

Секція Економіка	
УДК 658.5:004.94:004.89	
Дата першого надходження статті до видання	2026-07-01
Дата прийняття статті до друку після рецензування	2026-08-01
Дата публікації/оприлюднення	2026-08-01

ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ DIGITAL TWIN В УМОВАХ ПЕРЕХОДУ ДО INDUSTRY 5.0

ЛПІЧ ЛЮБОВ ГРИГОРІВНА

*докторка економічних наук, професорка,
професорка кафедри підприємництва, торгівлі та логістики
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9059-7271>*

ХІЛУХА ОКСАНА АНАТОЛІЇВНА

*кандидатка економічних наук, доцентка,
доцентка кафедри економіки
Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1228-7171>*

КУШНІР МИРОСЛАВА АНАТОЛІЇВНА

*кандидатка економічних наук, доцентка,
доцентка кафедри прикладної економіки та бізнесу
Український католицький університет, Львів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4441-4278>*

Анотація. Цифрова трансформація промисловості, що відбувається в умовах переходу до концепції Industry 5.0, актуалізує необхідність упровадження сучасних цифрових технологій для підвищення ефективності виробничих процесів. Одним із найперспективніших інструментів цифровізації є технологія Digital Twin, яка забезпечує інтеграцію фізичних і віртуальних виробничих систем, створює передумови для прогнозування, оптимізації виробництва та підтримки прийняття управлінських рішень. Мета дослідження полягає в обґрунтуванні комплексного застосування цифрового моделювання виробничих процесів із використанням технології Digital Twin у поєднанні з технологіями Інтернету речей, штучного інтелекту, Big Data та корпоративними інформаційними системами ERP і MES для підвищення ефективності функціонування промислових підприємств в умовах реалізації концепції Industry 5.0. У роботі використано методи системного аналізу, узагальнення, порівняльного аналізу, структурно-логічного моделювання, аналізу наукових джерел, а також концептуального моделювання цифрових виробничих систем. Встановлено, що цифровізація виробництва базується на комплексному використанні технологій Інтернету речей, хмарних обчислень, великих даних, штучного інтелекту, цифрових двійників, роботизованої автоматизації, сучасних інформаційних систем управління та інших цифрових рішень, синергетичне поєднання яких формує інтегроване цифрове виробниче середовище. Застосування технології Digital Twin забезпечує моделювання виробничих процесів у режимі реального часу, прогнозування технічного стану обладнання, оптимізацію використання виробничих ресурсів, скорочення виробничих витрат, мінімізацію простоїв, підвищення продуктивності, якості продукції, гнучкості та адаптивності виробничих систем. Обґрунтовано концептуальну модель цифрового моделювання виробничих процесів на основі технології Digital Twin, що інтегрує фізичне виробництво, цифрову інфраструктуру підприємства, корпоративні інформаційні системи ERP, MES, WMS, APS, технології Інтернету речей, Big Data, штучного інтелекту та систему підтримки прийняття управлінських рішень, забезпечуючи комплексну оптимізацію функціонування виробничих підприємств. Комплексне використання технології Digital Twin у поєднанні із сучасними цифровими технологіями створює технологічне підґрунтя для реалізації принципів Industry 5.0, підвищення ефективності виробничих процесів, конкурентоспроможності промислових підприємств, їх інноваційного розвитку, ресурсоефективності та сталого функціонування.

Ключові слова: цифровізація, цифрова трансформація, цифрове моделювання, Digital Twin, виробничі процеси, Industry 4.0, Industry 5.0, промисловий Інтернет речей, штучний інтелект.

DIGITAL MODELING OF PRODUCTION PROCESSES BASED ON DIGITAL TWIN TECHNOLOGY IN THE CONDITIONS OF TRANSITION TO INDUSTRY 5.0

LIUBOV LIPYCH

*Doctor of Economics, Professor,
Professor of the Department of Entrepreneurship, Trade and Logistics
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9059-7271>*

OKSANA KHILUKHA

*PhD in Economic Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Economics
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1228-7171>*

MYROOSLAVA KUSHNIR

*Candidate of Economic Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Applied Economics and Business
Ukrainian Catholic University, Lviv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4441-4278>*

