

DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-74-41>

УДК 004.9

АНАЛІЗ ПРОГРАМНИХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ В ГАЛУЗЯХ ЕКОНОМІКИ

ANALYSIS OF SOFTWARE PLATFORMS FOR CREATING DIGITAL TWINS IN ECONOMIC SECTORS

Мержинський Євгеній Костянтинович

кандидат економічних наук,
доцент кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів,
Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4372-889X>

Бирський Віталій Валерійович

кандидат економічних наук,
доцент кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів,
Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4150-8754>

Хорошун Вікторія Василівна

кандидат економічних наук,
доцент кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів,
Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7757-8041>

Merzhynskiy Yevhenii, Byrskiy Vitalii, Khoroshun Viktoriia
Engineering Educational and Scientific Institute named by Yuriy Potebni
Zaporizhia National University

Стаття присвячена аналізу програмного забезпечення для створення цифрових двійників – віртуальних моделей фізичних об'єктів чи процесів, що відіграють ключову роль у промисловості, енергетиці, транспорті тощо. Розглянуто проблеми відсутності єдиних стандартів, складності інтеграції різномірних систем та обмежень масштабованості. На основі аналізу наукових публікацій (IEEE Xplore, ScienceDirect), технічних звітів (Gartner, IBM) та промислових кейсів (2020–2024) визначено основні технологічні підходи: фізично-орієнтовані, даноцентричні, гібридні та хмарно-периферійні моделі. Проведено порівняльний аналіз платформ (Siemens Digital Industries, Azure Digital Twins, PTC ThingWorx, Ansys Twin Builder) за критеріями функціональності, інтеграції, продуктивності, безпеки та вартості. Запропоновано методику зваженої оцінки, апробовану на прикладі енергетичного сектора.

Ключові слова: цифровий двійник, програмна платформа, класифікація, аналіз платформ, інтеграція систем.

The article explores the landscape of software solutions for creating digital twins – virtual models of physical objects or processes that are essential in modern industries, including manufacturing, energy, transportation, and healthcare. The authors discuss challenges such as the absence of standardized frameworks, the complexity of integrating heterogeneous data sources, and scalability limitations affecting deployment. Through an analysis of scientific publications (IEEE Xplore, ScienceDirect), technical reports (Gartner, IBM), and industrial case studies (2020–2024), the article proposes a classification of technological approaches to digital twin development, covering physics-based, data-driven, hybrid, and cloud-edge models. A comparative study of leading platforms (Siemens Digital Industries, Azure Digital Twins, PTC ThingWorx, Ansys Twin Builder, among others) evaluates key criteria, including functionality, interoperability, computational performance, security mechanisms, and total cost

of ownership. To facilitate objective software selection, the study introduces a weighted evaluation methodology, which is tested in the energy sector, providing insights into practical adoption strategies. The findings suggest that Azure Digital Twins excels in cloud security and integration, while Siemens MindSphere is well-suited for industrial applications, whereas domain-specific tools like Autodesk Revit demonstrate restricted flexibility. The conclusions provide strategic recommendations for implementing digital twins, emphasizing the need for a combined edge-cloud computing approach, the adoption of zero-trust security frameworks, and the application of AutoML for model adaptation and optimization. Additionally, the study outlines future trends, including the standardization of protocols (OPC UA, ISO 23247), the emergence of DTaaS (Digital Twin as a Service) solutions, and the advancement of 5G/TSN networks for real-time simulations. Ultimately, the article underscores the importance of tailoring platform selection to industry requirements, technical constraints, and financial considerations to ensure optimal digital twin deployment across various sectors.

Keywords: digital twin, software platform, classification, platform analysis, system integration.

