

5. Mohanraj E., Eniyavan N., Sidarth S., Sridharan S. Digital Twins for Automotive Predictive Maintenance. International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), Lalitpur, Nepal, 2024, 1579-1584, doi: 10.1109/ICICT60155.2024.10544392.

6. Le T.V., Hsu C.L. A systematic literature review of blockchain technology: Security properties, applications and challenges. J Internet Technol, 2021, 22(4), 789-802. <https://doi.org/10.53106/160792642021072204007>.

7. Panchyshyn S., Krupka I., Pushkar T. On the use of modern inventory management methods in international business. Social Development: Economic and Legal Issues, 2025, 3. <https://doi.org/10.70651/3083-6018/2025.3.16>.

8. Кашканов А.А., Москалюк М.Л. Методи обґрунтування запасів запасних частин у системі управління транспортним процесом. Вісник машинобудування та транспорту, 2024, 1(19), 68-74. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-68-74>.

**УДК 656.025.4:004.94**

## **ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ У РОЗУМНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ**

**Никончук Вікторія Миколаївна**, д.е.н., професор, професор кафедри ТТіТС, Національний університет водного господарства і природокористування, м. Рівне, e-mail: [v.m.nykonchuk@nuwm.edu.ua](mailto:v.m.nykonchuk@nuwm.edu.ua); ORCID:0000-0001-7515-6016

**Никончук Софія Андріївна** – бакалавр Національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, e-mail: [sofiia.nykonchuk@kname.edu.ua](mailto:sofiia.nykonchuk@kname.edu.ua)

У сучасних умовах цифрової трансформації транспортна галузь потребує впровадження інновацій, які забезпечують ефективність, безпеку та сталість розвитку. Одним із таких рішень є технологія цифрових двійників (Digital Twin) — інтегрована цифрова модель фізичного об'єкта, системи або процесу, що відображає його функціонування у реальному часі.

Для транспортного сектору цифрові двійники відкривають можливості моделювання динаміки руху, прогнозування заторів, ефективного управління інфраструктурою та зменшення екологічного навантаження, що робить їх впровадження актуальним у контексті адаптації транспортної системи України до стандартів розумних міст (Smart City) та інтеграції в європейський цифровий простір.

Тому метою роботи є дослідити можливості застосування цифрових двійників у розумних транспортних системах для підвищення ефективності управління транспортними потоками та логістичними процесами.

Об'єктом дослідження є транспортна інфраструктура міських і міжміських мереж, а також логістичні процеси, що можуть бути моделюванні та оптимізовані за допомогою цифрових двійників.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розкрити сутність поняття «цифровий двійник» та принцип його функціонування;
- проаналізувати приклади застосування цифрових двійників у транспорті та логістиці;
- визначити переваги та обмеження цієї технології для українських міст;
- окреслити перспективи розвитку цифрових двійників у сфері транспортних технологій.

Поняття Digital Twin має різні трактування у науковій літературі, однак усі вони підкреслюють взаємозв'язок між фізичним і віртуальним об'єктами [3].

Згідно з Grieves (2003), який уперше ввів цей термін, цифровий двійник — це віртуальне представлення фізичного об'єкта, що відтворює його поведінку на основі реальних даних. Саме він запропонував концепцію «Digital Twin Prototype – Digital Twin Instance – Digital Twin Aggregate» [2].

Тао F. (2018) визначають цифровий двійник як інтеграцію фізичного об'єкта, його віртуальної моделі та зв'язку даних між ними, що забезпечує моніторинг, аналіз і прогнозування стану системи в реальному часі [3].

За визначенням Kritzinger W. (2018), цифровий двійник — це цифрове відображення реального об'єкта, яке взаємодіє з ним за допомогою двостороннього обміну даними, на відміну від простої цифрової моделі, що не має такого зв'язку [4].

Гао (2025) підкреслюють, що цифровий двійник — це високодеталізована симуляційна модель, яка оновлюється даними в реальному часі, що дозволяє прогнозувати поведінку об'єкта та оптимізувати його роботу.

На думку Fraunhofer IML (2024), цифровий двійник — це ключовий елемент цифрової трансформації, який об'єднує інтернет речей, аналітику великих даних та штучний інтелект для створення інтегрованого уявлення про об'єкт або систему [5].

У загальному вигляді цифровий двійник — це інтегрована цифрова модель фізичного об'єкта, системи або процесу, що відображає його функціонування, властивості та стан у режимі реального часу (Рис.1).



Рисунок 1 – Взаємодія між фізичним об'єктом і його цифровим двійником

Така схема демонструє двонаправлений обмін даними, який забезпечує адаптивність та точність моделі в режимі реального часу. Модель постійно оновлюється завдяки даним із сенсорів, GPS-систем, супутників та IoT-пристроїв, що забезпечує можливість моніторингу, прогнозування та оптимізації експлуатаційних характеристик.

