связанных с функционированием железнодорожного подвижного состава, используются цифровые модели, цифровые тени и цифровые двойники (рисунок 1) [9]. Цифровые модели широко применяются на первом этапе жизненного цикла изделия – при его проектировании. Они оперируют с системами, построенными на основе опыта эксплуатации аналогичных изделий. Цифровая тень отражает поведение реального объекта в условиях эксплуатации, используя избыточный объем собранных на этом объекте данных о функционировании различных элементов конструкций.

Цифровой двойник – это постоянно обновляемая виртуальная модель, которая учитывает основные изменения состояния объекта в процессе эксплуатации и позволяет, учитывая их, с высокой степенью точности моделировать работу сложных систем на протяжении всего срока службы.



Рисунок 1 – Функции цифровой модели, цифровой тени и цифрового двойника

Для компьютерного двойника важно учитывать не только подвижной железнодорожный состав в целом, но и отдельные конструктивные элементы поезда и инфраструктуры: рельсы, колёса, тормозные механизмы, узлы крепления, автосцепные устройства, транспортируемые грузы и т. д. Такая детализация позволяет более точно моделировать взаимодействия внутри системы, выявлять потенциальные слабые места и прогнозировать поведение каждого компонента при сложных сценариях, например, при сходе с рельсов или повреждениях, что в конечном итоге способствует более надежной оценке рисков и разработке эффективных мер защиты от них.

Цифровые двойники подвижного состава включают системы накопления информации, которая возвращается в систему цифрового проектирования, где сравниваются реальная и плановая ситуации. Чтобы обеспечить эффективное функционирование цифровых двойников, требуется иметь цифровые паспорта или формуляры изделий, которые наполняются качественными данными. На основе их анализа можно повысить эффективность оценки состояния технического оборудования и предсказать возможные поломки.

Рассмотрим некоторые варианты практического использования концепции цифровых двойников на железнодорожном подвижном составе.

В работе [10] выполнен расчет прочности съемного модуля Flat Rack с вязкоупругими фитингами, предназначенного для транспортировки негабаритных грузов (рисунок 2) с помощью метода конечных элементов. Модуль, состоящий из компонентов из прямоугольных труб, был протестирован на динамическую нагрузку, имитирующую маневровый удар. Результаты компьютерного моделирования подтвердили обеспечение необходимой прочности конструкции и безопасность транспортировки грузов при эксплуатационных нагрузках.

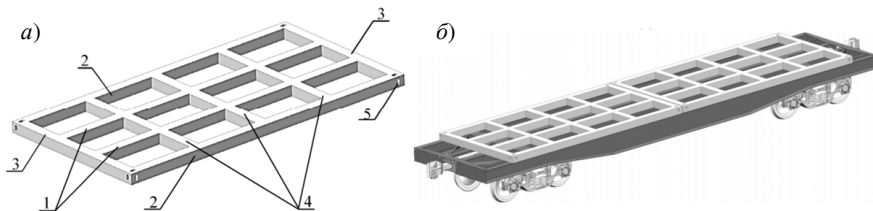


Рисунок 2 – Съемный модуль Flat Rack [10]:

*а* – конструктивные элементы съемного модуля; *б* – съемные модули на платформе

Концепция разработки цифровых двойников цистерн с грузом представлена в статье [11]. Рассматриваются этапы их создания, описываются функции, связанные со сбором и обработкой данных с помощью датчиков, видеокамер и тепловизоров (рисунок 3). Приведены примеры внедрения цифровых двойников и обсуждены перспективы их использования для повышения надежности, автономности и безопасности грузовых операций с цистернами.

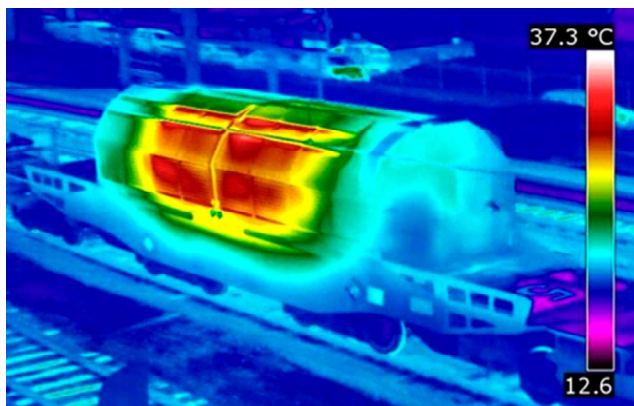


Рисунок 3 – Работа тепловизора по проверке состояния наливного груза в цистерне [11]