Постановка проблеми. Розробка програмного забезпечення для створення цифрових двійників стає однією з ключових задач в умовах розвитку новітніх технологій, таких як штучний інтелект, Інтернет речей і великі дані (Big Data). Цифрові двійники, що дозволяють створювати віртуальні моделі фізичних об'єктів чи процесів, надають можливість для реального моніторингу, прогнозування та оптимізації виробничих процесів. У майбутньому технологія цифрових двійників, безумовно, стане основою для оптимізації процесів, зниження витрат та підвищення ефективності в різних сферах економічної діяльності. Проте вибір програмного забезпечення для їх створення є складним завданням, зумовленим різноманіттям технологій, підходів та інструментів, а також відсутністю єдиних стандартів і протоколів взаємодії між різнорідними системами. Це створює значні труднощі щодо інтеграції платформ і забезпечення сумісності, що ускладнює обмін даними та створення єдиної цифрової моделі. Тому питання вибору найбільш ефективного програмного забезпечення для створення цифрових двійників потребує ґрунтовного аналізу і пошуку оптимальних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження базується на аналізі наукових публікацій [1] (IEEE Xplore, ScienceDirect), технічних звітів [2] (Gartner, IBM) та кейсів промислового застосування за період 2020–2024 рр [3; 4; 10]. Використано системний підхід для класифікації викликів, технологій та стандартів, а також порівняльний аналіз програмних платформ. Останні дослідження і публікації в галузі цифрових двійників свідчать про значний інтерес до цієї технології та її потенціалу для трансформації різних галузей промисловості. Зокрема, дослідження Gartner [2] прогнозує, що до кінця 2025 року більшість промислових підприємств будуть використовувати цифрові двійники для опти-

мізації своїх процесів. У наукових публікаціях активно обговорюються різні аспекти розробки та застосування цифрових двійників. Так у дослідженні [3] (Zhang і ін., 2022; IEEE IoT Journal) вказують на складність інтеграції різнорідних систем через відсутність єдиних протоколів. Відсутність уніфікованих протоколів (наприклад, OPC UA, MQTT) призводить до складнощів у синхронізації даних між IoT-пристроями, ERP-системами та хмарними сховищами. У дослідженні [4] (Tao et al., 2023) зазначено, що лише 23% промислових рішень відповідають міжнародним стандартам (ISO 23247), що ускладнює масштабування. При виборі технології важливим аспектом функціонування цифрових двійників постає кібербезпека, зростання кібератак вимагає впровадження zero-trust архітектур та енд-ту-енд шифрування [5, 8]. В роботах [6, 7] розглядаються та порівнюються різні платформи, які можна використовувати для створення цифрового двійника, оскільки кожна платформа має переваги та недоліки і їх застосування в контексті розумних міст.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на зусилля зі стандартизації (OPC UA, MQTT, ISO 23247), відсутність єдиного, широко прийнятого фреймворку гальмує обмін даними між різнорідними системами. Зокрема, дослідження NCBI [9] вказує, що непокритість всіх етапів генерації та обробки даних є ключовою перешкодою для інтероперабельності цифрових двійників. Аналогічно, відмічається брак узгоджених протоколів для синхронізації IoT-пристроїв та ERP-систем [10], що призводить до додаткових витрат на розробку конвертерів даних.

Низька пропускна здатність каналів зв'язку та обмежена продуктивність обчислювальних модулів при реалізації цифрових двійників на рівні промислового підприємства перешкоджають реалізації в режимі реального часу.

Нестача методологій для гнучкого розподілу обчислень між edge- та cloud-компонентами погіршує масштабованість рішень [11]. Додатково, відсутність єдиних метрик для вимірювання latency та throughput ускладнює порівняльний аналіз існуючих платформ.

У сукупності ці невирішені частини створюють критичні бар'єри на шляху до широкого та ефективного впровадження цифрових двійників, вимагаючи подальших досліджень і розробки комплексних рішень.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою статті є систематичне дослідження та порівняльна оцінка існуючих платформ для моделювання цифрових двійників, їх ключових функціональних можливостей і відповідності сучасним промисловим вимогам. Завданнями дослідження є визначення критеріїв вибору оптимального ПЗ, аналіз його інтеграційної спроможності та формулювання рекомендацій щодо впровадження в різних секторах економіки.

Виклад основного матеріалу дослідження. У сучасних рішеннях для створення цифрових двійників виокремлюють кілька основних класифікаційних підходів, що відрізняються за методами моделювання, ступенем інтеграції з фізичними об'єктами та роллю даних. На основі проведеного теоретичного дослідження сформовано наступні базові технологічні підходи до створення цифрових двійників (Таблиця 1).

Наведена класифікація в таблиці наочно показує, що вибір програмної платформи для цифрових двійників має базуватися на балансі між функціональною повнотою, інтеграційною спроможністю та вимогами до продуктивності. Гібридні рішення, що поєднують edge- та cloud-обчислення, найкраще відповідають задачам реального часу, тоді як локальні мультифізичні симулятори дають переваги у точності моделювання складних фізичних процесів.

