

ПРОГРАМНІ ТА АПАРАТНІ ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

О.О. Тимашов, К.П. Сосненко, Т.А. Самолюк *

Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ

* Листування: sosnenko.kate@ukr.net

Open Access under [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) License

MSC 90C15, 49M27

Software and Hardware Tools for Modeling Digital Twins

Oleksandr Timashov, Kateryna Sosnenko, Tamara Samoliuk *

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv

* Correspondence: sosnenko.kate@ukr.net

Introduction. A digital twin dynamically reflects and simulates the behavior of its physical counterpart. To predict the behavior of a digital twin under certain conditions, it is necessary to create a large database and develop a software model. Artificial intelligence, smart sensors, 5G, cloud computing, VR/AR and blockchain are technologies that provide digital twins with intelligence, the ability to work constantly in real time and increased security.

The purpose of the study is to demonstrate the possibilities of using digital twin technology to predict the remaining life of aircraft structures in order to ensure timely maintenance and optimize costs.

Results. The paper substantiates the use of software and hardware for digital twins, which provides significant potential for optimizing processes and increasing efficiency in many industries. The main hardware includes sensors and transducers: sensors for temperature, pressure, humidity and other physical parameters; cameras for visual monitoring. Computing devices: servers for real-time data processing, graphics processing units (GPUs) for processing complex models; data transmission devices: network devices for fast data transmission (5G, LoRaWAN); cloud services for data storage and synchronization (AWS, Azure). Further development of the technology is important to ensure greater accuracy and integration.

Conclusions. Digital twins help improve productivity by enabling teams to collaborate in real time to accelerate and improve decision-making. Their wide range of possible applications is making them increasingly important in business and industry. The use of digital twins provides a comprehensive effect, which is manifested in reducing costs and waste, increasing productivity, improving product quality and storage conditions, as well as reducing production cycle times and lead times.

Keywords: digital twins, virtual information constructs, software model, artificial intelligence.

Анотація

Вступ. Цифровий двійник (ЦД) відображає та імітує поведінку свого фізичного аналога. Щоб спрогнозувати поведінку ЦД в певних умовах потрібно створити велику базу даних та розробити програмну модель. Штучний інтелект, інтелектуальні датчики, 5G, хмарні обчислення, VR/AR і блокчейн – технології, які забезпечують ЦД інтелектом, можливістю постійної роботи у реальному часі та підвищеною безпекою.

Мета дослідження. Продемонструвати можливості використання технології ЦД для прогнозування залишкового ресурсу конструкції літальних апаратів з метою забезпечення своєчасного технічного обслуговування та оптимізації витрат.

Результати. У роботі обґрунтовано використання програмного та апаратного забезпечення для ЦД, що забезпечує значний потенціал для оптимізації процесів та підвищення ефективності в багатьох галузях промисловості. Основне апаратне забезпечення включає датчики та перетворювачі: датчики температури, тиску, вологості та інших фізичних параметрів; камери для візуального моніторингу. Обчислювальні пристрої: сервери для обробки даних у реальному часі, графічні процесори (GPU) для обробки складних моделей; пристрої передачі даних: мережеві пристрої для швидкої передачі даних (5G, LoRaWAN);

хмарні сервіси для зберігання та синхронізації даних (AWS, Azure). Подальший розвиток технології є важливим для забезпечення більшої точності та інтеграції.

Висновки. ЦД сприяють підвищенню продуктивності, оскільки дозволяють командам співпрацювати у режимі реального часу, щоб пришвидшити та покращити процес прийняття рішень. Широкий спектр можливих застосувань зумовлює їхню зростаючу значущість у бізнесі та промисловості. Використання ЦД забезпечує комплексний ефект, що проявляється у зниженні витрат і обсягів відходів, підвищенні продуктивності, покращенні якості продукції та умов її зберігання, а також у скороченні тривалості виробничого циклу та термінів реалізації.

