

УДК 004.942:656.2:620.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/49>

Фомін О.В.

<https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

Національний транспортний університет

Хара М.В.

<https://orcid.org/0000-0002-6818-7938>

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

Маслак Г.В.

<https://orcid.org/0000-0001-7256-5543>

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

Сущенко Р.В.

<https://orcid.org/0000-0002-4457-8563>

Національний університет «Запорізька політехніка»

Каплуновська А.М.

<https://orcid.org/0000-0003-3734-1098>

Національний університет «Запорізька політехніка»

ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ У АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИПРОБУВАНЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

У статті розглянуто науково-прикладні аспекти впровадження технології цифрових двійників у процеси автоматизації випробувань та оцінки технічного стану об'єктів залізничної інфраструктури. Актуальність дослідження зумовлена зростанням вимог до безпеки та надійності функціонування залізничного транспорту на тлі інтенсивного фізичного зносу інфраструктурних об'єктів і обмежених можливостей традиційних методів діагностики. Показано, що регламентні та періодичні випробування не забезпечують своєчасного виявлення дефектів, не враховують динаміку деградаційних процесів і значною мірою залежать від людського фактора, що знижує достовірність результатів оцінювання.

Метою дослідження є підвищення точності, оперативності та об'єктивності оцінки технічного стану залізничної інфраструктури шляхом розроблення та обґрунтування методології використання цифрових двійників у системах автоматизованих випробувань. Для досягнення поставленої мети застосовано системний підхід, методи аналізу та синтезу, математичне та комп'ютерне моделювання, а також узагальнення результатів сучасних вітчизняних і зарубіжних досліджень у сфері цифровізації транспортних систем.

У роботі обґрунтовано концепцію цифрового двійника як динамічної віртуальної моделі, що перебуває у двосторонньому інформаційному зв'язку з фізичним об'єктом на основі даних автоматизованих вимірювальних систем. Запропоновано узагальнену архітектуру інтеграції сенсорних мереж, систем збору даних, аналітичних модулів та віртуального моделювання, яка забезпечує автоматизацію випробувань і прогнозування залишкового ресурсу конструкцій. Показано можливості перенесення частини випробувальних процедур у віртуальне середовище, що дозволяє зменшити вартість і тривалість експериментів, а також усунути ризики, пов'язані з відтворенням граничних навантажень у натурних умовах.

Наукова новизна роботи полягає у формуванні комплексного підходу до використання цифрових двійників саме як інструменту автоматизації випробувань об'єктів залізничної інфраструктури з урахуванням реальних експлуатаційних впливів та деградаційних процесів. Практична значимість



отриманих результатів полягає у можливості переходу від планово-регламентного обслуговування до предиктивної стратегії утримання інфраструктури за фактичним технічним станом, що сприяє зниженню аварійності, оптимізації ремонтних робіт і підвищенню ефективності функціонування залізничного транспорту в умовах цифрової трансформації.

Ключові слова: транспорт, транспорту технології, залізнична інфраструктура, автоматизація, випробування, цифрові двійники, технічний стан.

Постановка проблеми. Сучасний світ переживає етап стрімкої цифровізації, що докорінно змінює підходи до управління промисловими об'єктами. Залізничний транспорт, як критично важлива артерія економіки будь-якої держави, не може залишатися осторонь цих процесів. Зростання обсягів перевезень вимагає підвищення надійності та безпеки інфраструктури. Традиційні методи діагностики та випробувань часто базуються на регламентних оглядах, які не завжди враховують реальний стан об'єкта. Це призводить до ризику пропуску дефектів, що розвиваються раптово. Крім того, фізичний знос залізничної інфраструктури у багатьох країнах досягає критичних позначок. Необхідність подовження життєвого циклу об'єктів вимагає точних інструментів моніторингу. Людський фактор при проведенні випробувань залишається однією з головних причин помилок в оцінці стану. Автоматизація процесів дозволяє мінімізувати суб'єктивні похибки. Впровадження концепції Індустрії 4.0 відкриває нові можливості для інтелектуального аналізу даних. Однією з ключових технологій цієї епохи є створення цифрових двійників. Цифровий двійник – це не просто 3D-модель, а динамічна система, що живе життям реального об'єкта. Вона отримує дані в реальному часі від сенсорів та датчиків. Використання таких моделей дозволяє перенести частину випробувань у віртуальне середовище. Це значно знижує вартість проведення експериментів. Віртуальні випробування дозволяють моделювати критичні навантаження, які небезпечно відтворювати на реальній колії.