Abstract. *The digital transformation of industry, which is taking place in the context of the transition to the Industry 5.0 concept, highlights the need to implement modern digital technologies to increase the efficiency of production processes. One of the most promising digitalization tools is Digital Twin technology, which ensures the integration of physical and virtual production systems, creates the prerequisites for forecasting, optimizing production and supporting management decision-making. The purpose of the study is to substantiate the comprehensive application of digital modeling of production processes using Digital Twin technology in combination with Internet of Things, artificial intelligence, Big Data and corporate information systems ERP and MES to increase the efficiency of industrial enterprises in the context of the implementation of the Industry 5.0 concept. The work uses the methods of system analysis, generalization, comparative analysis, structural and logical modeling, analysis of scientific sources, as well as conceptual modeling of digital production systems. It has been established that the digitalization of production is based on the integrated use of Internet of Things technologies, cloud computing, big data, artificial intelligence, digital twins, robotic automation, modern information management systems and other digital solutions, the synergistic combination of which forms an integrated digital production environment. The use of Digital Twin technology provides real-time modeling of production processes, forecasting the technical condition of equipment, optimizing the use of production resources, reducing production costs, minimizing downtime, increasing productivity, product quality, flexibility and adaptability of production systems. A conceptual model of digital modeling of production processes based on Digital Twin technology has been substantiated, which integrates physical production, digital infrastructure of the enterprise, corporate information systems ERP, MES, WMS, APS, Internet of Things technologies, Big Data, artificial intelligence and a management decision support system, ensuring comprehensive optimization of the functioning of production enterprises. The integrated use of Digital Twin technology in combination with modern digital technologies creates a technological foundation for implementing the principles of Industry 5.0, increasing the efficiency of production processes, the competitiveness of industrial enterprises, their innovative development, resource efficiency, and sustainable operation.*

Keywords: *digitalization, digital transformation, digital modeling, Digital Twin, production processes, Industry 4.0, Industry 5.0, Industrial Internet of Things (IIoT), artificial intelligence.*

Вступ

Актуальність проблеми. Сучасний етап розвитку промисловості характеризується стрімкою цифровою трансформацією виробничих систем, що відбувається під впливом технологій Industry 4.0 та переходу до концепції Industry 5.0. Інтеграція промислового Інтернету речей (IIoT), штучного

інтелекту, великих даних, хмарних обчислень, кіберфізичних систем та корпоративних інформаційних платформ суттєво змінює підходи до організації виробництва, управління ресурсами й прийняття управлінських рішень. У цих умовах одним із ключових інструментів цифрової трансформації підприємств стає технологія Digital Twin, яка забезпечує створення цифрових моделей виробничих об'єктів і процесів із можливістю їх безперервної синхронізації з фізичними системами в режимі реального часу.

Застосування цифрових двійників дозволяє моделювати виробничі процеси, прогнозувати поведінку обладнання, оцінювати альтернативні сценарії розвитку виробництва, оптимізувати використання ресурсів, скорочувати виробничі витрати, підвищувати продуктивність і якість продукції. Особливого значення ця технологія набуває в умовах переходу до концепції Industry 5.0, яка передбачає поєднання цифрових технологій із принципами людиноцентричності, сталого розвитку, ресурсоефективності та екологічної відповідальності.

Разом із тим ефективне використання технології Digital Twin потребує її комплексної інтеграції з інформаційними системами підприємства (ERP, MES), технологіями Інтернету речей, штучного інтелекту, аналітикою великих даних і сучасними засобами цифрового моделювання. На практиці така інтеграція залишається недостатньо дослідженою, що ускладнює формування єдиної архітектури цифрового виробництва та обмежує можливості комплексної оптимізації виробничих процесів.

У зв'язку з цим актуальним науковим завданням є дослідження можливостей комплексного застосування цифрового моделювання виробничих процесів із використанням технології Digital Twin у поєднанні з сучасними цифровими технологіями для підвищення ефективності функціонування промислових підприємств та реалізації концепції Industry 5.0.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика цифрової трансформації промисловості, цифрового моделювання виробничих систем та використання технології Digital Twin належить до найбільш динамічних напрямів сучасних наукових досліджень. Еволюція наукових підходів свідчить про поступовий перехід від дослідження цифровізації окремих виробничих процесів до формування комплексних цифрових екосистем, що забезпечують інтеграцію фізичних і віртуальних виробничих середовищ.

