

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

УДК 656.2:004.9

А. А. ЕРОФЕЕВ, доктор технических наук, Д. В. ЛЯПОРОВ, аспирант, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ УЧАСТКОВ

Рассмотрены теоретические подходы к формированию цифрового двойника железнодорожного участка. Проведен анализ определений цифровых двойников и выделены задачи, которые решает цифровой двойник железнодорожного участка. Рассмотрены характеристики, типы и структура цифровых двойников. Описаны аспекты внедрения и применения цифровых двойников в железнодорожной отрасли. Представлена модель создания и внедрения цифрового двойника железнодорожного участка и обозначены направления будущих исследований, связанных с анализом технических и технологических параметров объектов путевой инфраструктуры железнодорожных участков, влияющих на организацию перевозочного процесса.

В настоящее время в условиях стремительного развития и внедрения цифровых технологий [1] возникает необходимость внедрения инновационных подходов управления, обеспечивающих эффективность принятия решений [2] на железнодорожном транспорте. В связи с этим актуальным направлением данного исследования является разработка модели формирования цифрового двойника железнодорожного участка, позволяющая повысить эффективность, безопасность и техническое обслуживание [3] перевозочного процесса.

Впервые концепция цифрового двойника была озвучена в 2003 году профессором Майклом Гривсом в Мичиганском университете, в соответствии с которой он – это цифровая копия одного или нескольких конкретных устройств, которая может абстрактно представлять реальное устройство и использоваться в качестве основы для тестирования в реальных или смоделированных условиях [4].

К основным причинам появления и развития концепции цифрового двойника можно отнести развитие технологий моделирования объектов в виртуальной среде, в системах автоматизированного производства и проектирования, управления жизненным циклом изделия и данными об изделии [5].

На основе анализа современных источников прослеживается эволюция понятия «цифровой двойник» и различные подходы к его трактовке – от простых виртуальных моделей до сложных интеллектуальных систем (таблица 1).

Исходя из анализа множества источников следует, что в них нет универсального термина для цифрового двойника, но можно выделить следующие задачи, которые решает цифровой двойник [11] применительно к железнодорожному участку:

- прогнозируемая и предсказательная аналитика (срок службы путей и колес);
- оптимизация производственных процессов (техническое обслуживание путей, стрелочных переводов, контактной сети);
- дистанционный мониторинг и управление (стрелочными переводами);
- обучение и симуляция (пропуск поездов);
- разработка и проектирование (реконструкция, ремонт пути);
- поддержание жизненного цикла продукта (стрелочного перевода).

Таблица 1 – Анализ определений цифрового двойника

Автор (источник)	Определение
Grievies M., Vickers J. [6]	Набор виртуальных информационных конструкций, которые полностью описывают потенциальный или фактический физически производимый продукт от микроатомного уровня до макрогеометрического уровня. В оптимальном случае любая информация, которую можно получить при проверке физического произведенного продукта, можно получить из его цифрового двойника
Боровков А. И. [7]	Это семейство сложных мультидисциплинарных математических моделей с высоким уровнем адекватности реальным материалам, реальным объектам, реальным 42 физико-механическим процессам, описываемых 3D нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных
Сухомлин В. А., Намиот Д. Е., Гапанович Д. А. [8]	Цифровая копия конкретного физического объекта, которая отражает структуру, производительность, техническое состояние и характер рабочей миссии физического объекта, включая такие параметры, как, например, пройденные километры, возникшие неисправности, а также историю технического обслуживания и ремонта реального изделия
Liu Z., Meyendorf N., Mrad N. [9]	Живая модель физического актива или системы, которая постоянно адаптируется к операционным изменениям на основе собранных онлайн данных и информации и может прогнозировать будущее соответствующего физического аналога
Semeraro C. [10]	Набор адаптивных моделей, которые симулируют поведение физической системы в виртуальной системе, получая данные в реальном времени для обновления параллельно жизненному циклу этой системы. Цифровой двойник повторяет физическую систему для предсказания ошибок и возможностей для изменения, чтобы предписать действия в реальном времени по оптимизации или смягчению непредвиденных событий через наблюдение и оценки операционной профильной системы

Чтобы эффективно использовать в железнодорожном транспорте моделируемые объекты и системы цифровыми двойниками необходимо знать их характе-