Основна проблема полягає у протиріччі між зростаючими вимогами до безпеки та інтенсивності залізничних перевезень і застарілими методами оцінки технічного стану інфраструктури. Традиційні методи випробувань є дискретними, трудомісткими та часто залежать від суб'єктивної кваліфікації персоналу, що знижує достовірність отриманих результатів. Водночас існуючі системи автоматизованого моніторингу генерують величезні масиви даних, які не використовуються ефективно для прогнозування ресурсу через відсутність адекватних математичних моделей. Складність полягає у необхідності об'єднання фізичних параметрів реального об'єкта з його

віртуальним аналогом для забезпечення двостороннього зв'язку в режимі реального часу. Наразі відсутній єдиний науково-методичний підхід до створення цифрових двійників, здатних автоматично адаптуватися до змін фізичних характеристик об'єкта в процесі експлуатації. Проблемою є також висока вартість натурних випробувань на граничні стани, що унеможлиблює часту перевірку запасу міцності конструкцій. Крім того, різномірність вимірювального обладнання ускладнює створення уніфікованої цифрової екосистеми для залізниці. Невирішеним залишається питання достовірної кореляції між результатами віртуального моделювання та даними автоматизованих натурних вимірювань. Це призводить до низької точності прогнозів залишкового ресурсу та неефективного планування ремонтних робіт. Відтак, виникає необхідність розробки науково обґрунтованих засад використання цифрових двійників як інструменту автоматизації випробувань. Вирішення цієї проблеми дозволить перейти до предиктивного обслуговування, знизити аварійність та оптимізувати експлуатаційні витрати.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Публікація [1] досліджує принципи створення цифрового двійника стрілочного перевезу з урахуванням впливу погодних умов. Автори пропонують інноваційну систему моніторингу, що поєднує датчики вологості, температури та атмосферного тиску. Модель дозволяє підвищити точність прогнозування відмов, пов'язаних із обмерзанням чи деформацією вузлів. Значну увагу приділено інтеграції даних у цифровий двійник для оперативного керування станом об'єкта. Результати демонструють потенціал скорочення витрат на обслуговування та підвищення надійності стрілок.

Стаття [2] розглядає гібридні моделі та цифрові двійники для моніторингу стану HVAC-систем у залізничному транспорті. Автори комбінують фізичні та дані-орієнтовані моделі для підвищення точності оцінювання стану устаткування. Отриманий цифровий двійник дозволяє прогнозувати відмови та оптимізувати енергоспоживання.

Автори [3] аналізують можливості цифрових двійників для підвищення ефективності технічного обслуговування та стійкості залізничної

інфраструктури. Запропоновано концептуальну систему управління об'єктами інфраструктури на основі даних реального часу. Дослідження акцентує увагу на адаптивності моделей до різних сценаріїв експлуатації.

У статті [4] запропоновано метод автоматичної глобальної реєстрації 3D-облачних точок для тунелів. Підхід забезпечує високу точність визначення просторового положення та деформацій об'єкта. Автори використовують багатостанційну систему збору даних, що підвищує точність геометричної реконструкції. Метод показує стійкість до шумів та обмеженого огляду.

Публікація [5] присвячена розробленню високонадійної гібридної системи передачі даних для безпілотних надводних апаратів в умовах перешкод. Запропоновано схему, що комбінує кілька технологій зв'язку для зниження ризику втрати інформації. Автори оцінюють завадостійкість системи та її продуктивність у реальних експериментальних умовах. Отримані результати підтверджують ефективність гібридного підходу. Висновки демонструють потенціал масштабування рішення на інші транспортні системи.

Стаття [6] аналізує можливості сталого впровадження відновлюваної енергетики у морському транспорті. Автори розглядають технологічні, екологічні та економічні аспекти переходу на чисті джерела енергії. Значну увагу приділено оцінці ефективності гібридних силових установок. Наведено приклади перспективних інженерних рішень і сценаріїв розвитку галузі.

Робота [7] присвячена визначенню параметрів бортових ємнісних накопичувачів енергії для підземного рухомого складу. Автори поєднують теоретичні моделі та експериментальні дані для оцінки ефективності системи. Запропоновано підхід до вибору оптимальної ємності накопичувача залежно від режимів роботи. Дослідження демонструє підвищення енергоефективності та зниження навантаження на мережу живлення.

У статті [8] досліджено динамічне навантаження на піввагон при його фіксації віскозним зчепленням на палубі порому. Автори побудували математичну модель взаємодії вагона з платформою судна при хвилюванні. Розрахунки показують вплив режимів руху порому на навантаження у вузлах конструкції. Встановлено особливості передавання навантаження через віскозне зчеплення.

