TECHNICAL SCIENCES

DOI: https://doi.org/10.64076/ap261012.08

Stepan Babii
West Ukrainian National University, Ternopil, Ukraine
ORCID iD: 0000-0001-5052-2702

DIGITAL TWINS AS A PROMISING DIRECTION FOR THE DEVELOPMENT OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Abstract. The paper examines digital twins as a promising direction for the development of information and communication technologies. The essence of a digital twin as a dynamic digital representation of a physical object, process or system based on continuous data exchange between the physical and digital environments is considered. The main technological components of digital twins, including the Internet of Things, sensor systems, cloud and edge computing, data transmission technologies and analytical processing tools, are identified. The prospects of using digital twins for monitoring, modeling, forecasting and optimization of complex systems are substantiated. The key challenges to their widespread adoption are identified, including information system interoperability, standardization, cybersecurity, data protection and information quality.

Keywords: digital twin, information and communication technologies, Internet of Things, digitalization, information systems, digital model, data.

Степан Бабій
Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, Україна
ORCID iD: 0000-0001-5052-2702

ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ ЯК ПЕРСПЕКТИВНИЙ НАПРЯМ РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Анотація. У тезах досліджено цифрові двійники як перспективний напрям розвитку інформаційно-комунікаційних технологій. Розкрито сутність цифрового двійника як динамічної цифрової репрезентації фізичного об’єкта, процесу або системи, що функціонує на основі постійного обміну даними між фізичним та цифровим середовищами. Визначено основні технологічні компоненти цифрових двійників, зокрема Інтернет речей, сенсорні системи, хмарні та периферійні обчислення, технології передачі даних і засоби аналітичної обробки. Обґрунтовано перспективність використання цифрових двійників для моніторингу, моделювання, прогнозування та оптимізації складних систем. Визначено ключові проблеми їх поширення, серед яких сумісність інформаційних систем, стандартизація, кібербезпека, захист даних та забезпечення якості інформації.

Ключові слова: цифровий двійник, інформаційно-комунікаційні технології, Інтернет речей, цифровізація, інформаційні системи, цифрова модель, дані.

Стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій зумовлює трансформацію підходів до створення, обробки та використання інформації. Поширення сенсорних систем, Інтернету речей, високошвидкісних мереж передачі даних, хмарних і периферійних обчислень створює технологічні

передумови для формування нового типу взаємодії між фізичними об’єктами та цифровим середовищем. Одним із перспективних результатів такого розвитку є технологія цифрових двійників (Digital Twin), яка забезпечує створення цифрового представлення фізичного об’єкта, процесу або системи та його взаємодію з відповідним фізичним середовищем.

Актуальність дослідження цифрових двійників визначається не лише можливістю створення високоточної цифрової моделі об’єкта, а насамперед здатністю забезпечувати її актуалізацію на основі даних, отриманих у реальному або наближеному до реального часу режимі. Таким чином, цифровий двійник поступово перетворюється з окремого інструменту моделювання на комплексну інформаційно-комунікаційну систему, яка поєднує фізичні об’єкти, цифрові моделі, канали зв’язку, засоби зберігання та обробки даних.

Відповідно, актуальним завданням є визначення ролі цифрових двійників у розвитку сучасних інформаційно-комунікаційних технологій, а також встановлення технологічних передумов, переваг та проблем їх подальшого поширення.

Проблематика цифрових двійників активно розвивається у сучасних наукових дослідженнях. Важливе значення для формування єдиного підходу до цієї технології має міжнародний стандарт ISO 23247-1:2021, який визначає загальні принципи та вимоги до framework цифрового двійника у виробничому середовищі [1]. Наявність стандартизованих підходів є важливою передумовою подальшої інтеграції цифрових двійників з іншими інформаційними та комунікаційними системами.

У науковій літературі цифровий двійник розглядається як технологія, що забезпечує цифрове представлення реального об’єкта та взаємодію між фізичним і цифровим середовищами. Систематичний огляд Yao та ін. показує, що розвиток цифрових двійників безпосередньо пов’язаний із цифровізацією, віртуальним моделюванням, інформаційними технологіями та використанням даних для моніторингу й аналізу фізичних об’єктів [2].

Водночас цифровий двійник не слід ототожнювати із традиційною цифровою моделлю. Його принциповою особливістю є можливість постійного обміну інформацією з фізичним об’єктом. Саме тому функціонування цифрових двійників потребує поєднання декількох технологій, серед яких Інтернет речей, сенсори, мережеві технології, засоби аналітики, хмарні та розподілені обчислення. Відповідний взаємозв'язок технологій розглянуто у дослідженнях, присвячених технологічним основам та перспективам цифрових двійників [3; 4].