ристики и типы. В исследовании [12] на основании анализа научных работ выделяются характеристики цифровых двойников, приведенные в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики цифровых двойников и их описание применительно к железнодорожному участку

Характеристика	Описание	Примеры
Физическая сущность	Физическая сущность (двойник), существующая в физической среде	Мост, стрелочный перевод, путь, рельс, шпала
Виртуальная сущность	Виртуальная сущность (двойник), существующая в виртуальной среде	Компьютерная модель моста, стрелочного перевода, пути, рельсов, шпал
Физическая среда	Среда, в которой существует физическая сущность (двойник)	Геометрические параметры и механические свойства земляной насыпи, состав почв, климатические условия, ветровые нагрузки
Виртуальная среда	Среда, в которой существует виртуальная сущность (двойник)	Цифровая платформа, серверное оборудование, математические модели, специальное ПО
Состояние	Измеренные значения всех параметров, соответствующих физической (виртуальной) сущности (двойнику) и его среде	Тип рельсов, геометрические, физические и механические параметры объектов путевой инфраструктуры, балластного слоя
Метрология	Процесс измерения состояния физической (виртуальной) сущности (двойника)	Точки измерения параметров рельсов, точность измерений, допустимые отклонения, качество
Реализация	Процесс, изменяющий состояние физической/виртуальной сущности (двойника)	Датчики параметров, вагон-измеритель, системы акустической диагностики
Синхронизация	Процесс синхронизации состояний физической и виртуальной сущности (двойника)	Каналы и технологии информационного обмена
Скорость синхронизации	Скорость, с которой происходит синхронизация	Объем информации, периодичность поступления информации
Физическо-виртуальное соединение	Соединение данных (процесс измерения) состояния физической сущности и реализации этого состояния в виртуальной сущности	Изменение температуры рельсов, геометрических параметров, наличия дефектов, параметры окружающей среды
Виртуально-физическое соединение	Соединение данных (процесс измерения) состояния виртуальной сущности/двойника/среды и реализации этого состояния в физической сущности/двойнике/среде)	Интерфейс визуализации, формы предоставления информации
Физические процессы	Процессы, в которых участвует физическая сущность двойника, и/или процессы, воздействующие на физическую сущность двойника или с ним взаимодействующие	Технология пропуска поездов, скорости движения поездов, выполнение ремонтных и строительно-монтажных работ
Виртуальные процессы	Процессы, в которых задействована виртуальная сущность (двойника), и/или процессы, воздействующие на виртуальную сущность (двойник) или с его помощью	Моделирование эксплуатационной нагрузки, оценка влияния инновационного подвижного состава на состояние путей, оценка возможности использования отдельных комплектующих, комплексная оценка скорости движения поездов и состояния пути на безопасность движения поездов

Для эффективной разработки и внедрения цифровых двойников в транспортной отрасли необходимо знать их технологическую структуру, которая включает следующие блоки [1]:

- модели данных – это данные, собранные с физических объектов, и виртуальные модели этих объектов;
- компоненты интеграции – обеспечивают взаимодействие между различными системами и платформами;
- системы управления – регулируют состояние и поведение цифровых двойников в режиме реального времени.

В зависимости от области построения выделяют следующие типы цифровых двойников [13]:

- продукта – виртуальная модель конкретного продукта, которая позволяет провести анализ поведения данного объекта в различных условиях реального мира

и повысить эффективность создания данного продукта с уменьшением затрат;

- процесса – виртуальная модель какого-либо процесса, позволяющая оптимизировать и разрабатывать наиболее эффективные методики для различных его этапов;
- системы – виртуальная модель системы, позволяющая оптимизировать как отдельные элементы, так и процессы в данной системе.

Таким образом, цифровой двойник железнодорожного участка представляет собой систему, состоящую из продуктов (рельсы, стрелочные переводы, мосты) и процессов этого участка (техническое обслуживание «продуктов» железнодорожного участка, перевозочный процесс).

Изучение применения цифровых двойников в различных отраслях показало их широкое использование, в

том числе и в транспорте. Большая часть исследований в области технологии цифрового двойника для транспортной инфраструктуры была сосредоточена на моделировании инфраструктуры, мониторинге и управлении в режиме реального времени, профилактическом обслуживании и управлении безопасностью [14].

