

Ю. Л. ГУНЬКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри харчових технологій та хімії
Луцький національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-1441-9625

О. О. БАЗИЛЬ

кандидат фізико-математичних наук,
старший викладач кафедри комп'ютерних наук
Сумський державний університет
ORCID: 0000-0002-2644-5361

М. І. БАРБАШ

старший викладач кафедри архітектури та дизайну
Національний університет «Чернігівська політехніка»
ORCID: 0000-0003-2784-5030

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СТВОРЕННІ ЦИФРОВИХ БЛИЗНЮКІВ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ

Актуальність дослідження зумовлена інтенсифікацією цифровізації інженерних систем та потребою в обґрунтованих технічних і управлінських рішеннях в умовах ускладнення об'єктів, динамічності режимів їхнього функціонування та обмеженості часу на аналіз. За таких умов традиційні підходи до проектування, моніторингу й експлуатації інженерних систем не забезпечують належної адаптивності, що актуалізує необхідність застосування цифрових близнюків як інструмента інтеграції моделей, даних і аналітичних механізмів управління.

Метою статті є наукове узагальнення та обґрунтування значення інформаційних технологій у створенні цифрових близнюків інженерних систем, а також визначення шляхів оптимізації їхнього застосування для аналізу, моніторингу та управління технічними об'єктами протягом усього життєвого циклу.

Методи дослідження охоплюють системний аналіз сучасних інформаційних технологій, логіко-аналітичне узагальнення архітектурних і функціональних підходів до побудови цифрових близнюків, а також порівняльний аналіз практик цифрового моніторингу, прогнозування та оптимізації інженерних систем.

Результати дослідження. Проаналізовано сучасний стан і тенденції розвитку інформаційних технологій, що застосовуються для створення цифрових близнюків. Узагальнено архітектурні рішення та технологічні компоненти цифрових близнюків із позицій функціональної взаємодії та масштабованості. Досліджено можливості застосування цифрових близнюків у режимі реального часу для моніторингу, прогнозування та оптимізації функціонування інженерних систем. Виявлено основні науково-практичні проблеми їхнього впровадження, пов'язані з якістю даних, точністю моделей, кібербезпекою та інтеграцією з наявною інженерною інфраструктурою. Обґрунтовано доцільність поетапного та модульного підходів до впровадження цифрових близнюків з урахуванням вимог ефективності та надійності.

Висновки. Встановлено, що цифрові близнюки на основі сучасних інформаційних технологій формують прикладну основу адаптивного управління інженерними системами та сприяють підвищенню точності розрахунків і стійкості експлуатаційних рішень. Доведено, що практична ефективність цифрових близнюків визначається архітектурною узгодженістю компонентів, якістю даних і рівнем кіберзахисту.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням методів підвищення стійкості цифрових моделей за неповних і шумних даних, інтеграцією цифрових близнюків з адаптивними алгоритмами аналізу та формуванням уніфікованих підходів до їхнього застосування в складних інженерних системах.

Ключові слова: цифрова трансформація, інженерне моделювання, віртуальні моделі, системна інтеграція, обробка експлуатаційних даних, моніторинг технічного стану, адаптивне управління, прогнозування відмов, життєвий цикл об'єкта.

YU. L. HUNKO

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Food Technology and Chemistry
Lutsk National Technical University
ORCID: 0000-0002-1441-9625

O. O. BAZYL

PhD in Physics and Mathematics,
Senior Lecturer at the Department of Computer Science
Sumy State University
ORCID: 0000-0002-2644-5361

M. I. BARBASH

Senior Lecturer at the Department of Architecture and Design
Chernihiv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0003-2784-5030

INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE DEVELOPMENT OF DIGITAL TWINS FOR ENGINEERING SYSTEMS

The relevance of the research stems from the intensification of digitalization in engineering systems and the need for well-grounded technical and managerial decisions under conditions of increasing system complexity, dynamic operating modes, and limited time for analysis. Under these circumstances, traditional approaches to the design, monitoring, and operation of engineering systems do not provide adequate adaptability, which highlights the importance of using digital twins as a tool for integrating models, data, and analytical control mechanisms.

The purpose of the article is to provide a scholarly synthesis and justification of the role of information technologies in developing digital twins for engineering systems, as well as to identify ways to optimize their application for analysis, monitoring, and control of technical objects throughout the entire life cycle. The research methods include a systematic analysis of modern information technologies, logical and analytical generalization of architectural and functional approaches to building digital twins, and a comparative assessment of practices in digital monitoring, forecasting, and optimization of engineering systems.