Технология цифрового двойника может быть использована также при моделировании работы электрического оборудования локомотивов для прогнозирования параметров его функционирования и сценариев развития ситуаций (включая аварийные). В этом случае используются данные измерительных систем, снимаемые непосредственно в пути следования, а также в реальном времени осуществляется поиск допустимых состояний на основе моделирования в рамках прескриптивной аналитики [12]. Решение поставленных задач осуществляется на основе комплексного применения методов имитационного компьютерного моделирования, математической статистики и теории электрической тяги. Такой подход открывает новые перспективы для повышения надежности и безопасности электровозов, а также для более эффективного управления их работой в различных условиях эксплуатации.

В работе [13] авторами представлена модель, позволяющая оценивать риск схода вагонов в реальном масштабе времени. Она использует моделирование, основанное на масштабных численных расчетах динамики многозвенных систем, и использует современные алгоритмы машинного анализа для прогнозирования вероятности схода. В качестве примера было выполнено моделирование тяжелого вагона для перевозки железной руды с трехсекционными тележками (рисунок 4). Симулятор поезда использовал для анализа величины скорости, боковых сил сцепления и радиусов кривизны путей – ключевые факторы, определяющие риск схода в реальных условиях эксплуатации. Результаты показали, что предложенная модель способна эффективно предсказывать индекс риска схода с рельсов как для порожнего, так и для загруженного состояния вагона, что подтверждает ее потенциал для использования в системах реального времени. Предложенный метод обеспечивает высокую точность и быстрый отклик, что критично для систем автоматического управления и предупреждения аварийных ситуаций.

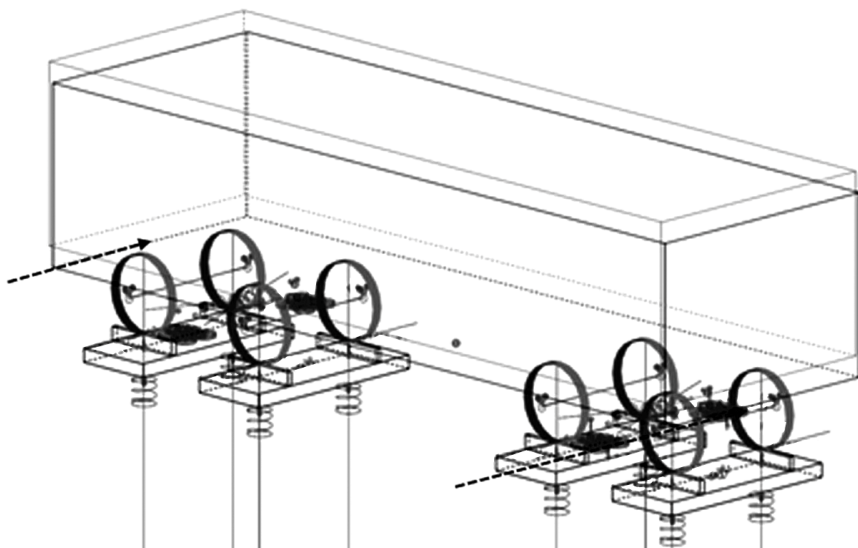


Рисунок 4 – Трехмерная модель для оценки риска схода вагонов [13]

Статья [14] посвящена созданию цифрового двойника – виртуальной модели, предназначенной для симуляции динамики схода поезда с рельсов (рисунок 5). Основная цель работы – создание упрощенной, но высокоточной одномерной модели, учитывающей физику процесса и позволяющей оценить вероятность возникновения потенциальных опасных ситуаций и тяжесть последствий схода.