В статье [15] представлен обзор применения цифровых двойников в управлении железнодорожной инфраструктурой на основе интеграции данных из различных источников, утверждения парадигм управления и обработки большого объема данных. В статье [16] предлагается использовать универсальный инструмент имитационного моделирования AnyLogic для построения цифрового двойника железнодорожного узла и представлена концепция интеграции его в интеллектуальную транспортную систему. В работе [17] рассмотрено применение цифровых двойников в проектировании, техническом обслуживании и повышении безопасности железных дорог. В статье [18] рассматривается внедрение цифровых двойников с использованием искусственного интеллекта и машинного обучения в железнодорожном секторе, направленное на техническое обслуживание железнодорожного транспорта. В исследовании [19] рассматривается разработка концептуальной платформы цифрового двойника железной дороги для обеспечения мониторинга большегрузных вагонов. В работе [20] для повышения надежности и безопасности железнодорожных перевозок предлагается использование цифровых двойников для технологического обслуживания стрелочных переводов.

В исследовании [21] отмечается применение цифровых двойников в железнодорожной отрасли по от-

дельным областям, таким как диагностика и прогнозирование неисправностей, техническое обслуживание железнодорожных транспортных средств, железнодорожной инфраструктуры, а весь в целом железнодорожный участок, как один цифровой двойник, который будет учитывать все области, не рассматривается.

С созданием и внедрением цифрового двойника для инфраструктуры всей железнодорожной сети Италии помогает компания AlmovivA. Он будет учитывать всю инфраструктуру, включая станции, туннели, мосты, сигналы, стрелочные переводы, оборудование для электрификации и ИТ-системы, которые всё это координируют. Информация о компонентах будет поступать с помощью датчиков GPS и камер. Цифровой двойник сможет обеспечивать обратную связь с его реальным аналогом [22].

Методология создания и внедрения цифрового двойника для железнодорожного участка включает сбор существующих данных и с датчиков, установленных по всей сети, включая поезда, пути, и станции, которые интегрируются в виртуальную модель с использованием передовых методов аналитики и моделирования, обеспечивая мониторинг в режиме реального времени, прогнозируя техническое обслуживание и оптимизируя эксплуатацию за счет зеркального отображения физической инфраструктуры и тестирования сценариев для повышения безопасности и эффективности [3].

На основе анализа работ [3, 24–26] предлагается модель создания и внедрения цифрового двойника железнодорожного участка, представленная на рисунке 1.



Рисунок 1 – Модель создания и внедрения цифрового двойника железнодорожного участка

Результаты исследования компании MarkNtel Advisors показывают, что мировой рынок цифровых двойников железных дорог с 2024 по 2030 год будет расти в среднем на 29,36 % [26].

В данной работе были рассмотрены решаемые задачи цифровыми двойниками, их характеристики, структура и типы. Выполнен обзор применения цифровых двойников в железнодорожной отрасли. Результаты исследования показывают, что цифровой двойник железнодорожного участка обладает большим потенциалом и будет важнейшим инструментом повышения эксплуатационной эффективности и безопасности перевозочного процесса.

В ходе разработки модели создания и внедрения цифрового двойника железнодорожного участка было выявлено, что для создания и функционирования цифровой модели необходимо большое количество данных, позволяющих отражать текущее состояние и предсказывать будущие изменения железнодорожного участка.

Для систематизации получения данных необходимо выполнить анализ технических и технологических параметров объектов путевой инфраструктуры железнодорожных участков, влияющих на организацию перевозочного процесса.

Дальнейшая исследовательская работа будет посвящена исследованию железнодорожных участков, их технических и технологических параметров, влияющих на технологию пропуска поездопотоков для разработки модели прогнозирования параметров перевозочного процесса на основе цифровых двойников железнодорожных участков.

