

Ю. В. МАКСИМ'ЮК

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри будівельної механіки
Київський національний університет будівництва і архітектури
ORCID: 0000-0002-5814-6227

К. В. ДМИТРИЄВ

аспірант кафедри будівельної механіки
Київський національний університет будівництва і архітектури
ORCID: 0009-0004-0617-4017

М. М. ЧЕРНЕНКО

аспірант кафедри будівельної механіки
Київський національний університет будівництва і архітектури
ORCID: 0009-0003-9465-459X

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЧИМИ ПРОЦЕСАМИ В УКРАЇНСЬКІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

У статті досліджено сутність і роль цифрових двійників в управлінні виробничими процесами та узагальнено їхнє значення для поліпшення управління в промисловості України. На основі аналізу сучасних наукових підходів створено чіткий контур «дані – моделі – рішення», де цифровий двійник є каналом для перетворення поточкових даних виробництва у формальні оцінки стану, прогнози та дії. Запропоновано багатошарову структуру, яка поєднує інфраструктуру промислового інтернету речей із рівнями моделей (фізично-орієнтованих, дано-орієнтованих і гібридних) та сервісами підтримки рішень, інтегрованими з MES/SCADA/APS. Показано механізми замикання контуру «план – факт» у диспетчеризації, локалізації рішень на рівні вузлів і діляниць, ураховано енергетичну складову в розклади та технологічні режими. Сформовано вимоги до ідентифікаторів, подій, атрибутів та політик доступу як умова для трасування управлінських дій. Дані досліджень і виробничі кейси демонструють, що застосування цифрових двійників зменшує простоту обладнання та діляниць, стабілізує такт ліній і операцій, знижує споживання електроенергії та інших енергоресурсів, скорочує переробки й брак, підвищує точність виконання виробничого плану. У сукупності це дає змогу посилити операційний контроль і зменшити собівартість одиниці продукції. Новизна роботи полягає в акцентуванні на ефективності управління, уніфікації термінів і ролей двійника в контексті керування й уточненні зв'язку виходів моделей із KPI підприємства. Охарактеризовано обмеження впровадження цифрових двійників, зокрема неоднорідність спадкової інфраструктури, нестачу стандартних інтерфейсів, невизначеність у змішаному моделюванні ризиків кібербезпеки. Запропоновано подальші напрями дослідження та використання цифрових двійників: профілювання архітектури під типові виробничі сценарії, методики атрибуції ефектів до управлінських рішень, керування невизначеністю моделей, інтеграцію енергетичних двійників у розклади та галузеві пілоти для масштабування.

Ключові слова: цифровий двійник, управління виробничими процесами, Індустрія 4.0, прогнозне керування, українська промисловість.

YU. V. MAKSYMIOUK

Doctor of Science (Engineering), Professor,
Professor at the Department of Structural Mechanics
Kyiv National University of Construction and Architecture
ORCID: 0000-0002-5814-6227

K. V. DMYTRIEV

Postgraduate Student at the Department of Structural Mechanics
Kyiv National University of Construction and Architecture
ORCID: 0009-0004-0617-4017

M. M. CHERNENKO

Postgraduate Student at the Department of Structural Mechanics

Kyiv National University of Construction and Architecture

ORCID: 0009-0003-9465-459X

USING DIGITAL TWINS TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF PRODUCTION PROCESS MANAGEMENT IN UKRAINIAN INDUSTRY

The article examines the essence and role of digital twins in managing production processes and synthesizes their significance for improving management in the Ukrainian industry. Based on an analysis of contemporary scholarly approaches, it establishes a precise «data – models – decisions» loop, in which the digital twin is viewed as a channel for converting streaming production data into formal state estimates, forecasts, and control actions. A multilayer architecture is proposed that combines Industrial Internet of Things (IIoT) infrastructure with tiers of models (physics-based, data-driven, and hybrid) and decision-support services integrated with MES/SCADA/APS. Mechanisms are demonstrated for closing the «plan – actual» loop in dispatching, localizing decisions at the machine and work-cell levels, and embedding energy constraints into schedules and operating regimes. Requirements are formulated for identifiers, events, attributes, and access policies to support tracing managerial actions. Research data and industrial case studies show that applying digital twins reduces equipment and cell downtime, stabilizes line and operation cycle time, lowers electricity and other energy consumption, decreases rework and scrap, and improves adherence to the production plan; taken together, these effects strengthen operational control and reduce unit cost. The novelty lies in the focus on management efficiency, the harmonization of terminology and twin roles in the control context, and the clarification of links between model outputs and enterprise KPIs. The limitations of implementing digital twins include heterogeneous legacy infrastructure, a lack of standard interfaces, uncertainty in hybrid modeling, and cybersecurity risks. The paper proposes further directions for research and deployment: profiling the architecture for typical production scenarios; methods for attributing effects to managerial decisions; managing model uncertainty; integrating energy twins into scheduling; and sectoral pilots for scaling.