У межах дослідження цифрових двійників важливо не лише визначити їх загальні переваги й функціональні можливості, а й чітко розуміти, у яких саме галузях економіки ці технології вже активно впроваджуються або мають найбільший потенціал застосування. Цифрові двійники стали потужним інструментом цифрової трансформації в різних секторах – від промисловості та енергетики до охорони здоров'я, освіти та міського планування. Їх впровадження тісно пов'язане з розвитком спеціалізованих програмних рішень, що дозволяють моделювати, аналізувати, контр-

олювати та оптимізувати фізичні об'єкти і процеси в цифровому середовищі.

Кожна галузь економіки має свої особливості, потреби та вимоги до функціоналу цифрових двійників, тому на ринку сформувався широкий спектр програмного забезпечення, орієнтованого на конкретні сфери діяльності. Наприклад, у промисловості переважають рішення від Siemens і PTC, в енергетиці – продукти GE Digital, у сфері освіти – інтерактивні платформи на зразок MozaBook і Tinkercad.

З метою систематизації інформації про програмні платформи цифрових двійників доцільним є їх класифікація за галузями економіки. Такий підхід дозволяє виявити найпоширеніші програмні продукти в кожній сфері, спростити вибір технологій для впровадження цифрових двійників, а також зрозуміти сучасні тенденції цифровізації економіки в цілому.

Нижче наведено узагальнену таблицю, яка ілюструє відповідність ключових програмних продуктів до основних галузей економіки, в яких цифрові двійники відіграють важливу роль.

Проведений аналіз платформ по галузям економіки свідчить про те, що такі платформи, як Siemens (Digital Industries Software, Simcenter) та PTC ThingWorx зустрічаються в багатьох секторах – від промисловості до IoT та машинобудування. Це свідчить про їхню гнучкість і розвинену екосистему конекторів.

Спеціалізовані інструменти, як-от Autodesk Revit для будівництва чи Philips HealthSuite для охорони здоров'я, найкраще відповідають вузькоспрямованим потребам галузі, але мають обмежену застосовність поза своїм профілем.

Для комплексних проєктів із вимогами до точності симуляцій, аналітики та візуалізації доцільно поєднувати кілька платформ: наприклад, Ansys Twin Builder для фізичних симуляцій у поєднанні з Azure Digital Twins для збору та аналізу IoT-даних.

Процес вибору програмної платформи для цифрового двійника залежить від багатьох взаємопов'язаних факторів. Для того, щоб об'єктивно оцінити та обрати найбільш оптимальне рішення під конкретні бізнес- або економічні завдання, нами пропонується така система критеріїв:

1. Функціональність: Оцінюється наявність вбудованих інструментів для моделювання, прогнозування та аналітики. Важливу роль відіграє наявність бібліотек готових компонентів та підтримка мультимодального моделювання.

Таблиця 1

Класифікація технологічних підходів до створення цифрових двійників

Підхід	Принцип дії	Переваги	Обмеження	Приклади платформ
Фізично-орієнтований (Physics-based)	Математичні моделі фізичних процесів (механіка, теплопередача, гідродинаміка)	Висока точність, прогнозування в незвіданих умовах	Велика обчислювальна складність, тривалий цикл підготовки, потреба у глибоких знаннях	Ansys Twin Builder, Simcenter Amesim
На основі управління даних (Data-driven)	Статистична аналітика й ML-моделі на основі історичних та поточних даних	Швидка адаптація, виявлення закономірностей без формалізації фізичної моделі	Залежність від якості даних, обмежена пояснюваність, ризик перенавчання	Azure Digital Twins + ML, IBM Watson IoT
Гібридний (Hybrid physics-data-driven)	Поєднання фізичних моделей з методами машинного навчання	Баланс між точністю фізичних симуляцій та адаптивністю на основі даних	Складність інтеграції, підвищені вимоги до архітектури	Siemens Digital Industries Software, 3DEXPERIENCE
Компонентний (Component-based)	Модульна збірка моделей окремих елементів із наступною агрегацією	Повторне використання компонентів, гнучкість налаштування	Потреба чітких специфікацій інтерфейсів, ризик несумісності	PTC ThingWorx, Beckhoff TwinCAT
Системний (System-level)	Моделювання всієї віртуальної архітектури об'єкта або процесу	Комплексний погляд на систему, аналіз сценаріїв на рівні підприємства	Високі вимоги до ресурсів, складність налаштування, довгий цикл розгортання	3DEXPERIENCE, Siemens NX
Хмарно-крайовий (Cloud-Edge)	Розподіл обчислень між edge-пристроями та хмарними сервісами для реального часу й зберігання даних	Низька затримка обробки критичних даних, масштабованість	Потреба високошвидкісних мереж, складність управління безпекою в багаторівневому середовищі	Azure Digital Twins, IBM Watson IoT Platform, AWS TwinMaker
AI/ML-оптимізований	Використання глибокого навчання та алгоритмів оптимізації для адаптації й прогнозування в реальному часі	Автоматизована оптимізація, виявлення аномалій, адаптивне управління	Велика потреба в GPU-ресурсах, складність інтерпретації результатів	NVIDIA Omniverse, Google Cloud AI Platform