Research results. The study analyzes the current state and development trends of information technologies used in the creation of digital twins. Architectural solutions and technological components of digital twins are summarized from the standpoint of functional interaction and scalability. The potential of real-time digital twin applications for monitoring, forecasting, and optimizing the performance of engineering systems is examined. Key scientific and practical challenges associated with data quality, model accuracy, cybersecurity, and integration with existing engineering infrastructure are identified. The feasibility of phased and modular implementation of digital twins is substantiated with regard to requirements of efficiency and reliability.

Conclusions. It is established that digital twins based on modern information technologies form an applied foundation for adaptive management of engineering systems and contribute to improved analytical accuracy and operational resilience. The study demonstrates that the practical effectiveness of digital twins depends on architectural coherence of components, data quality, and the level of cybersecurity. Future research perspectives are linked to the development of methods for enhancing the robustness of digital models under incomplete and noisy data, integrating digital twins with adaptive analytical algorithms, and forming unified approaches to their application in complex engineering systems.

Key words: digital transformation, engineering modeling, virtual models, system integration, operational data processing, technical condition monitoring, adaptive control, failure forecasting, life cycle of an object.

Постановка проблеми

Активна цифровізація інженерних систем у промисловості, енергетиці, будівництві та транспорті зумовлює необхідність переходу від фрагментарного застосування інформаційних технологій до комплексних інтегрованих рішень, здатних забезпечити цілісне відтворення об'єктів упродовж усього життєвого циклу. У цьому контексті концепція цифрових близнюків є особливо актуальною як інструмент, що поєднує комп'ютерне моделювання, сенсорні дані, алгоритми аналізу великих даних і методи штучного інтелекту (далі – ШІ) для динамічного відображення стану й поведінки реальних інженерних систем. Водночас відсутність уніфікованих підходів до створення та інтеграції цифрових близнюків, а також складність забезпечення точності моделей і синхронізації з фізичними об'єктами обмежують практичну ефективність їхнього застосування.

Проблема використання інформаційних технологій у створенні цифрових близнюків тісно пов'язана з важливими науковими та практичними завданнями, зокрема з розвитком методів системного моделювання складних технічних об'єктів, підвищенням точності прогнозування їхнього функціонування та обґрунтування управлінських рішень у режимі реального часу. У практичному вимірі це завдання охоплює оптимізацію експлуатаційних

витрат, підвищення надійності та безпеки інженерних систем, зниження ризиків відмов та аварій, а також підтримку процесів модернізації та післякризового відновлення інфраструктури. Таким чином, наукове обґрунтування та методичне забезпечення застосування сучасних інформаційних технологій у створенні цифрових близнюків є необхідною умовою підвищення ефективності управління інженерними системами та реалізації стратегічних завдань інноваційного розвитку в умовах технологічних і структурних трансформацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд сучасних досліджень свідчить про формування чотирьох взаємопов'язаних наукових напрямів, у межах яких послідовно розкривається еволюція цифрових близнюків як складних інформаційно-технологічних систем. Перший напрям пов'язаний із концептуалізацією та методологічним осмисленням цифрових близнюків інженерних систем. У своїй праці Р. Сакс (R. Sacks) та співавтори визначають цифровий близнюк як даноорієнтовану інформаційну систему, що інтегрує проєктні, експлуатаційні та сенсорні дані протягом життєвого циклу інженерних об'єктів [1]. Сучасні підходи до визначення цифрових близнюків систематизують М. Г. Хуарес (M. G. Juarez) та співавтори, які акцентують на методологічних викликах синхронізації фізичних і віртуальних компонентів [2]. С. Міхай (S. Mihai) та співавтори аналізують цифрові близнюки крізь призму сукупності основних інформаційних технологій, зокрема інтернету речей, великих даних, ШІ та хмарних обчислень, що створює цілісне уявлення про їхню технологічну основу [3]. Роль математичного моделювання та симуляцію в реальному часі як важливого елемента функціонування цифрових близнюків інженерної динаміки підкреслюють Д. Дж. Вагг (D. J. Wagg) та співавтори [4].