Key words: digital twin, production process management, Industry 4.0, predictive management, Ukrainian industry.

Постановка проблеми

Сучасні системи управління виробничими процесами потребують узгодженого інформаційного контуру «дані – моделі – рішення», однак у науковій і нормативній площинах простежуються розбіжності, оскільки дефініції цифрового двійника часто сплутують зі спорідненими концептами, застосування стандартів нерідко подають фрагментарно, а вплив двійника описують переважно через технологічні індикатори (ОЕЕ, простоті, якість), а не через логіку саме управлінської ефективності. Для українського промислового контексту ці аспекти ускладнюють теоретичне обґрунтування ролі цифрових двійників у підвищенні керованості виробничих процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Орієнтуючись на сучасні енергетичні та ресурсні обмеження, цифрові двійники у фаховій літературі розглядають як науково обґрунтований механізм узгодження даних, моделей та управлінських дій у виробництві.

Початково узагальнені уявлення про зміст та управлінську доцільність двійників систематизовано в працях S. Attaran, M. Attaran, B. G. Celik, де через призму виробничих індикаторів окреслено відмежування цього підходу від традиційних моделей і його зв'язок з операційними рішеннями [1]. Концептуальний каркас «дані – модель – застосування», запропонований I. Onaji, D. Tiwari, P. Soulatiantork, B. Song, A. Tiwari, демонструє, як поєднуються рівні спостереження, моделювання та керування для підтримки рішень на лінії та в цеху [2]. У нормативному вимірі місце двійника в системі термінів, ролей та інтерфейсів формалізує International Organization for Standardization у межах ISO 23247-1, що задає узгоджені поняття й вимоги до сумісності [3]. На операційному рівні роль двійника в плануванні та диспетчеризації пояснюють висновки M. Macchi, L. Ragazzini, E. Negri, де контур «план – факт» збігається з моделлю пропускнуої здатності та станів обладнання [4]. З енергетичної перспективи вплив на керованість процесу конкретизують результати A. Billey, T. Wuest, які показують, як енергетичні двійники координують режими роботи з профілями навантаження і витрат [5].

У сфері гарантоздатної інженерії підходи до побудови двійників для промислового середовища з підвищеними ОТ-запитами систематизують В. Р. Щеглов, О. І. Морозова, окреслюючи архітектурні рішення та вимоги до надійності [6]. У застосуванні на рівні вузла можливість локальної стабілізації параметрів і замикання контуру керування ілюструє концепція інтелектуального шпинделя, викладена С. П. Сапоном [7]. У праці М. В. Філіппової, М. О. Демченко, О. В. Філіппова, С. В. Заєця обґрунтовано, як цифровий двійник для складального виробництва формалізує дані виробу й процесу та синхронізується з операціями, підсилюючи планування і виявлення помилок. Проте фокус дослідження на проектно-конструкторському рівні без зв'язку з управлінськими показниками та ієрархією рівнів створює теоретичну прогалину [8]. Кількісні підходи до перевірки впливу двійника на керованість процесу описують К. Бровко, П. Буданов, О. Великогорський, Н. Винокурова, які унаочнюють відношення між моделлю та якістю управлінських рішень у полі [9]. Додаткову аргументацію архітектурних

принципів ієрархії «дані – модель – керування» дає побудова двійника процесу лиття на виробничих даних, показана V. S. Doroshenko, V. P. Kravchenko, O. V. Tokova [10]. У ширшому промисловому контексті інтеграцію моделей із просторовими представленнями та сценаріями відновлення інфраструктури презентують В. Титаренко, С. Костецька, К. Бабік, А. Дворнік, П. Юрко [11]. З економічно-управлінського боку вплив двійників на організаційні параметри ефективності у вітчизняних галузях узагальнюють Л. В. Мазник, К. В. Жуковська [12]. Нарешті, покрокове теоретичне оформлення моделі для процесу складання та її метричну верифікацію подає О. В. Філіппов, що замикає логіку переходу від дефініції та архітектури до управлінського обґрунтування [13].