Перший напрям досліджень пов'язаний із формуванням концептуальних засад Industry 4.0. Теоретичні основи цифрової трансформації промисловості закладено у працях Н. Kagermann, W. Wahlster та J. Helbig (2013), які визначили Industry 4.0 як нову модель організації виробництва, засновану на інтеграції кіберфізичних систем, промислового Інтернету речей, інтелектуальних виробничих систем та цифрових платформ [1]. Подальший розвиток цієї концепції представлений у роботах L. Monostori (2014), який обґрунтував роль кіберфізичних виробничих систем як технологічної основи адаптивного управління виробництвом [2].

Другий напрям охоплює розвиток концепції Digital Twin. Визначальний внесок у становлення теорії цифрових двійників зробили M. Grieves та J. Vickers (2016), які розглядають Digital Twin як цифрове представлення фізичного об'єкта або виробничої системи із безперервним обміном інформацією між фізичним та цифровим середовищем протягом усього життєвого циклу продукції [3]. Подальший розвиток концепції отримав у роботах F. Tao, H. Zhang, A. Liu та A. Nee (2019), де цифровий двійник визначено як ключову технологію інтелектуального виробництва, що інтегрує цифрове моделювання, великі дані, штучний інтелект і хмарні технології для оптимізації виробничих процесів у режимі реального часу [4]. Методи створення цифрових двійників для промислового Інтернету речей досліджують В. Р. Щеглов та О. І. Морозова [5].

Третій напрям досліджень присвячений розвитку цифрового моделювання виробничих процесів. A. Law (2023), A. M. Madni, C. C. Madni та S. D. Lucero (2019) довели, що використання імітаційного моделювання дозволяє аналізувати альтернативні сценарії функціонування виробничих систем, прогнозувати їхню поведінку та мінімізувати виробничі ризики ще на етапі проєктування [6; 7]. M. Rosen зі співавторами (2015) розглядають цифрові моделі як основу інтеграції інформаційних потоків, автоматизованого управління виробництвом і підтримки прийняття управлінських рішень [18].

Окремий напрям сучасних досліджень стосується інтеграції Digital Twin із цифровими технологіями підприємства. K. Zhou, T. Liu та L. Zhou (2015) довели взаємозв'язок між технологіями Інтернету речей, хмарними обчисленнями, великими даними та концепцією Industry 4.0 [8]. Подібних висновків дійшли A. Frank, L. Dalenogare та N. Ayala (2019), які показали, що комплексне використання цифрових технологій забезпечує підвищення продуктивності, гнучкості виробництва, ефективності використання ресурсів і конкурентоспроможності підприємств [9].

Сучасний етап розвитку наукових досліджень пов'язаний із переходом до концепції Industry 5.0, що орієнтована на поєднання цифрових технологій із принципами людиноцентричності, сталого розвитку та екологічної відповідальності. S. Nahavandi (2019) [16], V. Özdemir, N. Hekim [17] та інші дослідники обґрунтовують необхідність використання цифрових двійників, штучного інтелекту та робототехніки для формування високоефективних виробничих екосистем.

Подальший розвиток концепції представлено у роботах A. Thelen, X. Zhang, O. Fink, Y. Lu, S. Ghosh, B. D. Youn, M. D. Todd, S. Mahadevan, C. Hu та Z. Hu (2022), які здійснили комплексний аналіз технології Digital Twin і визначили ключові чинники її ефективності: якість цифрового моделювання, синхронізацію даних, інтеграцію фізичних і цифрових моделей та застосування алгоритмів оптимізації [10; 11].