Другий напрям охоплює архітектурні рішення та інформаційні технології реалізації цифрових близнюків. Так, Л. Каптовс (L. Kaptosv) демонструє потенціал використання RESTful API, TypeScript і Laravel для створення масштабованих геоінформаційних платформ, придатних для інтеграції з цифровими близнюками інженерних систем [5]. Концепцію системно-інформаційних моделей цифрових близнюків розвивають М. Корабльов (M. Korablyov) та співавтори, підкреслюючи визначальну роль структурованої моделі даних і формалізованої взаємодії між підсистемами [6]. Питання інформаційної сумісності та візуальної аналітики складних інженерних об'єктів вивчають В. Ван (W. Wang) та співавтори. Вони аналізують інтеграцію BIM-інформації й VR-моделей у цифрові близнюки в контексті Industry 5.0 [7]. Р. Аль-Сехраві (R. Al-Sehrawy) та Б. Кумар (B. Kumar) систематизують архітектурні підходи до впровадження цифрових близнюків у сфері архітектури, інженерії та будівництва, наголошуючи на необхідності стандартизації програмно-інформаційних рішень [8].

Третій напрям зосереджений на практичній реалізації цифрових близнюків для аналізу, моніторингу та оптимізації інженерних систем. Г. Рижакова (G. Ryzhakova) та співавтори доводять ефективність використання інформаційної системи цифрового близнюка (digital twin information system) у проєктному менеджменті будівництва, акцентуючи на інтеграції інформаційних потоків і управлінні ресурсами [9]. Потенціал цифрових близнюків у системній інженерії охорони здоров'я, де IT-рішення уможливають моделювання складних інженерно-організаційних процесів, демонструють Н. Мохамед (N. Mohamed) та співавтори [10]. Концепцію когнітивних цифрових близнюків для розумних міст, яка ґрунтується на персоналізованій обробці даних та прогнозуванні функціонування інженерних інфраструктур, презентують Дж. Ду (J. Du) та співавтори [11]. Практичну реалізацію цифрових близнюків через методи системної інженерії (model-based systems engineering) досліджують Дж. Бікфорд (J. Bickford) та співавтори, наголошуючи на значущості формалізованих моделей для практичного впровадження IT-рішень [12].

Четвертий напрям сфокусований на проблемах інформаційної безпеки, якості даних та управлінської інтеграції цифрових близнюків. У дослідженні І. Р. Опірського та співавторів проаналізовано технічні аспекти шифрування даних у мобільних середовищах Android, які мають важливе значення для захисту інформації цифрових близнюків [13]. С. Поперегняк (S. Poperehnyak) та співавтори вивчають застосування сенсорних джерел ентропії для підвищення криптографічної стійкості інформаційних систем, релевантних для цифрових платформ інженерних систем [14]. Цифровий близнюк як елемент концепції системи систем (system-of-systems) розглядають М. Дітц (M. Dietz) та Г. Пернул (G. Pernul), акцентуючи на управлінні інформаційною взаємодією між гетерогенними підсистемами [15].

Попри активний розвиток досліджень у сфері цифрових близнюків інженерних систем, наукові праці містять низку нерозв'язаних проблем. Зокрема, не сформовано комплексного підходу до узгодженого застосування інформаційних технологій протягом усього життєвого циклу інженерних систем; недостатньо опрацьовано питання архітектурної масштабованості та функціональної взаємодії компонентів цифрових близнюків; фрагментарним є дослідження їхнього застосування в режимі реального часу; обмежено висвітлено вплив основних чинників, зокрема якості даних, точності моделей, кібербезпеки та інтеграції з наявною інфраструктурою на практичну ефективність цифрових рішень.

Запропоноване дослідження спрямоване на заповнення цих прогалів шляхом системного аналізу сучасних інформаційних технологій, узагальнення архітектурних і функціональних підходів до створення цифрових близнюків, дослідження можливостей їхнього застосування для моніторингу, прогнозування та оптимізації інженерних

систем, а також обґрунтування практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності та надійності їхнього впровадження.

Формулювання мети дослідження

Мета статті – науково обґрунтувати роль і можливості інформаційних технологій у створенні цифрових близнюків інженерних систем, а також визначити шляхи підвищення ефективності їхнього застосування для моделювання, моніторингу й управління технічними об’єктами протягом усього життєвого циклу.

Для досягнення цієї мети необхідно розв’язати такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан та основні напрями розвитку інформаційних технологій та архітектурних підходів до створення цифрових близнюків інженерних систем.
2. Дослідити потенціал застосування цифрових близнюків для моніторингу, прогнозування й оптимізації роботи інженерних систем у режимі реального часу.
3. Визначити основні науково-практичні проблеми впровадження цифрових близнюків та обґрунтувати шляхи підвищення ефективності та надійності їхнього застосування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Сучасний розвиток інформаційних технологій у сфері створення цифрових близнюків інженерних систем характеризується переходом від окремих програмних інструментів до комплексних цифрових платформ, що інтегрують моделі, експлуатаційні дані та аналітичні механізми. Цифровий близнюк є динамічною віртуальною репрезентацією інженерного об’єкта, яка безперервно синхронізується з його фізичним прототипом на основі даних сенсорного моніторингу та автоматизованих систем управління. До основних тенденцій належать хмарні обчислення, що забезпечують масштабованість, впровадження методів аналітики великих даних і машинного навчання для прогнозування станів систем, а також розвиток міжплатформної інтеграції, що забезпечує сумісність різнорідних технічних і програмних компонентів (табл. 1).