Підсумовуючи огляд, виокремимо три головні невирішені аспекти загальної проблеми. По-перше, не уніфіковано дефініційний апарат цифрових двійників і чітко не визначено їхнє місце в системі стандартів управління виробничими процесами. По-друге, відсутня цілісна теоретична схема архітектури «дані – моделі – рішення» з узгодженими рівнями керування та прозорим механізмом підтримки управлінських рішень. По-третє, досі немає достатнього синтезу наукових результатів щодо впливу цифрових двійників саме на ефективність управління в умовах української промисловості. Вказані питання є фокусом вивчення цієї статті.

Формулювання мети дослідження

Мета статті – охарактеризувати сутність і місце цифрових двійників у системі керування виробничими процесами та, спираючись на сучасні наукові підходи, узагальнити їхню роль у підвищенні ефективності управління в українській промисловості.

Завдання дослідження: розкрити зміст цифрового двійника у виробництві, відмежувати його від споріднених понять і визначити місце в Індустрії 4.0 та релевантних стандартах; підсумувати теоретичну архітектуру цифрового двійника («дані – моделі – рівні управління») та пояснити її значення для підтримки управлінських рішень.

Викладення основного матеріалу дослідження

Сучасні вимоги до підвищення ефективності управління потребують узгодженого перетворення потоків даних на керувальні дії через формальні моделі стану обладнання, процесів і ресурсних обмежень. У цьому контексті цифровий двійник є синхронізованим поданням виробничої системи, що безперервно відображає фактичний стан і генерує керувальні підказки, а промисловий інтернет речей забезпечує надійний збір телеметрії та двосторонній обмін у режимі, близькому до реального часу [1, с. 1], переводячи керування від реактивної ліквідації відхилень до превентивного вирівнювання такту й стабілізації пропускну здатності. Сутність цифрового двійника розкривається через трансформацію «дані – модель – рішення»: на рівні даних формується контекстно збагачений опис діяльності; на рівні моделей – конструктивні й поведінкові представлення для моніторингу, оцінювання, діагностики та прогнозування; на рівні рішень – алгоритми вибору дій, перепланування й локальної адаптації. Інтеграція продуктового та процесного вимірів узгоджує параметри виробу, маршрути та завантаження в єдиному цифровому поданні, зменшуючи розрив між конструкторськими припущеннями та фактичними можливостями цеху [2, с. 5–6]. Практична придатність визначається інтеграцією двійника в контури планування й диспетчеризації та аналізується за трьома питаннями: що саме виконує (від описових до діагностичних, прогностичних і приписових функцій), де інтегрований (рівні автоматизації, підсистеми обміну) і як реалізований (оцінювання, виявлення вузьких місць, прогнозне перепланування, ініціювання впливів для замикання контуру «план – факт» у реальному часі), що ставить його в центр короткогоризонтних дій і з'єднує мікрорішення робочих центрів з обмеженнями дільниці та підприємства [4, с. 5663]. Для заводів із різним обладнанням, змінюваною номенклатурою та енергетичними лімітами основним є перетворювати відхилення на дії в допустимі терміни. Саме ці завдання і розв'язує цифровий двійник, пов'язуючи виробничі показники з джерелами подій, перетворюючи готовність, стабільність циклу та частку переробки на об'єкти прогнозування й оптимізації під час роботи. Через таку інтеграцію усувається типова невизначеність на межі ІТ та ОТ, а управлінські рішення отримують одну базу погодження. Модель не лише відтворює процес, а й вказує на шляхи зменшення витрат часу й ресурсів за наявних обмежень.