Ключові слова: цифрові двійники, віртуальні інформаційні конструкції, програмна модель, штучний інтелект.

Вступ. Цифровий двійник (ЦД) – динамічна віртуальна модель, що відображає та імітує поведінку свого фізичного аналога. Для прогнозування поведінки ЦД в певних умовах необхідно створити велику базу даних і розробити програмну модель. Такі технології, як штучний інтелект, інтелектуальні датчики, 5G, хмарні обчислення, VR/AR і блокчейн, забезпечують функціонування ЦД, надаючи їм можливість обробки даних у реальному часі та підвищеного рівня безпеки.

У ЦД інтегровані дані передаються як від реального об'єкта до його віртуального об'єкта, так і у зворотному напрямку. Таким чином, ЦД – це динамічна віртуальна модель об'єкта, що постійно оновлюється за рахунок потоку даних та відображає стан і поведінку фізичного об'єкта в реальному часі.

У цій ситуації цифровий об'єкт стає контрольним зразком реального об'єкта. Зміна стану реального об'єкта призводить до зміни віртуального об'єкта і навпаки.

На початковому етапі створюється цифрова версія реального об'єкта чи процесу, яка з певним ступенем адекватності описує реальний об'єкт чи процес. Потім формується зв'язок між реальним об'єктом або процесом та їх цифровою версією. І нарешті відбувається зближення, а інколи й перетин між реальним об'єктом або процесом та його цифровою версією [1].

Постановка завдання. Концепція ґрунтується на тому, що будь-який об'єкт матеріального світу може бути віддзеркалений у віртуальному світі, так що віртуальна частина відображає фізичну, а фізична – віртуальну. При цьому обидві частини об'єкта поєднані інформаційним зв'язком. Цінність ЦД полягає у можливості його існування ще до етапу виробництва, що сприяє зниженню витрат і скороченню терміну розроблення виробу.

ЦД володіє інформацією про більшість або всі характеристики продукту та супроводжує його протягом усього життєвого циклу, включаючи етапи проектування та розроблення.

ЦД у високотехнологічній промисловості забезпечують виконання чисельного моделювання надвисокої точності у поєднанні із системою моніторингу технічного стану. Їх розвиток зумовлює досягнення безпрецедентного рівня безпеки та надійності, що є особливо важливим під час проектування літаків і космічних апаратів, а також їх технічного обслуговування [2]. Інженери проводять аеродинамічні випробування, скорочуючи терміни сертифікації літаків та заощаджуючи на створенні фізичних прототипів. Водночас авіакомпанії застосовують ЦД двигунів для реалізації предикативного обслуговування, щоб своєчасно замінювати зношені деталі під час планової стоянки. У вітровій турбіні сотні датчиків передають дані про швидкість вітру та навантаження на лопаті в хмарну інфраструктуру, де віртуальний двійник аналізує зношування підшипників і розраховує новий кут нахилу лопаті, щоб знизити навантаження і запобігти аварії. ЦД сприяють розумінню та оптимізації функціонування всіх фізичних активів, забезпечуючи безперервний обмін даними між фізичним виробом і його віртуальною моделлю.

ЦД – це набір віртуальних інформаційних конструкцій, що повністю описують потенційний або фактичний реальний вироблений продукт. Опис, представлений ЦД, має бути практично невідмінним від свого фізичного аналога [3].

Ціль роботи – продемонструвати можливості використання технології ЦД для прогнозування залишкового ресурсу конструкції літальних апаратів з метою забезпечення своєчасного технічного обслуговування та оптимізації витрат.

