

УДК 656.1:004.932

JEL Classification: R41, O33, C63

DOI: <https://doi.org/10.64076/eecsr250831.03>

Цвірко О. О.,

д-р екон. наук, професор,
професор кафедри економіки,
маркетингу та бізнес-адміністрування,
Національний транспортний університет, м. Київ

Кореніцин О. С.,

аспірант кафедри економіки,
маркетингу та бізнес-адміністрування,
Національний транспортний університет, м. Київ

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У НЕСТАБІЛЬНИХ УМОВАХ

Сучасні міські транспортні системи перебувають під потужним впливом швидких змін зовнішнього середовища, які включають урбанізацію, зростання населення, зміни клімату, надзвичайні ситуації, а також соціально-економічні коливання. За прогнозами ООН, до 2050 року близько 68% світового населення буде мешкати у містах, що створює додатковий тиск на транспортну інфраструктуру. Традиційні методи планування перевезень, які базуються на статичних моделях та історичних даних, часто виявляються недостатньо гнучкими для швидкої реакції на раптові зміни у попиті або умовах руху [1]. У таких умовах критичною стає здатність транспортної системи оперативно адаптуватися, прогнозувати ризики та забезпечувати ефективне використання ресурсів.

Одним із перспективних рішень у цій сфері є застосування цифрових двійників – віртуальних моделей фізичних об'єктів або процесів, що відтворюють їхню поведінку та дозволяють проводити симуляції, прогнозування і оптимізацію в реальному часі. Сучасні цифрові двійники не лише відображають структуру транспортної мережі, а й здатні враховувати поведінку людей, погодні умови, події на дорогах та навіть соціальні чинники, наприклад активність користувачів у соціальних мережах, що впливає на пасажиропотоки [2].

Цифровий двійник транспортної системи збирає та обробляє дані з багатьох джерел: GPS-навігації, сенсорів на транспортних засобах, систем оплати проїзду, камер відеоспостереження, інформаційних сервісів про погоду, а також із соціальних мереж. Це дозволяє отримати комплексну картину роботи міської транспортної мережі, оцінювати завантаженість транспортних вузлів та прогнозувати вплив зовнішніх факторів на рух. Використання цифрового двійника зазвичай проходить кілька ключових етапів, характеристика яких представлена у таблиці 1.

Таблиця 1

Етапи використання цифрового двійника

Етап	Опис	Приклад застосування
1. Збір та інтеграція даних	Формування бази даних про транспортну мережу та пасажиропотоки	Сенсори на автобусах і GPS у Сінгапурі
2. Побудова віртуальної моделі	Моделювання інфраструктури, руху транспорту та пасажирів	Міський транспорт Стокгольма
3. Симуляція сценаріїв	Затори, аварії, погодні умови, масові заходи	Зливи в Генуї, масові заходи у Стокгольмі
4. Оптимізація	Коригування маршрутів, розкладів, ресурсів	Автобусні маршрути у Сеулі під час пікових навантажень
5. Валідація	Порівняння симуляцій з реальними даними для підвищення точності	Всі кейси для оцінки ефективності моделі

Джерело: розроблено авторами на основі [3].

Аналіз практичного застосування цифрових двійників у транспортних системах різних міст світу дозволяє виявити їхній вплив на ефективність пасажирських перевезень та оцінити переваги інтеграції таких технологій. Зокрема, цифрові двійники забезпечують прогнозування пасажиропотоків, оптимізацію маршрутів і графіків руху, підвищують безпеку перевезень і сприяють зменшенню навантаження на транспортну інфраструктуру. Вивчення конкретних кейсів дає змогу визначити ключові показники ефективності та ефекти впровадження цифрових моделей у реальних умовах міських транспортних мереж. У таблиці 2 наведені дані, які ілюструють практичні результати та ефекти застосування цифрових двійників у різних містах світу.

Таблиця 2

Практичні результати та ефект

Місто	Тип транспорту	Ключова метрика	Ефект застосування цифрового двійника
Сінгапур	Автобуси, метро	Пасажиропотік	Прогнозування пікових навантажень, коригування маршрутів у реальному часі
Генуя	Автобуси	Час у дорозі, перевантаження	Зменшення перевантаження на 12–15%, скорочення часу у дорозі на 10–12%
Стокгольм	Метро, автобуси	Рівномірність завантаження	Перенаправлення пасажиропотоків під час масових заходів, підвищення безпеки
Сеул	Міська мережа	CO ₂ , ефективність руху	Аналіз 50 000 точок, автоматична оптимізація маршрутів

Джерело: розроблено авторами на основі [4, 5, 6].

Сучасні дослідження вказують на інтеграцію цифрових двійників із штучним інтелектом (ШІ) для автоматичної оптимізації транспортних потоків та прогнозування аварійних ситуацій.

Отже, цифрові двійники є потужним інструментом управління міським транспортом у нестабільних умовах. Вони забезпечують прогнозування поведінки системи, оптимізацію маршрутів і графіків руху, підвищення адаптивності мережі та безпеки перевезень. У майбутньому поєднання цифрових двійників із ШІ та великими даними відкриває можливості для створення розумних транспортних екосистем на національному та міжнародному рівнях, де транспортні рішення будуть прийматися автоматично з урахуванням глобальних тенденцій та локальних потреб містян.