Упровадження цифрових двійників у систему управління виробництвом можна розглядати як контрольований метод зміни даних на дії, де інфраструктура збору й обміну забезпечує своєчасність і повноту сигналів, зокрема подій стану обладнання, параметрів, показників якості, логістичних подій та використання енергії. Формальні моделі відтворюють поведінку дільниць та характеризують альтернативи дій із позицій мінімізації часу, перенакладень і енергоспоживання за наявних обмежень. Інтегровані механізми управління перетворюють ці оцінки на конкретні управлінські рішення: перепланування черги замовлень, зміну режимів і параметрів, перерозподіл ресурсів між вузлами, запуск резервного обладнання чи ініціювання ТО. Для української промисловості це означає посилення оперативної перевірки на коротких горизонтах завдяки швидкому узгодженню планів із фактичним станом виробництва, зменшенню простоїв та кількості перебудовань і переходу від постфактумного контролю до превентивної адаптації.

Енергетична проєкція цифрового двійника безпосередньо пов'язує виробничі дані з вартісними та енергетичними критеріями: на основі телеметрії визначає споживання, моделює термодинамічні й технологічні зв'язки та пропонує дії для зменшення піків, перерегулювань і збитків без втрати продуктивності. Урахування енергетичних обмежень у плануванні й диспетчеризації переводить керування від реактивного до превентивної оптимізації профілю навантаження, знижуючи собівартість і поліпшуючи керованість за цінової волатильності [5].

У середовищах підвищеної надійності й безпеки потрібні спеціальні архітектурні умови. Так, ієрархія від двійників компонентів до процесів і гібридні моделі, що поєднують physics-based та data-driven підходи, зменшує невизначеність на стику ІТ та ОТ, локалізує відмови, гарантує трасованість і дотримання політик доступу. Критичною тут є дисципліна даних (ідентифікатори, атрибути, події, політики) для відтворюваного зв'язування управлінських показників із першопричинами та випробуваної автоматизації циклу «виявлення – діагностика – дія» [6].

На рівні вузла цифровий двійник замикає цикл «дані – модель – керуючий вплив» у конкретному моменті. Приклад інтелектуального шпіндельного вузла представляє близнюка як динамічну віртуальну модель із мультифізичними, багатомасштабними, ієрархічними, інтегрованими та імовірніснимивластивостями, побудовану на MBSE з компонентною структурою та зворотним зв'язком майже в реальному часі. Це забезпечує перехід до державно-орієнтованого керування, зниження ризику аварійних зупинок і стабільне навантаження [7, с. 80, 82–85].

У складальному виробництві подвійник формалізує зв'язок між описом виробу й послідовністю операцій: модель виробу та описвзаємозв'язків і обмежень задають технологічну послідовність, яка дає змогу перевіряти рішення на стадії проектування, уникати фізичної реконфігурації, зменшувати кількість помилок і простоїв, а під час експлуатації синхронізувати перепланування з реальними лімітами ресурсів. За цих умов управління переходить до динамічного узгодження маршрутів і завантаження [8, с. 202–204].

Для процесів із високими вимогами до безпеки запропоновано кількісний підхід до визначення впливу двійника на керованість. Тут виділяються індикатори, що пов'язують якість рішень із динамікою процесу, які розраховуються за даними двійника. На енергетичних об'єктах це охоплює порівняння вимірних та еталонних траєкторій, перевірку стабільності режимів і регуляторів та оцінювання ефективності дій у різних сценаріях з урахуванням обмежень безпеки [9].

На прикладі ливарного виробництва показано три рівні проникнення інформатики: моніторинг, керування, автоматизація, що гарантує перехід від реального відображення параметрів до пропозицій коригувань за імітаційними моделями та автоматичного ініціювання дій з оптимізацією. Інженерна процедура на виробничих даних виділяє потоки й мінімальний набір показників, що дає змогу замикати «план – факт» у горизонті зміни та узгоджувати впливи з обмеженнями й доступністю ресурсів [10, с. 41–43].