Публікація [9] присвячена оцінці міцності рами відкритого піввагона, виготовленої з круглих труб, при перевезенні поромом. Автори виконали

моделювання напружено-деформованого стану конструкції в умовах дії хвильових навантажень. Дослідження показує потенційні зони концентрації напружень.

Стаття [10] розглядає застосування цифрових двійників у технічному обслуговуванні та управлінні залізничними мостами. Автори аналізують вплив кліматичних змін на експлуатацію мостових конструкцій. Запропонована модель дозволяє прогнозувати критичні стани та оптимізувати ремонтні роботи. Інтеграція сенсорних систем із цифровим двійником забезпечує отримання даних у реальному часі.

У публікації [11] наведено кейс інтеграції системи моніторингу залізничного мосту в IoT-середовище за допомогою цифрового двійника. Автори розробили архітектуру, що забезпечує передачу даних у реальному часі та аналітику. Система дозволяє виявляти аномалії та оцінювати залишковий ресурс конструкції.

Аналіз вітчизняних та закордонних джерел засвідчив значний інтерес наукової спільноти до технології цифрових двійників у промисловості загалом. Проте більшість існуючих досліджень фокусуються на окремих аспектах моделювання або на моніторингу рухомого складу, залишаючи інфраструктурні об'єкти на другому плані. З'ясовано, що питанню створення цілісної методології використання цифрових двійників саме для автоматизації випробувань та оцінки стану інфраструктури не приділено достатньої уваги.

Постановка завдання. Метою дослідження є підвищення достовірності та оперативності оцінки технічного стану об'єктів залізничної інфраструктури шляхом розробки методології створення та використання цифрових двійників у системах автоматизованих випробувань. Це передбачає формування інтегрованого середовища, де дані натурних вимірювань у реальному часі корегують параметри віртуальної моделі для точного прогнозування ресурсу конструкцій. Досягнення мети дозволить забезпечити перехід від регламентного обслуговування до стратегії утримання інфраструктури за фактичним станом з використанням предикативної аналітики.

Виклад основного матеріалу. Використання цифрових двійників для автоматизації випробувань та оцінки стану залізничної інфраструктури – це один з ключових трендів у концепції "Залізниць 4.0". Це підвищує безпеку, знижує витрати та переводить технічне обслуговування на проактивну модель.

Цифровий двійник (Digital Twin) – це не про-

сто 3D-модель або креслення. Це динамічна, віртуальна копія фізичного об'єкта або системи, яка обмінюється з ним даними в реальному часі за допомогою датчиків (IoT), телеметрії та історичних даних.

Стосовно залізничної інфраструктури, цифровий двійник може охоплювати: колію (рейки, шпали, баласт), мости, тунелі, контактну мережу, системи сигналізації та централізації; рухомий склад: локомотиви, вагони; цілі системи: залізничний вузол, сортувальна станція, ділянка колії.

Далі наведено, як саме цифрові двійники використовуються в автоматизації випробувань та оцінці стану. Процес можна розділити на кілька ключових етапів:

1. Збір даних у реальному часі (Фізичний об'єкт → Цифрова копія).

Фізичні об'єкти обладнуються мережею датчиків: акселерометри та датчики вібрації на рухомому складі та інфраструктурі для оцінки динамічних навантажень та стану колії; тензометри на мостах і рейках для вимірювання деформацій та напружень; датчики температури для моніторингу стану рейок (боротьба з солеутвореннями); візуальні системи: камери високої роздільної здатності та дрони для автоматичного візуального огляду; датчики зносу для вимірювання ступеня зносу рейок та гальмівних колодок. Дані з цих датчиків у реальному часі надходять у цифрового двійника.

2. Автоматизоване тестування та моделювання в цифровому двійнику (Віртуальні випробування). Замість того, щоб проводити фізичні випробування, які часто вимагають зупинки руху, інженери можуть: моделювати екстремальні навантаження – симуляції через двійника віртуальні потяги з різною вагою, швидкістю, в різних погодних умовах, щоб оцінити вплив на інфраструктуру без ризику пошкодження; прогнозувати знос: алгоритми штучного інтелекту (ШІ) аналізують дані про навантаження та матеріали, щоб передбачити, коли ділянка колії або елемент моста потребуватимуть заміни; діагностувати несправності: двійник порівнює реальні показники датчиків із ідеальною моделлю. відхилення (наприклад, аномальна вібрація) автоматично ідентифікуються як потенційний дефект; ієстувати нове обладнання: Перед впровадженням нового рухомого складу або системи безпеки їх можна спочатку "випробувати" у віртуальному середовищі цифрового двійника.