Окремої уваги потребує проблема практичного поширення цифрових двійників. Дослідження Sharma та ін. свідчить, що масштабне впровадження технології стримується відсутністю універсального підходу до визначення та структури цифрового двійника, залежністю архітектури від конкретної сфери застосування, питаннями безпеки даних та недостатньою розвиненістю методів оцінювання ефективності цифрових двійників [5].

Таким чином, сучасні дослідження підтверджують, що цифрові двійники формуються на перетині декількох технологічних напрямів, а їх подальший розвиток значною мірою залежить від здатності забезпечити надійну комунікацію між фізичними об’єктами, цифровими моделями та інформаційною інфраструктурою.

Цифровий двійник доцільно розглядати як інформаційно-технологічну систему, що забезпечує цифрове представлення фізичного об’єкта, процесу або системи та підтримує їх взаємозв’язок на основі постійного надходження й обробки даних. На відміну від статичної цифрової моделі, цифровий двійник передбачає динамічне оновлення інформації відповідно до змін фізичного об’єкта. Саме ця властивість визначає його значення для розвитку сучасних інформаційно-комунікаційних технологій [1; 2].

Функціонування цифрового двійника базується на взаємодії декількох технологічних компонентів. Першим є фізичний об’єкт, від якого за допомогою сенсорів та пристроїв Інтернету речей надходять дані про його стан, параметри функціонування та зміни зовнішнього середовища. Наступним компонентом є комунікаційна інфраструктура, яка забезпечує передавання отриманої інформації. Залежно від характеру завдань можуть використовуватися бездротові мережі, 5G, промислові мережі та інші засоби передачі даних. Отримана інформація надходить до цифрового середовища, де здійснюються її зберігання, обробка, моделювання та аналіз [3; 4].

Важливою технологічною особливістю цифрових двійників є поєднання різних рівнів інформаційної інфраструктури. Хмарні обчислення забезпечують масштабоване зберігання та обробку значних обсягів інформації, тоді як периферійні обчислення дають можливість здійснювати частину операцій безпосередньо поблизу джерела формування даних. Це особливо важливо для систем, у яких необхідне швидке реагування на зміни стану фізичного об'єкта. Водночас використання IoT забезпечує безперервне надходження інформації, формуючи інформаційну основу для актуалізації цифрового двійника [3; 4].

Таким чином, цифровий двійник можна представити як взаємопов’язану систему, у якій фізичний об’єкт → сенсори та IoT → мережа передачі даних → цифрове середовище → обробка й аналіз інформації → оновлення цифрового представлення утворюють безперервний інформаційний цикл. У результаті цифровий двійник не просто відображає поточний стан об’єкта, а створює можливості для його моніторингу, моделювання різних сценаріїв та прогнозування подальших змін.

Практичне застосування цифрових двійників охоплює широкий спектр сфер. У промисловості вони можуть використовуватися для моніторингу обладнання, виробничих процесів та технічного стану машин. У транспортній сфері технологія може застосовуватися для моделювання транспортних засобів, інфраструктури та потоків. В енергетиці цифрові двійники дають змогу відстежувати функціонування енергетичних систем, а в міській інфраструктурі – моделювати окремі об’єкти та процеси міського середовища. Отже,

універсальність технології визначається можливістю адаптації її архітектури до різних типів фізичних систем.

Однією з ключових переваг цифрових двійників є можливість переходу від періодичного контролю до безперервного інформаційного моніторингу. Накопичення даних про функціонування об’єкта створює передумови для виявлення відхилень, оцінювання поточного стану та прогнозування потенційних проблем. У свою чергу, це сприяє підвищенню оперативності реагування та обґрунтованості технологічних рішень [2; 5].

Перспективність цифрових двійників також пов’язана з можливістю формування взаємопов’язаних цифрових середовищ, у яких окремі цифрові двійники можуть взаємодіяти між собою. Наприклад, цифровий двійник виробничого обладнання може бути пов'язаний із двійником виробничої лінії, а останній – із цифровою моделлю відповідного підприємства або інфраструктурного об’єкта. Проте така взаємодія потребує високого рівня інтероперабельності інформаційних систем, єдиних форматів даних та узгоджених протоколів обміну інформацією [6].