Сумісність цих результатів окреслює шлях від ідеї двійника до керованої операційної продуктивності, коли інтеграція енергетики робить диспетчеризацію чутливою до вимірюваного ефекту, архітектура для критичних середовищ забезпечує надійність і відстежуваність, локальні двійники замикають контури керування польових установах, формалізація складання підтримує координацію, а ескалація від моніторингу до автоматизації гарантує системний план-факт закриття змінних ресурсів.

У реабілітації та модернізації інфраструктури двійник поєднує просторові описи, параметричні моделі та сценарії управління. Наприклад, для елеваторних комплексів синтез технологічних ланцюгів, просторової конфігурації та регламентів створює прозорі механізми планування та контролю як єдине джерело істини, що допомагає будувати фактичні плани з урахуванням пропускнуої спроможності й ризиків та оцінювати альтернативи їх реалізації [1, с.12–14].

В економіко-управлінському вимірі ефекти впровадження цифрових двійників виходять за межі обладнання, поєднуючи виробничі дані, моделі продуктивності та модулі рішень, що дає змогу вирівнювати плани випуску продукції з кадровими й енергетичними обмеженнями. Зокрема, у харчовій промисловості України такий підхід забезпечує перерозподіл навантаження між змінами, переведення частини рішень у режим рекомендацій і зменшення втрат від варіативності сировини, що сприяє підвищенню керованості та стійкості підприємства [12, с. 858–861].

Методологія створення двійника складальних процесів конкретизує архітектуру «дані – моделі – рівні управління» як замкнений контур моніторингу та диспетчеризації, де синхронізація потоків комплектуючих у багатолінійному складанні й агентні уявлення елементів узгоджують черги, маршрути та такти з обмеженнями потужності. Крім того, взаємодія з MES/SCADA забезпечує постійний цикл «спостереження – оцінка – дія», де імітаційні та прогностичні моделі живлять інструкції та корекції планів, а результати повертаються в систему керування у вигляді діаграм ефективності [13, с. 61–64; 90–92].

Досвід побудови копії процесу лиття на виробничих даних підтверджує, що вдосконалення управління визначається не тільки точністю моделей, а й вибором основних характеристик і зв'язком параметрів із якістю. Навчена на реальних сигналах, модель попередньо оцінює критичні параметри лиття та встановлює правила втручання до того, як будуть порушені допуски, зменшуючи ітерації корекції відхилень, простої та підвищуючи передбачуваність випуску.

На енергетичному рівні споживання енергії розглядається як керована змінна й через цифровий двійник інтегрується в контур управління. Практика побудови такого двійника для теплового тунелю показує, що дво-напрямна комунікація параметрів між фізичною установкою та віртуальною моделлю дає змогу оптимізувати режими підігріву й утримання температури без втрати продуктивності. Отже, управлінські дії базуються на

прогнозі енергоспоживання, а не на реакції постфактум, що зменшує витрати та підтримує стабільність технологічного режиму на рівні дільниці.

Узагальнення цих результатів для української промисловості дає підстави вивчати цифровий двійник як багатопланову керувальну архітектуру. На нижньому рівні даних забезпечується синхронний збір операційних сигналів, їхня якісна валідація та зведення до ознак, релевантних до управлінських рішень. На рівні моделей – поєднання імітації дискретно-подієвих процесів, агентних уявлень номенклатури, моделей деградації та енергетичних балансів, що дає можливість виконувати обчислювально прості прогнози в робочому циклі. На рівні управління – інтеграція з диспетчерсько-планувальним контуром і механізми перевірених «що-якщо» сценаріїв, які впливають на розклад, партіонування, переналаштування обладнання та енергетичні ресурси. Така конфігурація допомагає закрити окреслені на початку розбіжності, уніфікує зміст двійника в термінах керованих змінних та інтерфейсів, уточнює місце моделей у ланцюзі рішень і робить вимірюваним внесок в ефективність управління через скорочення простоїв, зменшення енерговитрат, стабілізацію якості та підвищення передбачуваності здійснення плану з урахуванням кадрових і ресурсних нестач.

Цифровий двійник, згідно зі сформульованим теоретичним осмисленням, виконує функції узгоджувача між даними, моделями та рішеннями. Його впровадження є частиною промислового контуру керування, що збільшує ефективність управління виробничими процесами на рівні цеху, дільниці й підприємства. Для українських підприємств це означає можливість стандартизовано застосовувати такий підхід у критичній інфраструктурі та в галузях, що працюють у режимі ресурсних і кадрових обмежень, не змінюючи базової логіки планування й диспетчеризації, але роблячи її дано-керованою та прогнозно-орієнтованою.