ЦД дають багато переваг у різних сферах виробництва, оскільки дозволяють інженерам вивчати, досліджувати та оцінювати фізичні об'єкти, процеси та системи. Для створення цифрової копії використовуються сенсори, датчики та інші smart-об'єкти, а також канали передачі даних до віртуальної копії. В основі формування віртуальної копії, знаходяться кілька таких технологій:

Інтернет речей – мережа датчиків, що передають сигнали від фізичних об'єктів у хмару (для забезпечення взаємодії об'єкта з хмарою);

Штучний інтелект – застосовується для обробки масивів даних без участі людини з метою виявлення аномалій, прихованих патернів та автоматичного прийняття рішень;

Машинне навчання – забезпечує здатність ЦД до самовдосконалення шляхом навчання на нових даних, що підвищує точність прогнозування поведінки об'єкта в майбутньому.

У межах описаної концепції можна назвати кілька етапів розробки:

- ЦД-прототип – містить детальну високоточну модель, проте не включає результати вимірювань і звітів, що отримані від конкретного реального об'єкта;

- ЦД-екземпляр – описує конкретний реальний об'єкт, і залишається з ним пов'язаним протягом усього життєвого циклу. Він містить інформацію про налаштування моделі, керуючі параметри, дані з датчиків та історичні відомості щодо конкретного виробу, пристрою або процесу. Такий двійник дає змогу здійснювати прогнозування стану відповідного реального об'єкта;

- сукупність ЦД – система, що об'єднує всі ЦД-екземпляри, які можуть не мати незалежної унікальної структури даних.

Практичне впровадження. SCADA належить до централізованих систем контролю та керування системами або їх комплексами, функціонування яких здійснюється за участю оператора. SCADA-система може дозволити операторам змінювати маршрути, стежити за режимами роботи, тривожними повідомленнями (алармами) та забезпечує повний контроль виконання технологічного циклу.

Інтегрування ЦД із системою Power SCADA – це унікальна можливість, яка допоможе компаніям уникати спричинених людською помилкою ситуацій, які можуть призвести до великих фінансових втрат, скоротити час запуску та введення в експлуатацію, а також оцінити обізнаність і готовність персоналу, що займається контролем.

ЦД включає кілька обов'язкових компонентів: фізичне середовище, віртуальне середовище, середовище даних, аналітичне середовище та канали зв'язку між ними. Фізичне середовище – це сам об'єкт, оснащений датчиками Інтернету речей (ІоТ-датчиками) та сенсорами, які в режимі реального часу здійснюють збір даних і передають їх цифровій копії. Віртуальне середовище разом з аналітичним блоком обробляє отримані дані за допомогою алгоритмів машинного навчання та забезпечує візуалізацію об'єкта. Це дозволяє відстежувати поточний стан об'єкта, а також здійснювати прогнозування його поведінки на майбутнє (рис. 1).

Використовуючи дані в реальному часі та архівовані дані можна скоротити час реагування на помилки, який може бути досягнуто завдяки унікальним і об'єднаним можливостям аналізу пам'яті та відтворенню подій. Дані можуть отримуватись безпосередньо від фізичних об'єктів і бути як статичними, так і динамічними, вони можуть надходити від різних сервісів, що обробляють дані вимірювань, а також і зовнішні дані. Дані можуть виникати і внаслідок з'єднання вимірювань – у цьому випадку ці дані не надходять самі по собі, а при підтримці безлічі з'єднань. Впровадження технології ЦД сприяє зниженню ризиків, пов'язаних із безпекою, шляхом відпрацювання надзвичайних і ризикованих ситуацій без загрози будь-якої реальної небезпеки. Крім того, рівень безпеки

підвищується шляхом удосконалення процесів прийняття рішень завдяки аналізу множинних сценаріїв типу "Що, якщо".