Таблиця 1

Інформаційні технології у створенні цифрових близнюків інженерних систем

Інформаційна технологія	Функціональна роль у цифровому близнюку	Приклад застосування
Сенсорні мережі та інтернет речей	Забезпечення безперервного збору експлуатаційних даних	Контроль температури, тиску та вібрацій обладнання
Комп’ютерне та імітаційне моделювання	Відтворення фізичних, динамічних і технологічних процесів	Перевірка режимів навантаження інженерних систем
Хмарні та гібридні обчислення	Обробка, зберігання й масштабування даних і моделей	Централізоване управління цифровими близнюками
Аналітика великих даних і машинне навчання	Прогнозування, виявлення аномалій та оптимізація процесів	Прогноз відмов і планування технічного обслуговування
Платформи інтеграції та інтерфейси програмних застосунків (Application Programming Interface, API)	Узгодження різнорідних інформаційних джерел	Створення єдиного цифрового інформаційного простору

Джерело: сформовано на основі [3, р. 2261; 1; 2; 7; 12, р. 728–729]

Застосування інформаційних технологій у створенні цифрових близнюків інженерних систем ґрунтується на поєднанні інструментів збору експлуатаційних даних, обчислювального моделювання та алгоритмів аналітичної обробки для розв’язання складних інженерних задач. Цифровий близнюк є інженерною моделлю, яка забезпечує аналіз технічного стану, перевірку робочих режимів і обґрунтування управлінських рішень на основі фактичних параметрів функціонування системи. IT-рішення уможливають оперативне оновлення моделей відповідно до змін експлуатаційних умов, що підвищує точність інженерних розрахунків і мінімізує невизначеність під час ухвалення рішень. У промислових та енергетичних системах практична реалізація цифрових близнюків ґрунтується на використанні даних сенсорного моніторингу для калібрування математичних і імітаційних моделей обладнання [3, р. 2261]. Такий підхід доцільний для визначення граничних режимів роботи, визначення зносу окремих елементів та прогнозування відмов на основі аналізу динаміки параметрів (температури, тиску, вібрацій і навантажень). Це дає змогу інженерним службам перейти від регламентного технічного обслуговування до станорієнтованого, що знижує експлуатаційні витрати та істотно підвищує надійність систем.

У будівництві та інфраструктурних проєктах цифрові близнюки застосовуються для аналізу напружено-деформованого стану конструкцій, визначення впливу експлуатаційних і середовищних чинників та перевірки ефективності проєктних і реконструктивних рішень [7]. Інтеграція розрахункових моделей із фактичними даними обстежень дає змогу уточнити граничні показники безпеки та визначити пріоритети ремонтних робіт. У транспортних і комунальних системах цифрові близнюки слугують для прогнозування навантажень, оптимізації робочих режимів та аналізу сценаріїв аварійних ситуацій. Отже, інформаційні технології в межах цифрових близнюків

інженерних систем реалізують основну прикладну інженерну функцію, спрямовану на підвищення точності розрахунків, надійності експлуатації та оптимізацію управління технічними об'єктами, що підтверджує їхню визначальну роль у сучасній інженерній практиці.

Архітектурні рішення цифрових близнюків інженерних систем спрямовані на забезпечення узгодженої роботи обчислювальних моделей, аналітичних механізмів і засобів управління у єдиному цифровому просторі. За сучасних умов важливим є перехід до модульних і масштабованих архітектур, що дають змогу поєднувати моделі різної деталізації, адаптувати обчислювальні ресурси до складності об'єкта та забезпечувати розширення функціональності без перебудови всієї системи (табл. 2).