Висновки

Теоретичний внесок дослідження полягає у створенні узгодженої рамки «дані – моделі – рішення», яка поєднує поняття цифрового двійника з його управлінськими ролями у виробництві та систематизує архітектуру, моделі й рівні управління з механізмами підтримки рішень. Встановлено, що вирішальний вплив на результат мають дисципліни даних (якість, повнота, своєчасність), а прозорий перехід від вимірювань до керувальних дій забезпечує атрибуцію ефектів і поліпшує керованість процесів.

Типовими практичними наслідками впровадження цифрових двійників (за матеріалами фахової літератури та кейсів) є скорочення тривалості операцій та енерговитрат, підвищення передбачуваності виконання плану та стабільності якості завдяки зменшенню внутрішньої варіабельності процесів. Водночас аналіз джерел і практик виявляє низку обмежень, зокрема неузгодженість термінів і ролей між ІТ та ОТ, неформальні інтеграційні зв'язки між цифровим двійником і суміжними системами, незначна кількість методів, що пов'язують прогнози двійника з управлінськими КРІ, відсутність процедур для оцінювання та керування невизначеністю в гібридних моделях, складність інтеграції зі спадковою (legacy) інфраструктурою, потреба гарантувати кібербезпеку без втрати швидкодії.

Перспективи дослідження полягають у розробленні прозорих методів причинно-наслідкової атрибуції впливу цифрових двійників на управлінські та економічні показники підприємств у різних галузях.

Список використаної літератури

1. Attaran S., Attaran M., Celik B. G. Digital twins and industrial internet of things: uncovering operational intelligence in industry 4.0. *Decision Analytics Journal*. 2024. Vol. 10. 100398. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100398>.
2. Onaji I., Tiwari D., Soulatiantork P., Song B., Tiwari A. Digital twin in manufacturing: conceptual framework and case studies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2022. Vol. 35, № 8. P. 831–858. DOI: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2027014>.
3. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing. Part 1: Overview and general principles. *International Organization for Standardization*, 2021. URL: <https://www.iso.org/standard/75186.html>.
4. Macchi M., Ragazzini L., Negri E. A conceptual framework for digital twins in production scheduling and control. *IFAC-PapersOnLine*. 2023. Vol. 56, № 2. P. 5661–5666. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.491>.
5. Billey A., Wuest T. Predictive maintenance with digital twins: research landscape and future directions. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024. Vol. 83. 102729. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102729>.
6. Щеглов В. Р., Морозова О. І. Методи та технології розроблення цифрових двійників для гарантоздатних систем індустріального інтернету речей. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. Т. 4, № 70. С. 127–137. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.127>.
7. Сапон С. П. Концепція створення моделі цифрового двійника інтелектуального шпіндельного вузла. *Технічні науки та технології*. 2022. № 4 (30). С. 80–90. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-80-90](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-80-90).
8. Філіппова М. В., Демченко М. О., Філіппов О. В., Заєць С. В. Використання цифрового двійника для складального виробництва. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 335, № 3 (1). С. 202–208. DOI: <https://doi.org/10.31891//2307-5732-2024-335-3-28>.

9. Бровко К., Буданов П., Великогорський О., Винокурова Н. Забезпечення кількісної оцінки якості управління технологічним процесом енергоблока АЕС із застосуванням цифрового двійника. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інформатика та моделювання*. 2025. № 3 (25). С. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.03.01>.
10. Doroshenko V. S., Kravchenko V. P., Tokova O. V. Development of a digital twin of the technological process of consumable pattern casting using production data. *Control Systems and Computers*. 2020. № 3. P. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.15407/csc.2020.03.040>.
11. Титаренко В., Костецька С., Бабік К., Дворнік А., Юрко П. Використання цифрових двійників для відновлення пошкоджених об'єктів елеваторних комплексів. *Наука та будівництво*. 2025. Т. 44, № 2. С. 12–27. DOI: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2025-2>.
12. Мазник Л. В., Жуковська К. В. Використання технології цифрових двійників для компенсації кадрового дефіциту та модернізацію харчової промисловості України. *Економіка та суспільство*. 2025. № 78. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-78-152>.
13. Філіппов О. В. Цифровий двійник виробничого процесу складання виробів: магістерська дис. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 99 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/71382>.