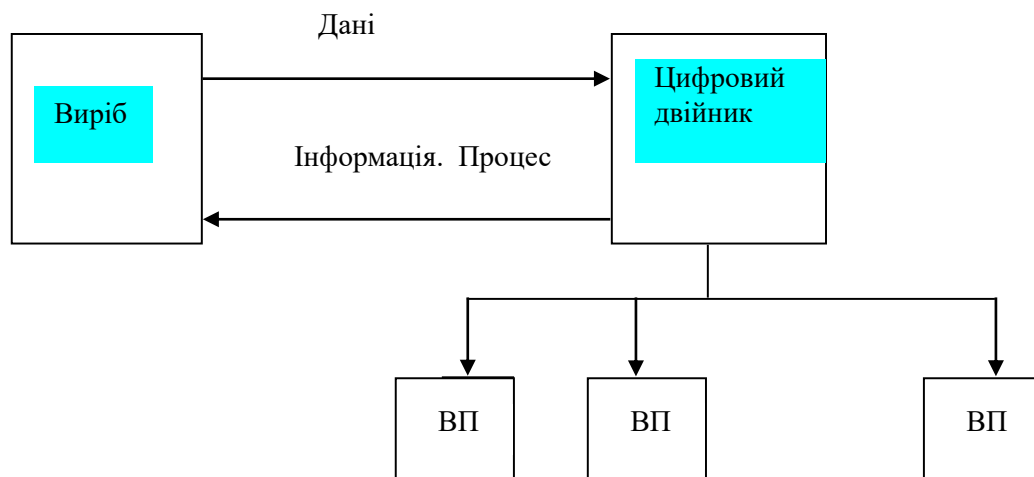


РИС. 1. ЦД в управлінні циклом виробів

ЦД характеризуються низкою ключових властивостей. По-перше, синхронізація забезпечує точне узгодження в часі з реальним світом, що дозволяє навчати ШІ.

По-друге, репрезентативна базова істина виступає як єдине джерело даних для формування віртуальних наборів.

По-третє, фізична точність передбачає відповідність законам фізики та синхронізацію з реальним світом.

Технологія ЦД значно перевершує просту симуляцію, оскільки дозволяє аналізувати будь-яку кількість процесів одночасно, забезпечуючи більш точне відтворення майбутніх сценаріїв.

ЦД також підвищують продуктивність, оскільки дозволяють працювати в режимі реального часу, щоб пришвидшити та покращити процес прийняття рішень. Постійна передача інформації між ЦД і відповідним фізичним середовищем робить можливим моделювання в реальному часі. Це підвищує точність прогнозних аналітичних моделей, а також якість управління і моніторингу.

Застосування ЦД значно сприяє скороченню витрат і відходів, підвищенню продуктивності, покращенню якості та зберіганню, а також прискоренню виробництва та часу реалізації. Крім того, за результатами аналізу даних ЦД, можливе розрахування строків окупності обладнання, перспектив зміни технологічних режимів, скорочення обслуговуючого персоналу – тобто приймати стратегічні рішення.

ЦД – віртуальна копія процесу або ресурсу, що динамічно відображає та імітує поведінку свого фізичного аналога. Використання сучасного програмного забезпечення для моделювання у поєднанні з великими масивами даних містить інформацію про об'єкти. У разі непередбачених збоїв функціонування моделі забезпечується скорочення часу реагування за рахунок унікальним і об'єднаним можливостям аналізу пам'яті та відтворенню подій.

Практичні переваги ЦД полягають у підвищенні гнучкості та ефективності управління діяльністю агропромислових підприємств як інструменту адаптації до макроекономічних показників. Застосовується міждисциплінарний підхід, що охоплює методи системного аналізу, порівняльного

аналізу сучасних ІТ-рішень та моделювання адаптаційних стратегій підприємств. Емпіричну базу становлять статистичні дані підприємств АПК, аналітичні матеріали галузевих звітів, а також кейси міжнародного досвіду впровадження ЦД [4].

Програмне забезпечення для ЦД засноване на взаємодії сучасних технологій, зокрема штучного інтелекту, інтелектуальних датчиків, хмарних обчислень, що забезпечують їхню інтелектуальність, функціонування в режимі реального часу та підвищений рівень безпеки.