Таблиця 2

Архітектурні компоненти цифрових близнюків та їхня роль у функціональній взаємодії

Компонент архітектури	Основне призначення	Практична функція
Рівень даних	Формування узгоджених наборів експлуатаційних і проєктних даних	Забезпечення актуальності розрахунків
Обчислювальне ядро	Реалізація математичних та імітаційних моделей	Аналіз режимів і сценаріїв роботи
Аналітичні модулі	Обробка результатів і формування інженерних висновків	Підтримка рішень і прогнозування
Інтеграційний контур	Обмін інформацією із зовнішніми системами	Узгодження локальних і системних рішень
Користувачський інтерфейс	Представлення результатів і керування моделями	Інженерний і управлінський контроль

Джерело: сформовано на основі [6, р.104; 15, р.180–181; 8, р. 926; 12, р.731]

У проєктуванні та експлуатації інженерних систем архітектура цифрового близнюка визначає його здатність функціонувати як універсальний інструмент інженерного аналізу, а не лише засіб візуалізації. Модульність архітектури сприяє автономній роботі обчислювального ядра та аналітичних підсистем, що має вирішальне значення для застосування цифрових близнюків на всіх фазах життєвого циклу інженерного об'єкта: від проєктування до експлуатації та модернізації. Це дає змогу уточнювати розрахункові моделі без зупинення системи та без втрати узгодженості результатів. У промисловій практиці ця архітектура уможливорює паралельне використання детальних моделей критичних вузлів зі спрощеними агрегованими моделями на системному рівні [6, р. 104]. Такий підхід дає змогу оцінити вплив змін режимів роботи окремих елементів на загальну ефективність виробничого процесу. В інфраструктурних і будівельних системах інтеграція обчислювального ядра з аналітичними модулями дає змогу зіставляти проєктні розрахунки з фактичними показниками експлуатації, що є основою для контролю запасів міцності, аналізу деформацій та планування ремонтних заходів [12, р. 731]. Інтеграційний контур архітектури гарантує практичне впровадження цифрових близнюків як елемента складніших управлінських систем, зокрема диспетчеризації, управління активами та технічного обслуговування. У транспортних і міських інженерних системах це дає змогу об'єднувати локальні цифрові близнюки окремих об'єктів у єдиний цифровий простір для здійснення сценарного аналізу навантажень, відмов і аварійних ситуацій. Отже, архітектура цифрових близнюків безпосередньо формує їхню практичну значущість як інструмента технічного аналізу, прогнозування та обґрунтування інженерних і управлінських рішень у сучасних умовах.

Застосування цифрових близнюків у режимі реального часу спрямоване на розв'язання прикладних інженерних завдань, пов'язаних із контролем поточного стану, прогнозуванням динаміки параметрів і оптимізацією режимів функціонування складних технічних систем. На відміну від статичних чи періодично оновлюваних моделей, цифрові близнюки реального часу забезпечують безперервне коригування розрахункових параметрів на основі оперативних даних, отриманих під час експлуатації. Це дає змогу своєчасно виявляти критичні відхилення, оцінювати вплив управлінських рішень до їхньої практичної реалізації та адаптації режимів роботи інженерних систем до змінних умов без втрати стабільності (табл. 3).

Таблиця 3

Функціональні можливості цифрових близнюків у режимі реального часу

Функціональна функція	Інженерне призначення	Результат застосування
Оперативний моніторинг	Контроль поточного технічного стану	Своєчасне виявлення відхилень
Прогнозування станів	Оцінка динаміки параметрів у часі	Запобігання відмовам
Оптимізація режимів	Підбір ефективних параметрів роботи	Зниження втрат і витрат
Сценарний аналіз	Перевірка альтернативних управлінських рішень	Обґрунтування вибору дій
Адаптація управління	Коригування режимів у режимі реального часу	Підвищення стійкості систем

Джерело: сформовано на основі [4; 9, р. 21; 10, р. 69845; 11]

Упровадження цифрових близнюків у режимі реального часу здійснюється через інтеграцію обчислювальних моделей з потоковими експлуатаційними даними, що забезпечує безперервний аналіз роботи інженерної системи. Такий підхід забезпечує перехід від постфактум-аналізу до постійного моніторингу просторово-часової динаміки параметрів, зокрема навантажень, температурних і вібраційних характеристик, енергоспоживання та пропускної здатності. Актуалізація моделей у реальному часі збільшує їхню прогностичну точність і створює основу для перевірки управлінських дій до їхньої фізичної реалізації.

Для складних виробничих комплексів цифрові близнюки застосовуються для узгодження локальної оптимізації окремих процесів із забезпеченням глобальної ефективності системи [4]. На рівні обладнання вони дають змогу оцінити допустимі режими роботи з урахуванням фактичного технічного стану, тоді як на системному рівні – проаналізувати наслідки перерозподілу навантажень чи зміни технологічних параметрів. В енергетичних і комунальних мережах прогностичні можливості цифрових близнюків застосовуються для нівелювання пікових навантажень, аналізу стійкості системи та мінімізації втрат ресурсів шляхом адаптивного керування.