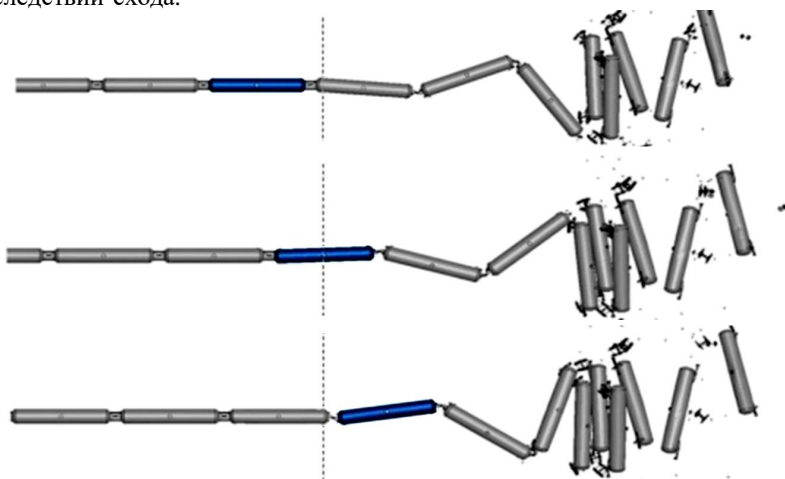


Рисунок 5 – Положения вагонов поезда в процессе схода с рельсов [14]

Предложенная авторами работы [14] модель представляет собой компьютерный двойник, который позволяет в реальном времени или при различных сценариях моделировать поведение поезда, учитывая такие параметры, как длина и масса вагонов, сопротивление пути, уклон, тормозные силы и влияние внешних факторов, вызывающих сход. Ее практическое применение дает возможность создания системы мониторинга и реагирования, которая в дальнейшем может стать составным элементом системы управления движением поездов, позволяющих обеспечить повышение безопасности движения.

Еще одно направление создания компьютерных двойников связано с оценкой безопасности высокоскоростных грузовых поездов [15]. В этом случае при моделировании динамики многосвязных систем следует принимать во внимание аэродинамические нагрузки, определяемые средствами вычислительной гидродинамики (CFD) (рисунок 6). Проведенные исследования показали, что риск опрокидывания при боковом ветре в значительной мере зависит от расположения и характеристик груза внутри вагона, а компьютерное моделирование позволяет точно предсказывать соответствующие эффекты. Использование цифровых моделей и CFD-симуляции значительно сокращает необходимость физических испытаний, повышая точность прогнозов и способствуя разработке более надежных систем грузоперевозки с учетом реальных аэродинамических факторов.

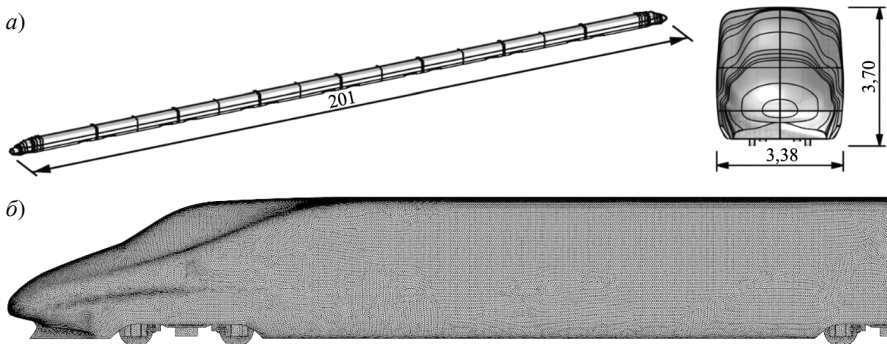


Рисунок 6 – Модель цифрового двойника грузового поезда [15]:  
*а* – общий вид поезда; *б* – сетка конечных элементов на головном вагоне

Выполненный анализ показывает, что при проектировании тягового подвижного состава с помощью цифровых двойников будут решены следующие задачи [9]:

- оперативное осуществление тестовых запусков процесса или производственной цепочки, не требующее существенных затрат;
- обнаружение проблем или уязвимостей до запуска производства и поступления объекта в эксплуатацию;

- повышение прибыльности и конкурентоспособности бизнеса;
- долгосрочное планирование развития продукта и компании;
- повышение лояльности клиентов вследствие повышения точности прогнозирования спроса и потребительских качеств продукта.

Внедрение технологии цифровых двойников в жизненный цикл грузового вагона позволит повысить экономическую эффективность в течение всего срока эксплуатации. По оценкам экспертов, она может в некоторых случаях увеличиться в 10 раз и более вследствие того, что уже на этапе проектирования удастся учесть существующие особенности технологии производства, а также опыт использования аналогов на сети железных дорог. На этапе эксплуатации постоянный обмен данными между цифровой моделью и реальным грузовым вагоном позволит осуществить развернутый контроль за откликами на внешние воздействия, что приведет к снижению числа текущих ремонтов.