Джерело: сформовано авторами на основі [6]

2. Інтеграційні можливості: Визначається здатність платформи швидко і надійно підключатися до існуючої інфраструктури клієнта, зокрема через підтримку промислових протоколів (наприклад, OPC UA, MQTT, REST

API) та сумісність з системами ERP, PLM, SCADA.

3. Продуктивність і масштабованість: Включає можливості обробки великих обсягів телеметрії в реальному часі, підтримку архі-

Таблиця 2

Класифікація ПЗ цифрових двійників по галузям економіки

Галузь застосування	Програмне забезпечення
Промислове виробництво	Siemens Digital Industries Software, PTC ThingWorx, Bentley iTwin, AVEVA
Будівництво та архітектура	Autodesk Revit, Bentley Systems
Транспорт та логістика	ANSYS Twin Builder, Dassault Systèmes
Енергетика	GE Digital, AVEVA
Охорона здоров'я	Philips HealthSuite, Siemens Healthineers, IBM Maximo Asset Monitor
Міське планування (розумні міста)	Cityzenith, Microsoft Azure Digital Twins
Авіація та космос	NASA's DNAD, Lockheed Martin
Машинобудівна промисловість	Siemens Simcenter, Altair HyperWorks
Освіта	MozaBook, Autodesk Tinkercad, Labster
Індустрія IoT	Altair SmartWorks, PTC ThingWorx
Фінанси та банківська справа	IBM Digital Twin Exchange, Microsoft Azure Digital Twins, Ansys Twin Builder, FinAP
Індустрія розваг та медіа	Unity 3D, Unreal Engine
Електронна комерція	Salesforce Einstein, Adobe Sensei
Сільське господарство	Trimble Ag Software, John Deere Operations Center

Джерело: сформовано авторами на основі [6; 8; 10]

текстур edge та cloud, а також рівень затримки системи (latency), що критично для високонавантажених середовищ.

4. Безпека та відповідність стандартам: Оцінюється рівень захищеності даних за рахунок шифрування (TLS, VPN), механізмів аутентифікації/авторизації та відповідності міжнародним стандартам (ISO, NIST, GDPR).

5. Юзабіліті та підтримка: Передбачає зручність налаштування інтерфейсу (у тому числі low-code/GUI), доступність технічної підтримки та навчальних матеріалів, що впливають на швидкість запуску та якість впровадження платформи.

6. Вартість володіння (TCO): Враховуються ліцензійні витрати, витрати на апаратне забезпечення, супровід та оновлення, що дозволяє оцінити повну вартість платформи протягом її життєвого циклу.

7. Екосистема та розвиток: Оцінюються можливості для розширення функціоналу платформи через маркетплейси додатків, активність спільноти користувачів, а також підтримка інтеграції сторонніх рішень, що забезпечує гнучкість та еволюцію платформи у майбутньому.

Алгоритм розрахунку вибору оптимальної платформи для цифрових двійників складається з таких етапів:

1. Визначення ваг. Кожній категорії призначають вагу, виходячи з пріоритетів проєкту.

2. Оцінка за шкалою. Для кожного підкритерія обирають бальну шкалу (наприклад, від 1 до 5). На підставі тестів, документації та кейсів платформи отримують бали.

3. Розрахунок загального балу. Для кожної платформи підраховують зважену суму:

$$\text{Score} = \sum_{i=1}^7 w_i \left(\frac{\sum_j b_{ij}}{n_i} \right) \quad (1)$$

де w_i – вага категорії i , b_{ij} – бал за j -й підкритерій категорії i , n_i – кількість підкритеріїв у категорії i .

4. Порівняння та вибір.

Платформа з найвищим загальним балом у відповідності до ваг та оцінок вважається найоптимальнішою для даного проєкту.