У транспортних, інфраструктурних і інженерно-будівельних системах цифрові близнюки реального часу забезпечують підтримку оперативних рішень у ситуаціях із підвищеною невизначеністю. Сценарне моделювання потенційних збоїв, перевантажень або аварійних режимів дає змогу визначати найефективніші стратегії реагування та мінімізувати технічні й економічні наслідки порушень [10, р. 69847]. Таким чином, застосування цифрових близнюків для моніторингу, прогнозування та оптимізації в реальному часі створює передумови для переходу до адаптивного управління інженерними системами, спрямованого на зростання їхньої надійності, стійкості та ресурсної ефективності.

Упровадження цифрових близнюків інженерних систем супроводжується комплексом науково-практичних викликів, які обмежують їхню надійність, масштабованість і прикладну цінність у реальних умовах експлуатації. Однією з основних проблем є якість і репрезентативність експлуатаційних даних, необхідних для створення та актуалізації моделей. Нерівномірне надходження даних, наявність пропусків, шумів і систематичних похибок сенсорних вимірювань негативно впливають на коректність калібрування цифрових близнюків і можуть призводити до викривлення результатів прогнозування та оптимізації режимів роботи інженерних систем [3, р. 2262]. Іншим важливим викликом є обмежена точність цифрових моделей, що виникає через спрощення фізичних, технологічних або структурних процесів для зниження обчислювальної складності. У складних інженерних системах із нелінійною динамікою та множинними взаємозв'язками навіть незначні модельні допущення можуть призводити до накопичення похибок у довгострокових прогнозах, що підриває довіру до цифрових близнюків як інструмента підтримки управлінських рішень і ускладнює верифікацію та валідацію моделей в умовах нестабільної експлуатації [4]. Окрема група проблем стосується гарантування кібербезпеки цифрових близнюків, які функціонують в умовах інтенсивного обміну даними та глибокої інтеграції із зовнішніми інформаційними системами. Уразливість каналів передавання інформації, можливість несанкціонованого доступу та ризики маніпуляції даними й моделями становлять додаткові загрози для безпеки інженерних систем, особливо для критичної інфраструктури, що вимагає поєднання інженерних та криптографічних підходів до захисту цифрових платформ [13, с. 222].

Значні труднощі виникають під час інтеграції цифрових близнюків із наявною інженерною інфраструктурою, яка часто ґрунтується на застарілих технічних рішеннях та несумісних форматах даних. Відсутність єдиних стандартів опису моделей, інтерфейсів обміну та протоколів взаємодії ускладнює масштабування цифрових близнюків і їхнє застосування на рівні складних інженерних комплексів. Усі зазначені проблеми свідчать про необхідність подальших наукових досліджень і методичних розробок, спрямованих на підвищення об'єктивності, безпеки та практичної значущості цифрових близнюків у сучасних інженерних системах.

Оптимізацію застосування інформаційних технологій під час створення та використання цифрових близнюків інженерних систем доцільно зосередити на забезпечення їхньої прикладної ефективності, надійності та довгострокової експлуатаційної стійкості. Основним практичним орієнтиром є поетапне впровадження цифрових близнюків із чітким окресленням інженерних завдань, які вони мають розв'язувати на кожному етапі життєвого циклу системи, що дає змогу уникнути надмірної складності моделей та гарантувати відповідність витрат отриманим результатам. Зростання ефективності цифрових близнюків вимагає системного підходу до управління даними, зокрема впровадження процедур контролю якості, уніфікації форматів і синхронізації часових параметрів. Практично доцільним є комбінування детальних моделей критичних елементів інженерних систем зі спрощеними представленими допоміжними процесів, що мінімізує обчислювальне навантаження без шкоди для об'єктивності результатів. Важливою рекомендацією є регулярна верифікація та оновлення моделей на основі фактичних експлуатаційних показників, що збільшує їхню прогностичну цінність та прикладну надійність. Гарантування надійності застосування цифрових близнюків потребує інтеграції технічних і організаційних заходів із кібербезпеки, зокрема сегментації доступу до моделей, захисту каналів передачі даних і моніторингу змін у цифрових середовищах. Це особливо актуально для важливих інженерних систем, де цифрові близнюки безпосередньо впливають на управлінські та експлуатаційні рішення. Рекомендовано також використання модульних

і масштабованих архітектур, які дають змогу адаптувати функціональність цифрового близнюка до змін вимог та умов експлуатації без втрати системної цілісності. Отже, застосування інформаційних технологій у створенні й експлуатації цифрових близнюків має бути спрямоване на досягнення балансу між точністю моделей, обсягами оброблюваних даних та рівнем управлінської корисності, що гарантує ефективне та надійне використання цифрових близнюків як інструмента сучасної інженерної діяльності.