References

1. Attaran, S., Attaran, M., & Celik, B. G. (2024). Digital twins and Industrial Internet of Things: Uncovering operational intelligence in Industry 4.0. *Decision Analytics Journal*, 10, 100398. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100398>.
2. Onaji, I., Tiwari, D., Soulatiantork, P., Song, B., & Tiwari, A. (2022). Digital twin in manufacturing: Conceptual framework and case studies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 35(8), 831–858. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2027014>.
3. International Organization for Standardization. (2021). *ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing. Part 1: Overview and general principles*. <https://www.iso.org/standard/75186.html>.
4. Macchi, M., Ragazzini, L., & Negri, E. (2023). A conceptual framework for digital twins in production scheduling and control. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 5661–5666. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.491>.
5. Billey, A., & Wuest, T. (2024). Predictive maintenance with digital twins: Research landscape and future directions. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 83, 102729. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102729>.
6. Shcheglov, V. R., & Morozova, O. I. (2022). *Metody ta tekhnologii rozroblennia tsyfrovyykh dviinykiv dlia harantozdatnykh system industrialnogo internetu rechei* [Methods and technologies for developing digital twins for fault-tolerant IIoT systems]. *Systemy Upravlinnia, Navihatsii ta Zv'iazku*, 4(70), 127–137. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.127>.
7. Sapon, S. P. (2022). *Kontseptsiiia stvorennia modeli tsyfrovoho dviinyka intelektualnogo shpyndelnogo vuzla* [Concept for creating a digital twin model of an intelligent spindle unit]. *Tekhnichni Nauky ta Tekhnologii*, 4(30), 80–90. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-80-90](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-80-90).
8. Filippova, M. V., Demchenko, M. O., Filippov, O. V., & Zaiets, S. V. (2024). *Vykorystannia tsyfrovoho dviinyka dlia skladalnoho vyrobnytstva* [Using a digital twin for assembly production]. *Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni Nauky*, 335(3–1), 202–208. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-335-3-28>.
9. Brovko, K., Budanov, P., Velykohortskyy, O., & Vynokurova, N. (2025). *Zabezpechennia kilkisnoi otsinky yakosti upravlinnia tekhnolohichnym protsesom enerhobloka AES iz zastosuvanniam tsyfrovoho dviinyka* [Ensuring quantitative assessment of control quality for an NPP power-unit process using a digital twin]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Informatyka ta Modeliuvannia*, (3(25)), 3–12. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2025.03.01>.
10. Doroshenko, V. S., Kravchenko, V. P., & Tokova O. V. (2020). Development of a digital twin of the technological process of consumable pattern casting using production data. *Control Systems and Computers*, (3), 40–49. DOI: <https://doi.org/10.15407/csc.2020.03.040>.
11. Tytarenko, V., Kostetska, S., Babik, K., Dvornik, A., & Yurko, P. (2025). *Vykorystannia tsyfrovyykh dviinykiv dlia vidnovlennia poshkodzhennykh ob'ektiv elevatorykh kompleksiv* [Using digital twins to restore damaged objects of elevator complexes]. *Nauka ta Budivnytstvo*, 44(2), 12–27. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2025-2>.
12. Maznyk, L. V., & Zhukovska, K. V. (2025). *Vykorystannia tekhnolohii tsyfrovyykh dviinykiv dlia kompensatsii kadrovoho defitsytu ta modernizatsiiu kharchovoi promyslovosti Ukrainy* [Using digital twin technology to offset staff shortages and modernize Ukraine's food industry]. *Ekonomika ta Suspilstvo*, 78. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-78-152>.
13. Filippov, O. V. (2024). *Tsyfrovyy dviinyk vyrobnychoho protsesu skladannia vyrobiv* [Digital twin of the product assembly process] (Master's thesis, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute). <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/71382>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025