Проведено аналіз вибору оптимальної платформи в енергетичній галузі, де існує необхідність у моніторингу і прогнозуванні роботи генеруючих та розподільних мереж із високими вимогами до інтеграції з існуючими SCADA/ERP, безпеки та масштабованості.

Azure Digital Twins (4,43) отримує найвищий бал завдяки ідеальній інтеграції з хмарною інфраструктурою, сильній безпеці та широкій екосистемі аналітичних сервісів.

Таблиця 3

Платформи та бали за категоріями

Платформа	Функц.	Інтегр.	Продукт.	Безпека	Юзабіліті	ТСО	Екосистема
Azure Digital Twins	4,5	5	4	5	4	3	4
Siemens MindSphere	4	4,5	4,5	4,5	3,5	2,5	4
AVEVA Enterprise DT	3,5	3,5	3,5	4	4	3	3,5

Джерело: розраховано авторами на основі формули [1]

Siemens MindSphere (4,15) дуже добре підходить для критично-чутливих промислових застосунків, але помітно дорожча на етапі розгортання.

AVEVA (3,60) забезпечує добру точність та юзабіліті, але поступається за функціональністю та масштабованістю.

Таким чином, для проєкту в енергетиці з акцентом на швидке масштабування, безпеку та глибоку аналітику оптимальним є поєднання Microsoft Azure Digital Twins із локальними edge-модулями.

Проведений аналіз підтвердив, що не існує «універсальної» платформи для цифрових двійників: кожне рішення має свої сильні й слабкі сторони, а оптимальний вибір визначається багатьма факторами — галузевою специфікою, вимогами до точності симуляцій, наявною IT-інфраструктурою та бюджетом.

Відсутність єдиного фреймворку змушує організації створювати власні шари конвертації даних. Рекомендується розгортати легкі мікросервіси-адаптери, що реалізують підтримку OPC UA/MQTT на рівні edge-пристроїв, та підключати їх через стандартні REST-інтерфейси до хмарних платформ.

Поєднання локальних (edge) модулів для критичних обчислень і хмарних сервісів для аналітики дає змогу знизити затримки і забезпечити необмежену масштабованість. Практичне рішення – використовувати Azure Digital Twins (або AWS IoT TwinMaker) як центральний шар управління й зберігання історії даних та Siemens MindSphere (або локальний Ansys) для розрахунків фізичних моделей.

В якості перспектив розвитку технологій цифрових двійників повинна стати уніфікація протоколів і відкриті стандарти. Консорціями

в галузі IoT та Індустрії 4.0 (OPC Foundation, IEEE) мають прискорити розробку спільних специфікацій для цифрових двійників, що охоплюють не тільки обмін даними, але й методології валідації й сертифікації моделей.

З поширенням невеликих GPU/TPU на вузлах edge з'явиться можливість навчати й оновлювати ML-моделі без централізації всіх даних у хмарі, що підвищить стійкість системи та забезпечить дотримання вимог GDPR.

Іншим перспективним напрямком дослідження може стати модульні цифрові двійники як сервіс (DTaaS). Хмарні провайдери можуть запропонувати готові шаблони цифрових двійників для типових сценаріїв (енергетика, машинобудування, розумні міста), які бізнес зможе швидко конфігурувати під свої потреби. В свою чергу високошвидкісні мережі з низькою затримкою (5G/TSN) відкриють можливості для синхронних симуляцій у реальному часі та координації розподілених об'єктів (дрони, автономний транспорт).

Висновки. Роль цифрових двійників як ключового інструменту Індустрії 4.0 незаперечна: вони дозволяють моніторити, прогнозувати та оптимізувати виробничі й інфраструктурні процеси в різних секторах.

Методика оцінки за сімома категоріями (функціональність, інтеграція, продуктивність, безпека, юзабіліті, ТСО, екосистема) дозволяє об'єктивно порівнювати платформи та обирати найоптимальнішу для конкретних бізнес-задач.