Висновки

Встановлено, що інформаційні технології уможливають створення цифрових близнюків інженерних систем як інтегрованого інструмента моніторингу, прогнозування та оптимізації їхньої роботи протягом життєвого циклу. Обґрунтовано, що практична цінність цифрових близнюків залежить від узгодженості архітектурних рішень, масштабованості моделей і можливості адаптації до змінних умов експлуатації, що підвищує обґрунтованість інженерних і управлінських рішень.

Визначено, що основними викликами впровадження цифрових близнюків є обмежена якість і повнота експлуатаційних даних, необхідність компромісу між точністю моделей та обчислювальною складністю, проблеми верифікації результатів, підвищені вимоги до кібербезпеки та труднощі інтеграції з наявною інженерною інфраструктурою. Обґрунтовано, що ігнорування цих чинників знижує надійність цифрових близнюків і обмежує їхнє практичне застосування.

Запропоновано орієнтувати застосування інформаційних технологій під час створення цифрових близнюків на поетапне впровадження, регулярну верифікацію моделей на основі фактичних даних, використання модульних масштабованих архітектур та комплексне застосування технічних та організаційних заходів кіберзахисту. Перспективи подальших досліджень пов'язані з підвищенням стійкості цифрових моделей в умовах неповних даних, інтеграцією цифрових близнюків з адаптивними алгоритмами аналізу та формуванням уніфікованих підходів до їхнього застосування в інженерних системах.

Список використаної літератури

1. Sacks R., Brilakis I., Pikas E., Xie H. S., Girolami M. Construction with digital twin information systems. *Data-Centric Engineering*. 2020. Vol. 1. Article e14. DOI: <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>
2. Juarez M. G., Botti V. J., Giret A. S. Digital twins: Review and challenges. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2021. Vol. 21, № 3. Article 030802. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4050244>
3. Mihai S., Yaqoob M., Hung D. V., Davis W., Towakel P., Raza M., Nguyen H. X. Digital twins: A survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2022. Vol. 24, № 4. P. 2255–2291. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3208773>
4. Wagg D. J., Worden K., Barthorpe R. J., Gardner P. Digital twins: State-of-the-art and future directions for modeling and simulation in engineering dynamics applications. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 6, № 3. Article 030901. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4046739>
5. Kaptsov L. RESTful API Design for Geospatial Logistics Platforms Using Type Script and Laravel. *Journal of Information, Technology and Policy*. 2025. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.62836/jitp.2025.515>
6. Korablyov M., Lutsky S., Ivanisenko I., Fomichov O. System-Information Models of Digital Twins. *Y: Proceedings of the International Conference on WorldS4*. 2023. Singapore: Springer Nature Singapore. P. 101–109. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-8031-4_10
7. Wang W., Guo H., Li X., Tang S., Li Y., Xie L., Lv Z. BIM information integration based VR modeling in digital twins in Industry 5.0. *Journal of Industrial Information Integration*. 2022. Vol. 28. Article 100351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100351>
8. Al-Schrawy R., Kumar B. Digital twins in architecture, engineering, construction and operations: A brief review and analysis. *Y: Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*. 2020. Cham: Springer International Publishing. P. 924–939. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_64
9. Ryzhakova G., Malykhina O., Pokolenko V., Rubtsova O., Homenko O., Nesterenko I., Honcharenko T. Construction project management with digital twin information system. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2022. Vol. 12, № 10. P. 19–28. DOI: https://doi.org/10.46338/ijetae1022_03
10. Mohamed N., Al-Jaroodi J., Jawhar I., Kesserwan N. Leveraging digital twins for healthcare systems engineering. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 69841–69853. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3292119>
11. Du J., Zhu Q., Shi Y., Wang Q., Lin Y., Zhao D. Cognition digital twins for personalized information systems of smart cities: Proof of concept. *Journal of Management in Engineering*. 2020. Vol. 36, № 2. Article 04019052. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000740](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000740)
12. Bickford J., Van Bossuyt D. L., Beery P., Pollman A. Operationalizing digital twins through model-based systems engineering methods. *Systems Engineering*. 2020. Vol. 23, № 6. P. 724–750. DOI: <https://doi.org/10.1002/sys.21559>

13. Опірський І. Р., Хохлячова Ю. Є., Стефанків А. В., Шевчук Ю. А. Аналіз технічних особливостей реалізації шифрування даних на SD-картах в Android. *Сучасний захист інформації*. 2025. Вип. 1, № 61. С. 219–228. DOI: <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2025.016526>

14. Poperehnyak S., Syvachenko I., Shevchuk Y. Enhancing pseudorandom number generation using environmental sensor-based entropy sources. *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems (CPITS 2025): Proceedings of the Workshop*. 2025. Vol. 3991. P. 363–380. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3991/paper26.pdf> (date of access: 06.12.2025).