Особливої актуальності останніми роками набувають дослідження, присвячені використанню цифрових двійників у концепції Industry 5.0. João Barata та Ina Kayser (2024) довели, що Digital Twin є одним із базових інструментів формування людиноцентричного та сталого виробництва [12]. Muhammad Hamza Zafar, Even Falkenberg Langås та Filippo Sanfilippo (2024) дослідили інтеграцію цифрових двійників із колаборативною робототехнікою, технологіями доповненої і віртуальної реальності та штучним інтелектом, обґрунтувавши їх вплив на адаптивність виробничих систем і підтримку прийняття управлінських рішень [19]. Lauren Genith Isaza Domínguez (2024) розкрила можливості використання Digital Twin для підвищення безпеки праці, моніторингу виробничих процесів і взаємодії людини з роботизованими системами [13]. Новий напрям розвитку концепції представлено у роботі Baicun Wang, Huiying Zhou, Pai Zheng, Thorsten Wuest, Lihui Wang та співавторів (2024), які запропонували модель Human Digital Twin як основу людиноцентричного виробництва, орієнтованого на оптимізацію взаємодії людини та автоматизованих систем, підвищення виробничої безпеки, ергономічності робочих місць і якості управлінських рішень [14].

Виділення невирішеної частини проблеми. Попри значний науковий доробок, більшість досліджень присвячена окремим аспектам функціонування цифрових двійників або їх інтеграції з окремими цифровими технологіями. Водночас недостатньо дослідженими залишаються питання комплексного застосування цифрового моделювання виробничих процесів із використанням технології Digital Twin у поєднанні з технологіями Інтернету речей, штучного інтелекту, Big Data, корпоративними інформаційними системами ERP і MES для підвищення ефективності діяльності промислових підприємств в умовах реалізації концепції Industry 5.0. Саме вирішення цієї наукової проблеми визначає актуальність і мету даного дослідження.

Мета статті полягає в обґрунтуванні комплексного застосування цифрового моделювання виробничих процесів із використанням технології Digital Twin та їх поєднанні з технологіями Інтернету речей, штучного інтелекту, Big Data та корпоративними інформаційними системами ERP і MES в контексті підвищення ефективності функціонування промислових підприємств та реалізації концепції Industry 5.0.

Наукова новизна. Наукова новизна дослідження полягає в обґрунтуванні концептуальної моделі цифрового моделювання виробничих процесів на основі технології Digital Twin, яка поєднує фізичне виробництво, корпоративні інформаційні системи підприємства та засоби інтелектуальної аналітики в єдиному контурі підтримки прийняття управлінських рішень.

Практичне значення. Практичне значення полягає у можливості використання запропонованої моделі промисловими підприємствами під час розроблення цифрових стратегій розвитку та впровадження інтелектуальних виробничих систем.

Методологія

Методи дослідження. Дослідження виконано із застосуванням методів системного аналізу, узагальнення, порівняльного аналізу, структурно-логічного та концептуального моделювання, а також аналізу наукових джерел. Системний аналіз використано для розгляду цифрового виробництва як цілісної системи взаємопов'язаних технологічних і управлінських складників, порівняльний аналіз — для зіставлення наукових підходів до тлумачення цифровізації та цифрових двійників, структурно-логічне моделювання — для побудови концептуальної моделі.

Джерела даних. Інформаційною базою дослідження слугували наукові публікації вітчизняних і зарубіжних авторів з проблематики Industry 4.0, Industry 5.0 та технології Digital Twin, аналітичні матеріали консалтингових компаній, а також відкриті описи спеціалізованих програмних продуктів цифрового та імітаційного моделювання виробничих процесів.

Інструменти аналізу. Опрацювання джерел здійснено шляхом систематизації та узагальнення наявних наукових підходів; результати подано в табличній формі (табл. 1) і у вигляді графічної концептуальної моделі (рис. 1).

Обмеження дослідження. Дослідження має теоретико-концептуальний характер. Запропонована модель не проходила емпіричної апробації на даних конкретних промислових підприємств, а кількісне оцінювання економічної результативності впровадження цифрових двійників виходить за межі цієї роботи й окреслене як напрям подальших досліджень.

Результати

Концепція цифровізації охоплює адаптацію та посилене використання цифрових або комп'ютерних технологій організаціями, секторами економіки, країнами тощо. Однак терміни «цифровізація» та «діджиталізація» часто використовуються як взаємозамінні як у українській, так і в міжнародній літературі. Окрім концепції цифрової економіки, існує також кілька інших термінів для опису нової економічної моделі, таких як: нова економіка, електронна економіка та мережева економіка.