Список литературы

- 1 **Абрамов, В. И.** Цифровые двойники: характеристики, типология, практики развития / В. И. Абрамов, В. В. Гордеев, А. Д. Столяров // Вопросы инновационной экономики. – 2024. – Т. 14, № 3. – С. 691–716. – DOI: 10.18334/vinec.14.3.121484. – URL: <https://economic.ru/lib/121484> (дата обращения: 06.12.2025).
- 2 **Абрамов, В. И.** Анализ стратегий цифровой трансформации регионов России в контексте достижения национальных целей / В. И. Абрамов, В. Д. Андреев // Вопросы государственного и муниципального управления. – 2023. – № 1. – С. 89–119. – DOI: 10.17323/1999-5431-2023-0-1-89-119. – EDN JOKUIR. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_50407415_50208260.pdf (дата обращения: 06.10.2025).
- 4 **Wang, Z.** Digital Twin Technology / Z. Wang // Industry 4.0 Impact on Intelligent Logistics and Manufacturing, 2020. – URL: <https://www.intechopen.com/chapters/63861#B2> (date of access: 06.10.2025).
- 5 **Лычкина, Н. Н.** Концепция цифрового двойника и роль имитационных моделей в архитектуре цифрового двойника / Н. Н. Лычкина, В. В. Павлов // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023) : сб. трудов одиннадцатой всерос. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Казань, 18–20 окт. 2023 г. – Казань : Издательство АН РТ, 2023. – С. 139–149. – EDN ZAOYZG. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_55948057_40746285.pdf (дата обращения: 06.10.2025).
- 6 **Grieves, M.** Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / M. Grieves, J. Vickers // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems(eds) / J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves (eds.). – Springer : Cham, 2017. – P. 85–113. – URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4 (date of access: 06.10.2025).
- 7 **Боровков, А. И.** Цифровой двойник – опыт CompMech-Lab@ / А. И. Боровков. – URL: <https://nticenter.spbstu.ru/news/8023> (date of access: 06.12.2025).
- 8 **Сухомлин, В. А.** Анализ концепции развития цифровых двойников нового поколения / В. А. Сухомлин, Д. Е. Намиот, Д. А. Гапанович // Международный журнал открытых информационных технологий. – 2024. – Т. 12, № 7. – С. 119–130. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-tendentsiy-razvitiya-tsifrovyh-dvoynikov-novogo-pokoleniya/viewer> (дата обращения: 06.10.2025).
- 9 **Liu, Z.** The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin / Z. Liu, N. Meyendorf, N. Mrad // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 37. – URL: <https://pism.com/10.1063/1.5031520> (date of access: 06.10.2025).
- 10 Digital twin paradigm: A systematic literature review / C. Semeraro, M. Lezoche, H. Panetto, M. Dassisti // Computers in Industry. – 2021. – Vol. 130. – P. 103469. – URL: https://www.researchgate.net/publication/351409715_Digital_Twin_Paradigm_A_Systematic_Literature_Review (date of access: 06.10.2025).
- 11 Энергосберегающая система управления нагревом заготовок в проходных печах двойного пользования технологии цифровой. – URL: https://www.chsu.ru/upload/iblock/74a/hnlelbbcfz6c1m2392dвуqjz0jtr8592/Диссер-тация_Нужин_Д.В.pdf (дата обращения: 07.10.2025).
- 12 Hicks Characterising the Digital Twin: A systematic literature review / D. Jones, C. Snider, A. Nassehi [et al.] // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2020. – P. 36–52. – URL: https://www.researchgate.net/publication/339802823_Characterising_the_Digital_Twin_A_systematic_literature_review (date of access: 07.12.2025).
- 13 **Madni, A. M.** Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering / A. M. Madni, C. C. Madni, S. D. Luccero // Systems. – 2019. – № 7 (1). – DOI: 10.3390/systems7010007. – URL: https://www.researchgate.net/publication/330749986_Leveraging_Digital_Twin_Technology_in_Model-Based_Systems_Engineering (date of access: 07.10.2025).
- 14 Digital Twin Technology in Transportation Infrastructure: A Comprehensive Survey of Current Applications, Challenges, and Future Directions / Di Wu, Ao Zheng, Wenshuai Yu [et al.] // Directions. Applied Sciences. – 2025. – № 15. – P. 1911. – DOI: 10.3390/app15041911. – URL: https://www.researchgate.net/publication/388925463_Digital_Twin_Technology_in_Transportation_Infrastructure_A_Comprehensive_Survey_of_Current_Applications_Challenges_and_Future_Directions (дата обращения: 10.10.2025).
- 15 The Potential for Digital Twin Applications in Railway Infrastructure Management/ G. Doubell, K. Kruger, A. Basson, P. Conradie. – 2022. – DOI: 10.1007/978-3-030-96794-9_22. – URL: https://www.researchgate.net/publication/359487775_The_Potential_for_Digital_Twin_Applications_in_Railway_Infrastructure_Management (date of access: 10.10.2025).
- 16 Имитационные модели в цифровых двойниках железнодорожных узлов / А. Н. Рахмангулов, С. Н. Корнилов, П. Н. Мишкурин, Д. В. Александрин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3(55). – С. 43–59. – DOI: 10.20291/2079-0392-2022-3-43-59. – EDN HHJEEV. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_49939838_29806649.pdf (дата обращения: 10.10.2025).
- 17 Digital Twin for Railway: A Comprehensive Survey / S. Ghaboura, R. Ferdousi, F. Laamarti [et al.] // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 120237–120257. – DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3327042. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10292659/references> (date of access: 10.10.2025).
- 18 Towards AI-assisted digital twins for smart railways: preliminary guideline and reference architecture / L. De Donato,