15. Dietz M., Pernul G. Digital Twin: Empowering Enterprises Towards a System-of-Systems Approach. *Business & Information Systems Engineering*. 2020. Vol. 62, № 2. P. 179–184. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12599-019-00624-0>

References

1. Sacks R., Brilakis I., Pikas E., Xie H. S., Girolami M. (2020) Construction with digital twin information systems. *Data-Centric Engineering*, vol. 1, article e14. <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>

2. Juarez M. G., Botti V. J., Giret A. S. (2021) Digital twins: Review and challenges. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 21, no. 3, article 030802. <https://doi.org/10.1115/1.4050244>

3. Mihai S., Yaqoob M., Hung D. V., Davis W., Towakel P., Raza M., Nguyen H. X. (2022) Digital twins: A survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 4, pp. 2255–2291. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3208773>

4. Wagg D. J., Worden K., Barthorpe R. J., Gardner P. (2020) Digital twins: State-of-the-art and future directions for modeling and simulation in engineering dynamics applications. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, vol. 6, no. 3, article 030901. <https://doi.org/10.1115/1.4046739>

5. Kaptosv L. (2025) RESTful API Design for Geospatial Logistics Platforms Using Type Script and Laravel. *Journal of Information, Technology and Policy*, pp. 1–13. <https://doi.org/10.62836/jitp.2025.515>

6. Korablyov M., Lutskyy S., Ivanisenko I., Fomichov O. (2023) System-Information Models of Digital Twins. In *Proceedings of the International Conference on WorldS4* (pp. 101–109). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8031-4_10

7. Wang W., Guo H., Li X., Tang S., Li Y., Xie L., Lv Z. (2022) BIM information integration based VR modeling in digital twins in Industry 5.0. *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 28, article 100351. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100351>

8. Al-Schrawy R., Kumar B. (2020) Digital twins in architecture, engineering, construction and operations: A brief review and analysis. In *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering* (pp. 924–939). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_64

9. Ryzhakova G., Malykhina O., Pokolenko V., Rubtsova O., Homenko O., Nesterenko I., Honcharenko T. (2022) Construction project management with digital twin information system. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 12, no. 10, pp. 19–28. https://doi.org/10.46338/ijetae1022_03

10. Mohamed N., Al-Jaroodi J., Jawhar I., Kesserwan N. (2023) Leveraging digital twins for healthcare systems engineering. *IEEE Access*, vol. 11, pp. 69841–69853. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3292119>

11. Du J., Zhu Q., Shi Y., Wang Q., Lin Y., Zhao D. (2020) Cognition digital twins for personalized information systems of smart cities: Proof of concept. *Journal of Management in Engineering*, vol. 36, no. 2, article 04019052. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000740](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000740)

12. Bickford J., Van Bossuyt D. L., Beery P., Pollman A. (2020) Operationalizing digital twins through model-based systems engineering methods. *Systems Engineering*, vol. 23, no. 6, pp. 724–750. <https://doi.org/10.1002/sys.21559>

13. Opirskiy I. R., Khokhlachova Yu. Ye., Stefankiv A. V., Shevchuk Yu. A. (2025) Analiz tekhnichnykh osoblyvostei realizatsii shifruvannia danykh na SD-kartakh v Android [Analysis of technical features of data encryption implementation on SD cards in Android]. *Suchasnyi zakhyst informatsii*, vol. 1, no. 61, pp. 219–228. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2025.016526> [in Ukrainian]

14. Poperehnyak S., Syvachenko I., Shevchuk Y. (2025) Enhancing pseudorandom number generation using environmental sensor-based entropy sources. In *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems (CPITS 2025): Proceedings of the Workshop* (Vol. 3991, pp. 363–380). Available at: <https://ceur-ws.org/Vol-3991/paper26.pdf> (date of access: 06.12.2025)

15. Dietz M., Pernul G. (2020) Digital Twin: Empowering Enterprises Towards a System-of-Systems Approach. *Business & Information Systems Engineering*, vol. 62, no. 2, pp. 179–184. <https://doi.org/10.1007/s12599-019-00624-0>

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025