У бізнес-практиці цифровізацію розуміють по-різному. Згідно з дослідженням, проведеним McKinsey [15], менеджери трактують цифровізацію трьома способами. Перша група менеджерів пов'язує її з технологіями, тоді як друга розглядає її як нові можливості для охоплення клієнтів. Решта менеджерів розглядають цифровізацію як абсолютно новий спосіб ведення бізнесу. У перших двох випадках цифровізацію трактують як інструмент для досягнення цілей, що узгоджується з класичним визначенням поняття. Дьорнер та Едельман описують цифровізацію з точки зору трьох рівнів впливу на підприємство: створення цінності в нових бізнес-реаліях, створення цінності в процесах, що використовують концепцію управління клієнтським досвідом (CEM), та побудова фундаментальних можливостей підприємства, що підтримують всю його структуру.

Цифровізація, безсумнівно, є основною рушійною силою інновацій та змін у більшості секторів економіки, а також глибоких змін у бізнесі, а також соціальних та культурних трансформацій. Розвинені інформаційно-комунікаційні технології (ІКТ) назавжди трансформували різні відносини, включаючи економічні, комерційні та соціальні, а також ринок праці, бізнес-процеси, окремі галузі та професії. Ключовими технологічними чинниками розвитку цифрової економіки та цифрової трансформації є: Інтернет речей (IoT) та Інтернет усього (IoE), гіперпідключення, хмарні обчислення і хмарні сервіси, великі дані та аналітика великих даних (Big Data Analytics), штучний інтелект і генеративний штучний інтелект, машинне навчання, роботизована автоматизація бізнес-процесів (RPA), технології блокчейн, цифрові двійники, периферійні обчислення (Edge Computing), мережі 5G/6G, технології доповненої та віртуальної реальності, сучасні рішення з кібербезпеки, а також багатоканальні й омніканальні моделі взаємодії зі споживачами. Сукупне використання цих технологій забезпечує цифрову трансформацію бізнес-процесів, підвищення ефективності управління, створення нових бізнес-моделей та зростання конкурентоспроможності підприємств. Застосування вище наведених технологій та очікуваний ефект від їх впровадження представлено в табл.1.

Таблиця 1

Основні технологічні чинники цифрової трансформації промислових підприємств

Технологічний чинник	Застосування у промисловості	Очікуваний ефект
Інтернет речей (IoT)	Підключення обладнання до цифрової мережі, моніторинг виробництва в режимі реального часу	Зниження простоїв обладнання, підвищення продуктивності, оперативне виявлення несправностей, покращення використання виробничих ресурсів.
Промисловий Інтернет речей (IIoT)	Інтеграція виробничих систем, контроль технологічних процесів	Підвищення ефективності виробництва, скорочення виробничих втрат, оптимізація експлуатації обладнання.
Інтернет усього (IoE)	Об'єднання людей, процесів, даних і обладнання в єдину цифрову екосистему	Підвищення рівня інтеграції підприємства, покращення координації бізнес-процесів, прискорення управлінських рішень
Штучний інтелект (AI)	Автоматизоване управління виробництвом, контроль якості, прогнозування попиту	Підвищення точності управлінських рішень, скорочення виробничих витрат, зростання продуктивності та якості продукції.