Дані ЦД можуть архівуватися з метою подальшої аналітичної обробки та накопичення даних.

Дослідження сучасних засобів створення ЦД свідчить, що вони є важливим інструментом сучасних технологій, який дозволяє створювати точні моделі фізичних об'єктів для їх моніторингу, аналізу та оптимізації в реальному часі. Були досліджені програмні та апаратні засоби придатні для промислових застосувань, що підходять для різних типів застосувань, зокрема таких як програмні рішення для моделювання в реальному часі, аналітичні програми та засоби штучного інтелекту, що забезпечують наповнення та розвиток ЦД.

Основні програмні засоби включають платформи для створення ЦД: програмне забезпечення для 3D-моделювання (Autodesk, SolidWorks); платформи моделювання (MATLAB, Simulink, Ansys); інтегровані платформи для Інтернету речей (PTC ThingWorx, Siemens MindSphere); засоби збору та обробки даних: програмні модулі для великих даних (Hadoop, Apache Spark); інструменти для аналізу даних у реальному часі (StreamSets, Kafka). Штучний інтелект та машинне навчання: алгоритми прогнозування та автоматизації процесів, інструменти для навчання моделей (TensorFlow, PyTorch, Scikit-learn).

Апаратне забезпечення включає датчики та перетворювачі: температури, тиску, вологості та інших фізичних параметрів, камери для візуального моніторингу, обчислювальні пристрої (сервери для обробки даних у реальному часі, графічні процесори (GPU) для обробки складних моделей), засоби передачі даних (мережеві технології, зокрема 5G та LoRaWAN), хмарні сервіси для зберігання і синхронізації даних (AWS, Azure) [5].

Найбільш поширеними та актуальними системами для моделювання ЦД варто виокремити Microsoft Azure Digital Twins, AWS IoT TwinMaker, NVIDIA Omniverse, Supply Chain Twin. Платформи мають свої особливості та можливості, а також недоліки. Ці системи призначені для створення точних, інтерактивних та функціонально насичених віртуальних моделей. Метою аналізу цих систем є визначення можливості їхнього застосування для створення ЦД різних об'єктів. Також вони повинні забезпечувати широкі можливості для створення та використання ЦД. Забезпечувати гнучкість у відтворенні складних систем, працювати з великими обсягами даних, аналізувати отримані моделі двійників [6–9].

Таблиця містить характерні дані про поширені сучасні програмні системи моделювання ЦД.

ТАБЛИЦЯ. Сучасні програмні системи для створення ЦД

Система	Галузь застосування	Основні характеристики	Недоліки
1	2	3	4
Azure Digital Twins	Універсальна (різні сектори, від міського планування до промислового виробництва)	Надає інструменти збору даних та аналітики, які допомагають у прийнятті обґрунтованих рішень на основі точних моделей. Підтримує велику кількість IoT-сенсорів та пристроїв, що забезпечує високу точність та актуальність даних у цифрових моделях	Залежність від системи Microsoft. Ізоляція від інших технологічних рішень що може призвести до додаткових витрат на розроблення спеціальних адаптерів або інтерфейсів для забезпечення сумісності

Закінчення таблиці

1	2	3	4
AWS IoT TwinMaker	Широкий діапазон галузей, від промисловості до управління міською інфраструктурою	Здатність обробляти великі обсяги даних, що надходять з різноманітних джерел, та інтегрувати ці дані в єдину віртуальну модель	Інтеграція з продуктами або послугами, які функціонують поза Amazon Web Services, може вимагати додаткових ресурсів та технічних зусиль
NVIDIA Omniverse	Створення деталізованих візуальних моделей	Забезпечує широкі можливості для дизайнерів, інженерів та художників, дозволяючи створювати складні інтерактивні сцени та моделі з високим рівнем деталізації. Підтримка великої кількості форматів даних та можливість легкої інтеграції з іншими програмами та системами.	Обмеженість при роботі з об'єктами, які потребують точного моделювання фізичних властивостей та взаємодій

ЦД у літакобудуванні визначається як інтегрована багатомасштабна ліцензована модель літального апарата, що має доступ до даних постачальників, даних про експлуатаційні ростові засоби для "віддзеркалення" стану відповідного повітряного судна, що працює у реальних умовах.