У контексті розвитку «розумних міст» цифровий двійник можна розглядати як розвинуте цифрове відображення історичної та поточної поведінки реального об'єкта або процесу в міському середовищі, яке сприяє підвищенню ефективності управління інфраструктурою, зменшенню ресурсних витрат і поліпшенню якості міських послуг [1].

Отримані дані формують динамічний часовий профіль об'єкта, який відображається у вигляді цифрової моделі. Така модель забезпечує зворотний зв'язок із фізичним об'єктом, що дозволяє оперативно коригувати параметри, вдосконалювати дизайн або змінювати технологічний процес.

На відміну від традиційних CAD-систем або рішень на базі IoT, цифровий двійник є комплексною інтерактивною системою, яка враховує взаємозв'язки між усіма компонентами й етапами життєвого циклу об'єкта. Якщо CAD-системи існують лише у віртуальному середовищі, а IoT лише фіксує дані, то цифровий двійник поєднує обидва підходи, створюючи цілісну аналітичну платформу [2].

Завдяки інтерактивності між цифровою моделлю та реальним середовищем, технологія цифрових двійників забезпечує реалістичні, повні й оперативні дані для прийняття ефективних управлінських рішень у транспортних системах.

Активна цифровізація міських процесів створює умови для впровадження інноваційних технологій, серед яких ключову роль відіграє саме концепція цифрового двійника. Вона дозволяє створити віртуальну копію фізичної транспортної або міської інфраструктури, що функціонує в режимі реального часу та сприяє оптимізації управління, планування та прогнозування.

До недавнього часу реалізація таких рішень була обмежена через високі витрати на обробку даних і недостатню пропускну здатність мереж. Проте розвиток хмарних обчислень, аналітики Big Data та штучного інтелекту зробив можливим масштабне впровадження цифрових двійників у транспортному секторі.

Створення цифрового двійника охоплює весь життєвий цикл об'єкта — проєктування, розроблення, експлуатацію. Така комплексна модель дозволяє зрозуміти не лише технічні параметри, а й взаємозв'язки між технологічними, економічними та соціальними аспектами функціонування міста.

Основні переваги впровадження ЦД для органів місцевого самоврядування і транспортних компаній:

- підвищення швидкості впровадження інновацій;
- оптимізація технологічних і бізнес-процесів;
- зменшення кількості технічних дефектів і аварій;
- удосконалення управління якістю міських послуг;

– створення нових бізнес-моделей та підвищення доходів від транспортних сервісів.

Технологія цифрових двійників дедалі ширше впроваджується у транспортній галузі, сприяючи підвищенню ефективності, безпеки та екологічності транспортних процесів.

У міському транспорті цифрові двійники використовуються для прогнозування заторів і дорожніх аварій, управління світлофорами на основі даних у реальному часі та оптимізації маршрутів громадського транспорту. Завдяки цьому підвищується пропускна здатність вулиць, зменшуються затримки та покращується якість транспортного обслуговування населення.

У сфері логістики цифрові двійники дозволяють створювати детальні цифрові моделі складів і ланцюгів постачання, здійснювати динамічне планування маршрутів вантажів, знижувати час простою транспортних засобів і мінімізувати витрати на перевезення. Це сприяє підвищенню точності постачань і раціональному використанню ресурсів. В галузі автомобілебудування цифрові двійники застосовуються для моделювання роботи систем безпеки, прогнозування технічних несправностей та віртуального тестування нових моделей транспортних засобів. Такі компанії, як *Volvo*, *BMW* та *Tesla*, активно використовують цю технологію для вдосконалення конструкцій автомобілів, підвищення рівня надійності та зменшення вартості розробки.

Перші пілотні ініціативи цифрового моделювання транспортних мереж з'явилися на початку 2000-х років у великих містах Європи та США. Вони полягали у створенні комп'ютерних моделей окремих вулиць, перехресть та транспортних потоків для тестування різних сценаріїв організації руху. Основною метою було оцінити ефективність світлофорів, рух громадського транспорту, уникнути заторів та оптимізувати маршрути вантажного і пасажирського транспорту без втручання у реальний рух. Пілотні проекти дозволили зібрати дані про поведінку водіїв і пасажирів, перевірити нові транспортні рішення та закласти основу для подальшого розвитку цифрових двійників транспортної інфраструктури.

В Україні перші пілотні проекти цифрового моделювання транспортних мереж з'явилися у великих містах, таких як Київ, Львів та Харків, на початку 2010-х років. Вони полягали у створенні комп'ютерних моделей окремих вулиць, перехресть і транспортних потоків для аналізу роботи світлофорів, оптимізації маршрутів громадського транспорту та зменшення заторів. Ці проекти дозволяли тестувати різні сценарії організації руху без втручання в реальний трафік, оцінювати ефективність транспортної інфраструктури та закладати основу для впровадження сучасних систем “розумного міста” в Україні [7, 8].