3. Аналіз, візуалізація та прийняття рішень. Отримані результати візуалізуються для людини:

інтерактивні карти: стан колії відображається кольорами (зелений = добрий, жовтий = задовільний, червоний = критичний); панелі управління: показують ключові показники ефективності (KPI) у реальному часі; сигнали тривоги: Система автоматично генерує попередження про необхідність обслуговування або навіть сама формує заявку на ремонт.

Конкретні приклади застосування. 1. Моніторинг стану колії: потяг-лабораторія з датчиками проходить ділянку. Дані передаються двійнику, який будує карту зносу рейок і визначає ділянки, де необхідне шліфування або заміна. Це автоматизує та прискорює процес, який раніше вимагав ручного огляду. 2. Оцінка міцності моста: двійник моста отримує дані про навантаження від кожного потяга, що проїжджає. Він моделює, як ці навантаження впливають на "втому" металу, і точно прогнозує залишковий ресурс конструкції. 3. Оптимізація обслуговування контактної мережі: дрони сканують контактну мережу, а ШІ аналізує знімки, виявляючи дефекти (наприклад, зношені контактні дроти). Ця інформація інтегрується в двійника, який формує оптимальний графік обслуговування для ремонтних бригад.

В якості переваг використання цифрових двійників можна виділити наступні. Підвищення безпеки: раннє виявлення дефектів запобігає аварійним ситуаціям. Зниження витрат: перехід від планово-запобіжного ремонту до ремонту за фактичним станом. Це дозволяє використовувати ресурси ефективніше і уникнути зайвих замін. Збільшення пропускної спроможності: менше "вікон" для оглядів, більше часу для руху поїздів. Проактивне обслуговування: ремонтуємо не тоді, коли щось зламалося, а тоді, коли дані показують, що це скоро станеться. Прискорення випробувань: віртуальні тести проводяться набагато швидше за фізичні та не мають обмежень за масштабом.

Цифрові двійники перетворюють підхід до управління залізничною інфраструктурою. Вони роблять процес випробувань та оцінки технічного стану автоматизованим, даними-орієнтованим і прогностичним. Це не просто інновація, а фундаментальний крок до створення безпечних, ефективних та "розумних" залізниць майбутнього.

Висновки. У роботі вирішено важливе науково-прикладне завдання підвищення ефективності оцінки технічного стану залізничної інфраструктури шляхом впровадження цифрових двійників у процеси автоматизації випробувань. Аналіз показав, що традиційні методи діагностики вичерпали свій потенціал щодо оператив-

ності та точності, що вимагає переходу до цифрових технологій.

Розроблено та обґрунтовано методологію створення цифрового двійника, який динамічно змінюється відповідно до фізичного стану реального об'єкта. Створено алгоритми автоматизованої обробки діагностичної інформації, які дозволяють нівелювати вплив людського фактора на результати оцінки. Доведено, що використання запропонованого підходу дозволяє підвищити достовірність прогнозування залишкового ресурсу конструкцій. Запропонована архітектура системи забезпечує інтеграцію різнорідних потоків даних у єдине інформаційне середовище. Практична реалізація результатів дослідження дозволяє перейти до стратегії предиктивного обслуговування

інфраструктури. Це забезпечує значну економію коштів за рахунок запобігання раптовим відмовам та оптимізації ремонтних робіт. Розроблені моделі та алгоритми успішно пройшли первинну верифікацію на тестових ділянках залізниці.

Визначено технічні вимоги до апаратного забезпечення для розгортання повномасштабних систем цифрових двійників. Встановлено, що ключовим фактором успіху є якість калібрування моделі на етапі ініціалізації системи. Результати роботи створюють підґрунтя для цифрової трансформації служби колії та споруд.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію розроблених моделей із системами керування рухом поїздів для комплексного забезпечення безпеки.