У сучасних умовах українські міські транспортні системи перебувають під значним тиском через урбанізацію, зростання населення та нестабільну соціально-економічну ситуацію. Міста, такі як Київ, Львів, Харків та Одеса, щодня стикаються з проблемами заторів, перевантаження громадського транспорту та низької ефективності перевезень. Традиційні методи планування руху на основі історичних даних та статичних моделей демонструють обмежену здатність до адаптації у випадку раптових змін у попиті або транспортних умовах. З огляду на сучасні виклики, включно з надзвичайними ситуаціями та кризами, стає критичною необхідність впровадження інноваційних рішень для підвищення ефективності управління міським транспортом [7].

Одним із перспективних інструментів у цьому контексті є цифрові двійники транспортної системи, які представляють собою віртуальні моделі фізичної інфраструктури та потоків пасажирів. Використання цифрових двійників дозволяє інтегрувати дані з різних джерел, включаючи GPS-навігацію, сенсори на транспортних засобах, системи оплати проїзду, камери відеоспостереження, метеорологічні сервіси та інформацію з мобільних додатків. Така комплексна інтеграція забезпечує можливість моделювання реальних сценаріїв, оцінки завантаженості транспортних вузлів та прогнозування впливу зовнішніх факторів на рух.

З наукової точки зору впровадження цифрових двійників в Україні є необхідним для досягнення декількох ключових цілей. По-перше, вони сприяють оптимізації маршрутів і графіків руху громадського транспорту, що зменшує час очікування пасажирів і підвищує ефективність перевезень. По-друге, цифрові двійники дозволяють прогнозувати пікові навантаження та вчасно коригувати рух транспорту під час надзвичайних ситуацій та масових заходів. По-третє, використання цифрових двійників сприяє зменшенню витрат пального та зниженню екологічного навантаження на міське середовище [8].

В Україні потенціал цифрових двійників залишається недостатньо реалізованим, проте їхнє впровадження має стратегічне значення для модернізації транспортної інфраструктури. Інтеграція цифрових двійників із алгоритмами штучного інтелекту дозволяє здійснювати автоматизовану оптимізацію транспортних потоків, підвищуючи адаптивність системи до нестабільних умов. Використання таких технологій створює передумови для формування розумних транспортних екосистем на національному рівні, здатних забезпечувати ефективне управління пасажирськими перевезеннями та підвищувати безпеку руху [9].

Таким чином, цифрові двійники є не лише інноваційним інструментом для підвищення ефективності міського транспорту, а й необхідною технологією

для забезпечення стійкості, безпеки та екологічної відповідальності транспортних систем в Україні. Їхнє впровадження є важливим кроком на шляху модернізації міської інфраструктури та створення адаптивних, інтелектуальних транспортних систем, що відповідають сучасним викликам урбанізації та змін клімату.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на інтеграцію цифрових двійників у залізничні пасажирські перевезення для ефективного прогнозування пасажиропотоків та оптимізації графіків руху. Впровадження таких систем підвищить надійність і безпеку перевезень, зменшить час очікування та експлуатаційні витрати. Інтеграція з автоматизованими системами управління, аналіз великих даних та використання алгоритмів штучного інтелекту забезпечить адаптивність і масштабованість логістичних систем залізничного транспорту в Україні.

Список використаних джерел

1. Aghaabbasi, R., Sabri, S. Exploring digital twins for transport planning: a review. *European Transport Research Review*, 17(1). 2025. P. 1–15. URL: <https://etrr.springeropen.com/articles/10.1186/s12544-025-00713-0>.

2. Li, T., Bian, Z., Lei, H., et al. Digital Twin-based Driver Risk-Aware Intelligent Mobility Analytics for Urban Transportation Management. *arXiv preprint arXiv:2407.15025*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2407.15025>.

3. Kohli, J., Imran, T. Building a Smarter Commute: How Passenger Information Display Systems Are Powering Singapore's Next-Gen Transit Experience. *Scala*. Retrieved from. 2025. URL: <https://apac.scala.com/sg/resources/blogs/building-a-smarter-commute-how-passenger-information-display-systems-are-powering-singapores-next-gen-transit-experience>.

4. WORLD FIRST: Genoa gets 100% frictionless Bluetooth MaaS. *Traffic Technology Today*. Retrieved from URL: <https://www.traffictechnologytoday.com/news/mobility-as-a-service/world-first-genoa-gets-100-frictionless-bluetooth-maas.html>.

5. Naïve Bayes-Based Transition Model for Short-Term Metro Passenger Flow Prediction under Planned Events. *Transportation Research Record*. Retrieved from URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/03611981221086645>.

6. A Digital Twin Landscape Study South Korea. *Netherlands Enterprise Agency*. Retrieved from. URL: <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2025-06/ADigitalTwinLandscapeStudySouthKorea.pdf>.

7. Гайдукевич, В. О., Дорошенко, А. Ю. Створення цифрового двійника в метеопрогнозуванні для розумного міста на мобільній платформі. *Проблеми прикладної інформатики*, 3, 2023. с. 40–45. URL: <https://pp.isoftware.kiev.ua/index.php/ojs1/article/download/579/629>.

8. Андрієнко, Є. В. Упровадження концепції "Smart City" в управління великими містами України. Монографія. Європейська наукова платформа. 2023. URL: <https://palsg.nmu.org.ua/ua/Sci/Monograph/%D0%90%D0%BD%D0%B4%D1%80%D1%96%D1%94%D0%BD%D0%BA%D0%BE-%D0%95-%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D1%96%D1%8F-2023.pdf>.

9. Перший в Україні цифровий двійник міста з'явиться у Одесі. *Техноблог*. 2023. URL: <https://www.vodafone.ua/news/digital-double-in-odessa>.