ЦД може враховувати одну або кілька важливих та взаємозалежних систем літального апарата, включаючи рухові системи зберігання енергії, літальні апарати, засоби життєзабезпечення, конструкцію, систему управління двигуном і т. д. Певні відхилення також можуть бути враховані під час будівництва літального апарата, які можуть вплинути на його роботу. ЦД включає дані з датчиків в інтегрованій бортовій системі керування, історії обслуговування та всіх доступних даних і звітів користувачів [10]. Поєднуючи всю цю інформацію, ЦД безперервно перевіряє правильність роботи літального апарата та залишковий термін корисного використання (рис. 2).

ЦД створюються за типами реальних аналогів і містять дані про відповідні фізичні об'єкти. Екземпляри будуть базуватися на шаблонах їх типів відповідно до конфігурації середовища. Для відображення, розуміння та прогнозування робочих станів і поведінки двійників цифрова копія містить обчислювальні або аналітичні моделі, а також моделі, що використовуються для призначення дій на основі бізнес-логіки та цілей відповідного об'єкта фізичного світу. Для доступу до даних і використання його можливостей ЦД містить набір сервісних інтерфейсів для промислових застосувань або інших двійників. Програмне та апаратне забезпечення ЦД створює значний потенціал для оптимізації процесів та підвищення ефективності в багатьох галузях промисловості. Відсутність універсальної платформи для дослідження і розроблення ЦД стримує подальший розвиток цієї технології як у теоретичній, так і в промисловій площині. З проведених досліджень для створення ЦД ми віддаємо перевагу AWS IoT TwinMaker через її універсальність у порівнянні з іншими розглянутими платформами. Подальший розвиток технології є важливим для забезпечення більшої точності та інтеграції.