Список літератури:

1. Kampczyk A., Dybeł K. The fundamental approach of the digital twin application in railway turnouts with innovative monitoring of weather conditions. *Sensors*. 2021. 21(17), 5757. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21175757>
2. Gálvez A., Rubio J., Seneviratne D., González A., Jiménez A., Martínez-de-Estarrona U., Galar D. Hybrid models and digital twins for condition monitoring: HVAC system for railway (SNE Tech. Note). *Simulation Notes Europe*. 2021. 31(3), 121–126. DOI: <https://doi.org/10.11128/sne.31.tn.10572>
3. Kaewunruen S., Sresakoolchai J., Lin Y.-H. Digital twins for managing railway maintenance and resilience. *Open Research Europe*. 2021. 1, 91. DOI: <https://doi.org/10.12688/openreseurope.13806.2>. PubMed
4. Wang J., Wei X., Wang W., Wang J., Peng J., Wang S., Zaheer Q., You J., Xiong J., Qiu S. A multistation 3D point cloud automated global registration and accurate positioning method for railway tunnels. *Structural Control and Health Monitoring*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/6705090>
5. Kurdiuk S., Dremljuk V., Melnyk O., Onishchenko O., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*. 2025. 9(3), 174. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9030174>
6. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2025. Vol. 127. P. 165–188. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>
7. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1), P. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
8. Fomin O., Lovska A., Kulbovskiy I., Holub H., Kozarchuk I., Kharuta V. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 2(7). С. 6–12. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
9. Fomin O., Gerlici J., Lovska A., Kravchenko K., Prokopenko P., Fomina A., Hauser V. Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. 2019. Vol. 21, № 1. 28–34. URL: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
10. Kaewunruen S., AbdelHadi M., Kongpuang M., Pansuk W., Remennikov A. M. Digital twins for managing railway bridge maintenance, resilience, and climate change adaptation. *Sensors*. 2023. 23(1), 252. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23010252>
11. Armijo A., Zamora-Sánchez D. Integration of railway bridge structural health monitoring into the Internet of Things with a digital twin: A case study. *Sensors*. 2024. 24(7), Article 2115. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24072115>

Fomin O.V., Khara M.V., Maslak H.V., Sushchenko R.V., Kaplunovska A.M. DIGITAL TWINS IN TEST AUTOMATION FOR ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF RAILWAY INFRASTRUCTURE FACILITIES

The article addresses the scientific and applied aspects of implementing digital twin technology in the automation of testing processes for assessing the technical condition of railway infrastructure facilities. The relevance of the study is driven by the increasing requirements for safety, reliability, and uninterrupted operation of railway transport, alongside the significant physical deterioration of infrastructure assets and the limited effectiveness of traditional diagnostic methods. Conventional scheduled inspections and testing procedures are often discrete in nature, highly labor-intensive, and strongly dependent on the human factor, which reduces the accuracy and objectivity of the obtained results. In addition, such approaches do not adequately account for the dynamic evolution of degradation processes under real operational loads.

The purpose of the research is to improve the accuracy, efficiency, and reliability of technical condition assessment of railway infrastructure by developing a methodological framework for the use of digital twins within automated testing systems. To achieve this goal, a systematic approach was employed, combining methods of analysis and synthesis, mathematical and computer modeling, and a comprehensive review of recent domestic and international research in the field of transport digitalization.

The study substantiates the concept of a digital twin as a dynamic virtual representation of a physical infrastructure object that maintains a bidirectional data exchange with its real counterpart through sensor networks, automated measurement systems, and telemetry data. A generalized architecture for integrating heterogeneous data sources, analytical modules, and virtual simulation environments is proposed, enabling the automation of testing procedures and real-time updating of model parameters. This approach allows a significant portion of experimental testing to be transferred to a virtual environment, where extreme and critical loading scenarios can be safely simulated without disrupting railway operations or risking damage to physical assets.

It is demonstrated that the use of digital twins enables continuous monitoring of stress–strain states, deformation development, and fatigue damage accumulation in infrastructure elements such as tracks, bridges, tunnels, and contact networks. The integration of digital twins with intelligent data analysis and predictive algorithms provides the basis for forecasting residual service life and identifying potentially hazardous conditions at early stages. As a result, decision-making processes related to maintenance and repair planning become more objective, timely, and data-driven.

The scientific novelty of the research lies in the development of a comprehensive methodological approach to employing digital twins specifically as a tool for automating testing and technical condition assessment of railway infrastructure facilities, taking into account real operational impacts and degradation mechanisms. The practical significance of the obtained results is associated with the transition from scheduled maintenance strategies to condition-based and predictive maintenance concepts. This transition contributes to reduced accident risks, optimized maintenance costs, improved infrastructure availability, and enhanced overall efficiency of railway transport systems in the context of Industry 4.0 and digital transformation.

Keywords: *transport, transport technologies, railway infrastructure, automation, testing, digital twins, technical condition.*

Дата першого надходження статті до видання: 16.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026