Попри значний потенціал, поширення цифрових двійників супроводжується низкою технологічних та організаційних проблем. Насамперед йдеться про необхідність отримання якісних, достовірних та своєчасних даних. Неточність сенсорів, переривання зв’язку або затримка передавання інформації можуть призвести до невідповідності між фізичним об’єктом і його цифровим представленням. Тому надійність цифрового двійника безпосередньо залежить від якості всієї інформаційно-комунікаційної інфраструктури [2; 5].

Іншою проблемою є забезпечення сумісності різних інформаційних систем. У складних цифрових середовищах можуть використовуватися різні протоколи, формати даних та програмні платформи, що ускладнює взаємодію між цифровими двійниками. У зв’язку з цим важливого значення набувають стандартизація та розвиток підходів до інтероперабельності [1; 6].

Окремий комплекс проблем становлять кібербезпека та захист даних. Цифровий двійник функціонує на основі постійного обміну інформацією між фізичним і цифровим середовищами, тому несанкціонований доступ до даних або втручання в інформаційні канали може негативно вплинути на достовірність цифрового представлення та безпеку відповідного фізичного об’єкта. Це обумовлює необхідність застосування комплексних механізмів автентифікації, контролю доступу, шифрування та захисту мережевої інфраструктури.

Подальший розвиток цифрових двійників пов'язаний із вдосконаленням технологій Інтернету речей, високошвидкісних мереж, хмарних та периферійних обчислень, а також із розвитком стандартів взаємодії між різними інформаційними системами [4; 7]. Важливим напрямом є перехід від створення окремих цифрових двійників до формування інтегрованих екосистем, у яких інформація може циркулювати між декількома пов'язаними об’єктами та системами.

Отже, цифрові двійники поступово формують новий рівень розвитку інформаційно-комунікаційних технологій, оскільки поєднують фізичні об’єкти, сенсорні системи, комунікаційні мережі, обчислювальні ресурси та цифрові моделі в єдине інформаційне середовище. Їх подальше поширення залежатиме не лише від розвитку окремих технологій, а й від здатності забезпечити їх комплексну інтеграцію, стандартизацію, безпечний обмін даними та інтероперабельність.

Цифрові двійники є перспективним напрямом розвитку інформаційно-комунікаційних технологій, що забезпечує динамічний взаємозв’язок між фізичними об’єктами та цифровим середовищем. Їх функціонування ґрунтується на інтеграції IoT, сенсорних систем, комунікаційних мереж, хмарних і периферійних обчислень та технологій обробки даних. На відміну від статичних цифрових моделей, цифрові двійники забезпечують постійне оновлення інформації про стан відповідного об’єкта, створюючи можливості для моніторингу, моделювання та прогнозування. Подальший розвиток цієї технології потребує вдосконалення інформаційної інфраструктури, забезпечення інтероперабельності, стандартизації, кібербезпеки та надійності обміну даними.

REFERENCES / СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. ISO 23247-1:2021. *Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing – Part 1: Overview and general principles.* Geneva: International Organization for Standardization, 2021. ISO 23247-1:2021

2. Yao J.-F., Yang Y., Wang X.-C., Zhang X.-P. et al. Systematic review of digital twin technology and applications. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art.* 2023. Vol. 6. Article 10. DOI: 10.1186/s42492-023-00137-4.

3. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access.* 2020. Vol. 8. P. 108952–108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.

4. Qi Q., Tao F., Hu T., Anwer N., Liu A., Wei Y., Wang L., Nee A. Y. C. Digital Twins: A Survey on Enabling Technologies, Challenges, Trends and Future Prospects. *IEEE Communications Surveys & Tutorials.* 2022. Vol. 24, No. 4. P. 2255–2291. DOI: 10.1109/COMST.2022.3208773.

5. Liu Y., Feng J., Lu J., Zhou S. A review of digital twin capabilities, technologies, and applications based on the maturity model. *Advanced Engineering Informatics.* 2024. Vol. 62. Article 102592. DOI: 10.1016/j.aei.2024.102592.

6. Acharya S., Khan A. A., Päivärinta T. Interoperability levels and challenges of digital twins in cyber–physical systems. *Journal of Industrial Information Integration.* 2024. Vol. 42. Article 100714. DOI: 10.1016/j.jii.2024.100714.

7. Hakiri A., Gokhale A., Ben Yahia S., Mellouli N. A comprehensive survey on digital twin for future networks and emerging Internet of Things industry. *Computer Networks.* 2024. Vol. 244. Article 110350. DOI: 10.1016/j.comnet.2024.110350.