Таким образом, исходя из анализа рассмотренных работ следует, что в области использования цифровых двойников на железнодорожном транспорте наблюдается активное развитие технологий и открываются широкие возможности их применения для повышения безопасности, эффективности и надежности эксплуатации. В то же время на данный момент отсутствует единый подход к созданию комплексных моделей, позволяющих в режиме реального времени анализировать все процессы и параметры объектов в системе. Поэтому имеется необходимость дальнейших исследований с целью разработки методов, позволяющих интегрировать цифровые двойники в алгоритмы управления и эксплуатации железнодорожного транспорта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Лобков, К. Ю.** Применение методологии цифровых двойников в разработке инновационных проектов на высокотехнологичных производственных предприятиях / К. Ю. Лобков // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2021. – Т. 3. – С. 122–124.

2 **Кокорев, Д. С.** Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса / Д. С. Кокорев, А. А. Юрин // Colloquium Journal. – 2019. – № 10–2 (34). – С. 101–104.

3 **Царев, М. В.** Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования / М. В. Царев, Ю. С. Андреев // Известия вузов. Приборостроение. – 2021. – Т. 64, № 7. – С. 517–531.

4 **Миронов, Д. А.** Обзор программных продуктов разработки цифровых двойников / Д. А. Миронов, А. К. Ламм, Р. К. Расулов // Вестник Национального института бизнеса. – 2022. – № 4 (48). – С. 12–25.

5 **Щекочихин, О. В.** Современные тенденции управления киберфизическими системами на основе цифровых двойников / О. В. Щекочихин // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технологического регулирования. – 2021. – № 5 (63). – С. 33–37.

6 Digital Twin-Driven Product Design Framework / F. Tao, F. Sui, A. Liu [et al.] // International Journal of Production Research. – 2019. – Vol. 57, is. 12. – P. 3935–3953.

7 **Зуев, Д. В.** Развитие интеллектуальных транспортных систем: цифровые двойники в железнодорожной отрасли / Д. В. Зуев // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2025. – № 4 (44). – С. 33–46.

8 **Kushwaha, D.** Advancements and applications of digital twin in the railway industry: a literature review / D. Kushwaha, A. Kumar, S. P. Harsha // International Journal of Rail Transportation. – 2025. – Vol. 13, is. 5. – P. 865–890.

9 **Тишуков, С. В.** Применение цифровых двойников при проектировании тягово-го подвижного состава / С. В. Тишуков, Д. А. Чемоданов // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Бел. ж. д. В 2 ч. Ч. 1. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 69–70.

10 The Analysis of the Loading and the Strength of the FLAT RACK Removable Module with Viscoelastic Bonds in the Fittings / S. Panchenko, J. Gerlici, G. Vatulja [et al.] // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, is. 1. – P. 1–14.

11 Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства / Н. В. Курганова, М. А. Филин, Д. С. Черняев [и др.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Vol. 7, is. 5. – P. 105–115.

12 **Будаев, А. А.** Моделирование электрической части грузового электровоза на основе технологии «Цифровой двойник» / А. А. Будаев, Е. А. Третьяков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – СПб.: ПГУПС. – 2025. – Т. 22, вып. 1. – С. 92–101.

13 Augmented digital twin for railway systems / E. Bernal, Q. Wu, M. Spiryagin, C. Cole // Vehicle System Dynamics. – 2024. – Vol. 62, is. 1. – P. 67–83.

14 Freight train derailment severity prediction: a physics-informed one-dimensional model / D. Kang, S. W. Kirkpatrick, Z. Zhang [et al.] // Smart and Resilient Transportation. – 2024. – Vol. 6, is. 1. – P. 72–92.

15 Correlation between cargo properties and train overturning safety for a high-speed freight train under strong winds / D. Zhang, Z. Guo, Y. Ni [et al.] // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2023. – Vol. 17, is. 1. – P. 1–16.

*A. U. VARAZHUN*

*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

## **MODERN APPROACHES TO CREATING DIGITAL TWINS OF RAILROAD ROLLING STOCK**

The paper presents a review of investigations related to the practical use of digital twins of railcars and locomotives. The characteristics of digital models, shadows, and twins are discussed. Specific technical solutions applied in the analysis of various processes encountered during the operation of railcars are presented. Current trends in the integration of digital technologies into transport infrastructure are identified.

**Keywords:** rail transport, freight car, digital twin, digital shadow, modeling.

Получено 15.10.2025