Технологічний чинник	Застосування у промисловості	Очікуваний ефект
Генеративний штучний інтелект (Generative AI)	Генерування технічної документації, підтримка інженерного проєктування	Скорочення часу розроблення нової продукції, прискорення інноваційної діяльності, підвищення продуктивності інженерної праці.
Машинне навчання (ML)	Аналіз виробничих даних, прогнозування несправностей, оптимізація технологічних режимів	Зниження витрат на технічне обслуговування, підвищення точності прогнозування, мінімізація аварійних ситуацій.
Big Data та аналітика великих даних (BDA)	Обробка великих масивів виробничої інформації	Формування обґрунтованих управлінських рішень, оптимізація виробництва, підвищення конкурентоспроможності підприємства.
Хмарні технології (Cloud Computing)	Централізоване зберігання та обробка даних, інтеграція корпоративних систем	Зменшення витрат на ІТ-інфраструктуру, підвищення доступності інформації, масштабованість цифрових сервісів.
Периферійні обчислення (Edge Computing)	Обробка інформації безпосередньо біля обладнання	Мінімізація затримок передачі даних, підвищення швидкості реагування виробничих систем, забезпечення роботи в режимі реального часу.
Цифрові двійники (Digital Twin)	Моделювання виробничих процесів і обладнання	Скорочення витрат на тестування нових технологій, оптимізація виробництва, зниження виробничих ризиків.
Роботизація та RPA	Автоматизація виробничих і адміністративних процесів	Скорочення операційних витрат, підвищення продуктивності праці, зменшення впливу людського фактора.
Автономні роботи та коботи	Виконання складальних, пакувальних, логістичних операцій	Підвищення гнучкості виробництва, покращення умов праці, скорочення виробничого циклу.
Блокчейн	Контроль ланцюгів постачання, захист інформації, смарт-контракти	Підвищення прозорості бізнес-процесів, зміцнення довіри між учасниками ланцюга постачання, зниження ризику шахрайства.
Адитивні технології (3D-друк)	Виготовлення прототипів і запасних частин	Скорочення часу розроблення продукції, зменшення матеріальних витрат, підвищення гнучкості виробництва.
Доповнена та віртуальна реальність (AR/VR)	Навчання персоналу, дистанційне технічне обслуговування, моделювання процесів	Підвищення кваліфікації персоналу, скорочення часу навчання, зменшення витрат на сервісне обслуговування.
Кібербезпека	Захист інформаційних систем, виробничих мереж та даних	Забезпечення безперервності виробництва, зменшення ризику кіберінцидентів, захист інтелектуальної власності підприємства.
5G/6G-комунікації	Передача даних між виробничими системами у режимі реального часу	Підвищення швидкості обміну інформацією, підтримка автономного виробництва, розвиток
ERP-, MES-, SCM- та CRM-системи	Комплексне управління ресурсами, виробництвом, логістикою та взаємодією з клієнтами	Інтеграція бізнес-процесів, підвищення прозорості управління, скорочення операційних витрат, оптимізація використання ресурсів.
Оmnіканальні цифрові платформи	Інтеграція підприємства з постачальниками, партнерами	Підвищення якості взаємодії з клієнтами, розширення ринків збуту,

Технологічний чинник	Застосування у промисловості	Очікуваний ефект
	та споживачами	розвиток цифрових бізнес-моделей.
Квантові обчислення	Оптимізація складних виробничих і логістичних задач, моделювання матеріалів	Прискорення вирішення складних обчислювальних задач, підвищення інноваційного потенціалу підприємства, формування технологічних конкурентних переваг у довгостроковій перспективі.

Джерело: сформовано автором.

Комплексне впровадження сучасних цифрових технологій забезпечує формування інтегрованого цифрового виробничого середовища, підвищення продуктивності праці, ефективності використання ресурсів, гнучкості виробничих процесів, інноваційної активності та конкурентоспроможності промислових підприємств. Синергетичний ефект від поєднання цих технологій створює передумови для переходу до концепцій Industry 4.0 та Industry 5.0, орієнтованих на сталий, інтелектуальний і людиноцентричний розвиток промисловості.

Основним завданням виробничого підприємства є випуск конкурентоспроможної продукції з мінімальними витратами ресурсів та максимальним рівнем якості. Завдяки використанню сучасних цифрових технологій, автоматизованих систем управління та інноваційних логістичних рішень виробничі процеси являють собою комплекс взаємопов'язаних операцій, ефективність яких визначає загальні результати діяльності підприємства.

Згідно з теорією управління, ефективність є результатом реалізації виробничих процесів і характеризується співвідношенням між досягнутими результатами та використаними ресурсами. Її оцінюють за допомогою системи часткових і комплексних показників продуктивності використання праці, капіталу, матеріальних, енергетичних та інформаційних ресурсів. Використання ресурсів має бути оптимальним відповідно до визначених критеріїв ефективності, таких як мінімізація виробничих витрат, скорочення тривалості виробничого циклу, максимальне завантаження обладнання або підвищення якості продукції. При цьому оптимальне використання ресурсів не означає їх максимально можливе завантаження, а передбачає досягнення найкращого результату за сукупністю технічних, економічних та організаційних критеріїв.