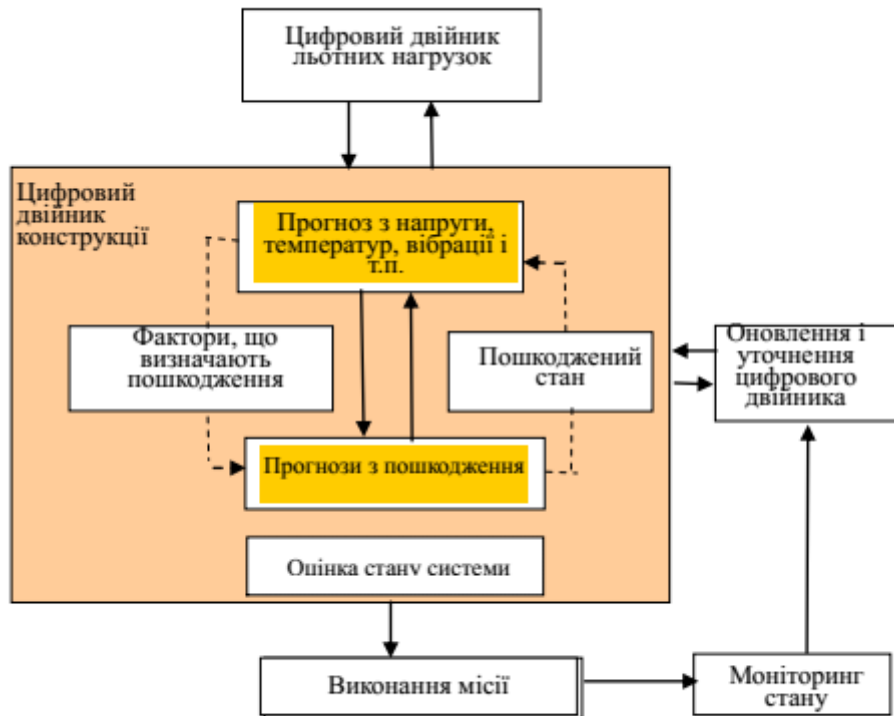


РИС. 2. Функціональна схема концепції прогнозування ЦД

Висновки. ЦД сприяють підвищенню продуктивності, оскільки дозволяють командам співпрацювати в режимі реального часу, щоб пришвидшити та покращити процес прийняття рішень. Широкий спектр можливих застосувань зумовлює їхню зростаючу значущість у бізнесі та промисловості. Використання ЦД забезпечує комплексний ефект, що проявляється у зниженні витрат і обсягів відходів, підвищенні продуктивності, покращенні якості продукції та умов її зберігання, а також у скороченні тривалості виробничого циклу та термінів реалізації.

Авторські внески: Тимашов О.О. – формування концепції ЦД; розроблення змістовної постановки задачі; аналіз отриманих результатів; визначення напрямків подальших досліджень; Сосненко К.П. – розроблення ЦД в літакобудуванні, використання технології ЦД для прогнозування залишкового ресурсу конструкції літальних апаратів з метою забезпечення своєчасного технічного обслуговування та оптимізації витрат; Самолюк Т.А. – аналіз сучасних засобів створення ЦД з метою їх подальшого практичного застосування.

Список літератури

1. Kritzing W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. Ifac-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, No. 11. P. 1016–1022.
2. Laessgen E., Stragel D.S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles: Conference paper. *The 53-rd structures, structural dynamics, and materials conference: Special session on the digital twin 2012.* <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120008178.pdf>

3. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*: ed. F. J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. Cham (Switzerland): Springer International Publishing, 2017. P. 85–113.
4. Шевченко В., Замлинська О. Цифрові двійники як інноваційний інструмент сталого розвитку агропромислових підприємств. *Актуальні питання економічних наук*. 2025. № 13. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16810175>
5. Сосненко К., Самолюк Т. Програмне та апаратне забезпечення для моделювання та конфігурування цифрових двійників у реальному часі. *XL Міжнародна конференція. Проблеми прийняття рішень в умовах невизначеностей (PDMU-2025) 30 вересня – 1 жовтня 2025 р.* Київ, 2025. С. 137.
6. Nath S.V., Schalkwyk P., Isaacs D. Building industrial digital twins: Design, develop, and deploy digital twin solutions for real-world industries using Azure digital twins. Packt publishing Ltd. 2021. https://books.google.com.ua/books/about/Building_Industrial_Digital_Twins.html?id=d5FEAAAQBAJ&redir_esc=y
7. Tao F., Sun X., Cheng J., Zhu Y., Liu W., Wang Y., Xu H., Hu T., Liu T., Sun Z., Xu J., Bao J., Xiang F., Jin X. MakeTwin: A reference architecture for digital twin software platform. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024. Vol.37, Iss. 1. P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.05.002>
8. Hummel M., Kooten K. Leveraging nvidia omniverse for in situ visualization In: High Performance Computing: ISC High Performance 2019 International Workshops, Frankfurt, Germany, June 16-20, 2019, Revised Selected Papers 34. Springer International Publishing, 2019. P. 634–642. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34356-9_48
9. Іванов Д., Довгий О. Цифровий двійник ланцюга поставок для управління ризиками збоїв та стійкістю в епоху Індустрії 4.0. *Планування та управління виробництвом*. 2021. Т. 32, № 9. С. 775–788. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450>
10. Tuegel E.J., Ingrassia A.R., Eason T.G., Spottswood S.M. Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2011. 154798. 14 p. <https://doi.org/10.1155/2011/154798>

Received/Одержано 12.02.2026

Accepted/Прийнято 26.05.2026

Published/Надруковано 01.06.2026