R. Dirnfeld, A. Somma [et al.] / J Reliable Intell Environ. – 2003. – № 9. – P. 303–317. – URL: <https://doi.org/10.1007/s40860-023-00208-6> (date of access: 10.10.2025).

19 RailTwin: A Digital Twin Framework For Railway / R. Ferdousi, F. Laamarti, C. Yang, A. El Saddik // IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. – 2022. – Vol. 2022-August – P. 1767–1772. 10.1109/CASE49997.2022.9926529. – URL: https://www.researchgate.net/publication/365104731_RailTwin_A_Digital_Twin_Framework_For_Railway (дата обращения: 12.10.2025).

20 Predictive maintenance for switch machine based on digital twins // Information / J. Yang, Y. Sun, Y. Cao [et al.] // Information. – 2021. – № 12(11). – P. 485. – DOI: 10.3390/info12110485. – URL: https://www.researchgate.net/publication/356676184_Predictive_Maintenance_for_Switch_Machine_Based_on_Digital_Twins (date of access: 12.10.2025).

21 **Werbińska-Wojciechowska, S.** Digital Twin Approach for Operation and Maintenance of Transportation System—Systematic Review / S. Werbińska-Wojciechowska, R. Giel, K. Winiarska // Italian National Conference on Sensors. – 2024. – № 24. – P. 6069. – URL: <https://www.preprints.org/manuscript/202408.0264> (date of access: 10.10.2025).

22 **Mangan, T.** How Digital Twin Technology is Helping Build a Smart Railway System in Italy/ T. Mangan. – URL: <https://www.nutanix.com/theforecastbynutanix/industry/how-digital-twin-technology-is-helping-build-a-smart-railway-system-in-italy> (date of access: 12.10.2025).

23 **Шевченко, Д. В.** Методология построения цифровых двойников на железнодорожном транспорте / Д. В. Шевченко // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2021. – Т. 80, № 2. – С. 91–99. – URL: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2021-80-2-91-99> (дата обращения: 13.10.2025).

25 Цифровой двойник: концепция, уровни, связь с Интернетом вещей и роль численного и системного моделирования // Журнал «САПР и графика» 7-2020. – URL: <https://sapr.ru/article/26079> (дата обращения: 13.10.2025).

26 Цифровые двойники для прогнозирования отказов механизмов. – URL: <https://inner.su/articles/tsifrovye-dvoyniki-dlya-prognozirovaniya-otkazov-mekhanizmov/> (дата обращения: 10.10.2025).

27 Global Railway Digital Twin Market Research Report: Forecast (2024–2030) // ICT & Electronics, Apr. 2024. – URL: <https://www.marknteladvisors.com/research-library/railway-digital-twin-market.html> (date of access: 13.10.2025).

Получено 18.10.2025

A. A. Erofeev, D. V. Lyapovov. Theoretical approaches to the formation of digital doubles of railway sections.

The article describes theoretical approaches to the formation of a digital twin of a railway section. The definitions of digital doubles are analyzed and the tasks that the digital twin of the railway section solves are highlighted. The characteristics, types and structure of digital twins are considered. The aspects of the introduction and application of digital twins in the railway industry are described. A model for creating and implementing a digital twin of a railway section is presented and the directions of future research related to the analysis of technical and technological parameters of railway track infrastructure facilities affecting the organization of the transportation process are outlined.