Таким чином, проведене дослідження не тільки окреслило сучасний стан технологій цифрових двійників, але й надало інструментарій для вибору оптимальної платформи та вказало напрями теоретичних та практичних впроваджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI), IEEE International Conference on URL: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/10778636/proceeding> (дата звернення: 29.04.2025).
2. Emerging Tech: Revenue Opportunity Projection of Simulation Digital Twins. URL: <https://www.gartner.com/en/documents/5451563> (дата звернення: 29.04.2025).
3. Chen Y., Wang S. He, B., Duan P., Zhang B., Hong Z., and Ping Y., Crypt-analysis and improvement of DeepPAR: Privacy-preserving and asynchronous deep learning for industrial IoT. *IEEE Internet Things J.* 2022. №. 9(21). pp. 21958–21970.
4. Tao, F., Zhang, C., Qi, Q., Zhang, H. Digital twin maturity model. *Computer Integrated Manufacturing Systems*. 2022. № 28. P. 1267–1281.
5. Ismail M, Amal Abdel Gawad. Revisiting zero-trust security for internet of things. *Sustainable Machine Intelligence Journal*. 2023. № 3(6). P. 1–8.
6. Adamenko Dmytro, Kunnen Steffen, Nagarajah Arun. Comparative analysis of platforms for designing a digital twin. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III: Proceedings of the 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing* (Kharkiv, June 9–12, 2020). Kharkiv: Springer International Publishing, 2020. P. 3–12.
7. Jafari Mina, Abdollah Kavousi-Fard, et al. A review on digital twin technology in smart grid, transportation system and smart city: Challenges and future. *IEEE Access*. 2023. № 11. P. 17471–17484.
8. Wang Yuntao, et al. A survey on digital twins: Architecture, enabling technologies, security and privacy, and future prospects. *IEEE Internet of Things Journal*. 2023. № 10(17). P. 14965–14987.
9. Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK605512/> (дата звернення: 12.04.2025).
10. Kamran Iranshahi, Joshua Brun, Tim Arnold, Thomas Sergi, Ulf Christian Müller. Digital twins: Recent advances and future directions in engineering fields. *Intelligent Systems with Applications*. 2025. № 26. URL: <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200516> (дата звернення: 20.04.2025).
11. Muctadir, H. M., Manrique Negrin, D. A., Gunasekaran, R. et al. Current trends in digital twin development, maintenance, and operation: an interview study. *Software and Systems Modeling*. 2024. № 23. P. 1275–1305. URL: <https://doi.org/10.1007/s10270-024-01167-z> (дата звернення: 21.04.2025).

REFERENCES:

1. Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI), IEEE International Conference on. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/10778636/proceeding> (accessed April 29, 2025).
2. Emerging Tech: Revenue Opportunity Projection of Simulation Digital Twins. Available at: <https://www.gartner.com/en/documents/5451563> (accessed April 29, 2025).
3. Chen Y., Wang S. He, B., Duan P., Zhang B., Hong Z., and Ping Y. (2022) Crypt-analysis and improvement of DeepPAR: Privacy-preserving and asynchronous deep learning for industrial IoT. *IEEE Internet Things J.* 2022. Vol. 9(21), pp. 21958–21970.
4. Tao F., Zhang C.Y., Qi, Q.L. and Zhang H. (2022) Digital twin maturity model. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, vol. 28, pp. 1267–1281.
5. Ismail M, Amal Abdel Gawad. (2023) Revisiting zero-trust security for internet of things. *Sustainable Machine Intelligence Journal*, vol. 3(6), pp 1–8.
6. Adamenko Dmytro, Kunnen Steffen, Nagarajah Arun. (2020) Comparative analysis of platforms for designing a digital twin. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III: Proceedings of the 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing* (Kharkiv, June 9–12, 2020). Kharkiv: Springer International Publishing, pp. 3–12.
7. Jafari Mina, Abdollah Kavousi-Fard, et al. (2023) A review on digital twin technology in smart grid, transportation system and smart city: Challenges and future. *IEEE Access*, vol. 11, pp. 17471–17484.
8. Wang Yuntao, et al. (2023) A survey on digital twins: Architecture, enabling technologies, security and privacy, and future prospects. *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10(17), pp. 14965–14987.
9. Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK605512/> (accessed April 12, 2025).
10. Kamran Iranshahi, Joshua Brun, Tim Arnold, Thomas Sergi, Ulf Christian Müller. (2025) Digital twins: Recent advances and future directions in engineering fields. *Intelligent Systems with Applications*, vol. 26. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200516> (accessed April 20, 2025).
11. Muctadir, H. M., Manrique Negrin, D. A., Gunasekaran, R. et al. (2024) Current trends in digital twin development, maintenance, and operation: an interview study. *Software and Systems Modeling*, vol. 23, pp. 1275–1305. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10270-024-01167-z> (accessed April 21, 2025).