Таким чином, цифрові двійники вже активно використовуються у різних сферах транспортного сектору — від управління міським рухом і логістикою до автомобілебудування. Водночас розвиток цієї технології є результатом тривалого процесу еволюції, який почався з концепції управління життєвим циклом продукту і поступово розширився на промисловість, логістику та

розумні міста [4, 5]. Таблиця 1 відображає ключові етапи виникнення та розвитку цифрових двійників, демонструючи їх впровадження у світовій практиці та сучасні тенденції.

Таблиця 1 – Динаміка впровадження цифрових двійників у транспортній галузі

Період	Події та розвиток	Приклади / Застосування	Основні характеристики
1	2	3	4
2003	Виникнення концепції Digital Twin	Grieves M. – управління життєвим циклом продукту	Віртуальна копія фізичного об'єкта, моніторинг і прогнозування стану, прототип для PLM
2010–2015	Початок промислового впровадження	GE, Siemens	Моніторинг обладнання, планування обслуговування, локальні цифрові моделі, підвищення надійності виробництва

Продовження таблиці 1

1	2	3	4
2015–2020	Масштабування у логістиці та транспорті	DHL, Maersk	Ланцюги постачання, транспорт, двосторонній обмін даними між фізичними та цифровими об'єктами
2020–2025	Інтеграція в Smart City, IoT, Big Data	Київ, Львів, Гельсінкі, Сінгапур	Прогнозування заторів і аварій, оптимізація маршрутів, інтеграція з IoT, аналітика великих даних
2025–далі (сучасний стан)	Сучасні цифрові двійники	Автомобілебудування (Volvo, BMW, Tesla), розумні міста	Повний життєвий цикл, мультидисциплінарні моделі, динамічне оновлення, самонавчання, оптимізація процесів, екологічність

Як видно з таблиці 1, застосування цифрових двійників набуває все більшої динаміки, охоплюючи не лише промисловість, а й транспортну інфраструктуру міст. Інтеграція цифрових двійників у міські транспортні системи дозволяє забезпечити точний моніторинг руху, прогнозування заторів та аварій, оптимізацію маршрутів громадського транспорту, а також ефективне управління логістичними процесами.

В Україні технологія цифрових двійників знаходиться на етапі пілотних впроваджень, проте її перспективи великі. Розвиток хмарних платформ,

аналітики великих даних та алгоритмів штучного інтелекту створює умови для масштабного впровадження ЦД у транспортну галузь, підвищуючи ефективність управління, зменшуючи витрати та екологічне навантаження.

Однак, попри очевидні переваги та потенціал, розвиток цифрових двійників в Україні наразі стикається з низкою бар'єрів, що стримують їх активне впровадження:

- висока вартість створення цифрових моделей і необхідного обладнання;
- відсутність єдиних стандартів цифровізації транспортної галузі;
- недостатній рівень цифрової грамотності фахівців;
- обмежений доступ до якісних і структурованих транспортних даних.

Попри зазначені труднощі, цифрові двійники залишаються однією з найперспективніших технологій для розвитку систем розумного транспорту та логістики. Вони забезпечують інтеграцію фізичних об'єктів із цифровими моделями, що дозволяє здійснювати моніторинг, аналіз і прогнозування транспортних процесів у реальному часі.

Отже, впровадження технології цифрових двійників відкриває можливості для більш ефективного управління транспортною інфраструктурою, скорочення витрат, зменшення негативного впливу на довкілля та підвищення якості міських послуг.

### Література

1) Никончук В. М., Хітров І. О., Пашкевич С. М., Кристопчук М. Є. Теорія та практика розвитку транспортної системи та об'єктів транспортної інфраструктури : монографія. Луцьк : Вежа-Друк, 2024. 172 с.

2) Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication : монографія. Florida : Florida Institute of Technology, 2003. 250 p.

3) Tao F., Cheng J., Zhang L. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art // IEEE Transactions on Industrial Informatics. — 2018. — Vol. 15, No. 4. — P. 2405–2415.

4) Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification // IFAC-PapersOnLine. — 2018. — Vol. 51, No. 11. — P. 1016–1022.

5) Digital Twin Consortium. Digital Twin Definition and Overview. — 2020. — URL: <https://www.digitaltwinconsortium.org/> (дата звернення: 13.10.2025).

6) Fraunhofer IML. Definition and Basics of the Digital Twin in Logistics. — Dortmund : Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics, 2024.

7) Ponomarev K., Kudryashov N., Popelnukha N. Main Principals and Issues of Digital Twin Development for Complex Technological Processes // Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium. — Vienna, Austria : DAAAM International, 2017. — P. 0523–0528. — ISBN 978-3-902734-11-2, ISSN 1726-9679.

8) Kingston Technology Corporation. The rise of the digital twin: The secret weapon to next level operations. — Kingston Technology Corporation, 2022. — URL: <https://media.kingston.com/kingston/pdf/ktc-blog-servers-and-data-centers-digital-twin-applications-organizations-success-ebook-ua.pdf> (дата звернення: 13.10.2025).