Оптимізація виробничих процесів повинна здійснюватися комплексно, з урахуванням взаємозв'язків між усіма складовими виробничої системи. Зокрема, під час аналізу матеріальних потоків доцільно враховувати такі компоненти:

а) транспортування – тип транспортних засобів, що використовуються у виробничому процесі, швидкість переміщення матеріальних потоків між робочими місцями, витрати на транспортування, тривалість операцій завантаження та розвантаження, напрям і характер матеріального потоку (безперервний або дискретний);

б) виробничі операції – вид операції, що виконується на робочому місці, тривалість технологічного циклу, необхідного для виготовлення одиниці продукції, а також час підготовки та переналагодження обладнання;

в) обладнання – вартість експлуатації та переналагодження, коефіцієнт технічної готовності, рівень використання виробничих потужностей, енергоефективність та споживання енергоресурсів;

г) організацію праці – тривалість робочої зміни, кількість змін на добу, режим роботи підприємства та рівень завантаження персоналу;

д) виробничі завдання – запланований ритм виробництва, кількість виробів, що мають бути виготовлені в межах виробничого замовлення, розмір виробничої партії та параметри внутрішньовиробничого переміщення продукції.

За сучасних умов цифрової трансформації оптимізацію виробничих процесів доцільно здійснювати із застосуванням спеціалізованих програм цифрового моделювання та імітаційного моделювання, які дають змогу створювати цифрові моделі виробничих систем, аналізувати різні сценарії функціонування підприємства, оцінювати вплив змін на продуктивність, собівартість і завантаження ресурсів, а також проводити багатокритеріальну оптимізацію виробничих процесів без втручання в реальне виробництво.

Найбільш поширеними програмними продуктами для цифрового моделювання виробничих процесів є Siemens Tecnomatix Plant Simulation, AnyLogic, FlexSim, Arena Simulation, SIMUL8, Dassault Systèmes DELMIA, Visual Components, Autodesk Factory Design Utilities та PTC ThingWorx, які

підтримують концепцію цифрового двійника (Digital Twin), моделювання матеріальних потоків, оптимізацію виробничих ліній, логістичних процесів і використання виробничих ресурсів.

Важливим напрямом розвитку цифрового моделювання виробничих процесів є використання технології цифрового двійника (Digital Twin), яка передбачає створення віртуальної копії виробничої системи, окремого обладнання або технологічного процесу. Цифровий двійник функціонує на основі даних, що надходять у режимі реального часу від датчиків Інтернету речей (IoT), систем автоматизованого управління виробництвом (MES), систем планування ресурсів підприємства (ERP) та інших цифрових платформ. Це забезпечує можливість безперервного моніторингу виробничих процесів, прогнозування відмов обладнання, оцінювання ефективності використання ресурсів, моделювання альтернативних сценаріїв функціонування виробництва та вибору оптимальних управлінських рішень ще до їх практичного впровадження. Застосування технології Digital Twin сприяє скороченню виробничих витрат, підвищенню продуктивності, мінімізації технологічних ризиків, зменшенню часу простоїв обладнання та забезпечує більш високий рівень гнучкості й адаптивності виробничих систем. У поєднанні зі штучним інтелектом, великими даними (Big Data), хмарними технологіями та промисловим Інтернетом речей цифрові двійники стають ключовим елементом цифрової трансформації підприємств, забезпечуючи реалізацію принципів інтелектуального виробництва в межах концепцій Industry 4.0 та Industry 5.0.

Концептуальна модель цифрового моделювання виробничих процесів на основі технології Digital Twin представлена на рис.1.

Представлена на рис.1 концептуальна модель цифрового моделювання виробничих процесів на основі технології Digital Twin відображає взаємозв'язок між фізичним виробництвом, цифровою інфраструктурою підприємства та системою підтримки управлінських рішень.

Першим рівнем моделі є фізичне виробництво, яке охоплює виробниче обладнання, технологічні лінії, персонал і матеріальні потоки. У процесі функціонування виробничої системи за допомогою датчиків Інтернету речей (IoT), програмованих логічних контролерів (PLC), RFID-технологій та систем диспетчерського керування (SCADA) здійснюється безперервний збір технологічних параметрів у режимі реального часу.

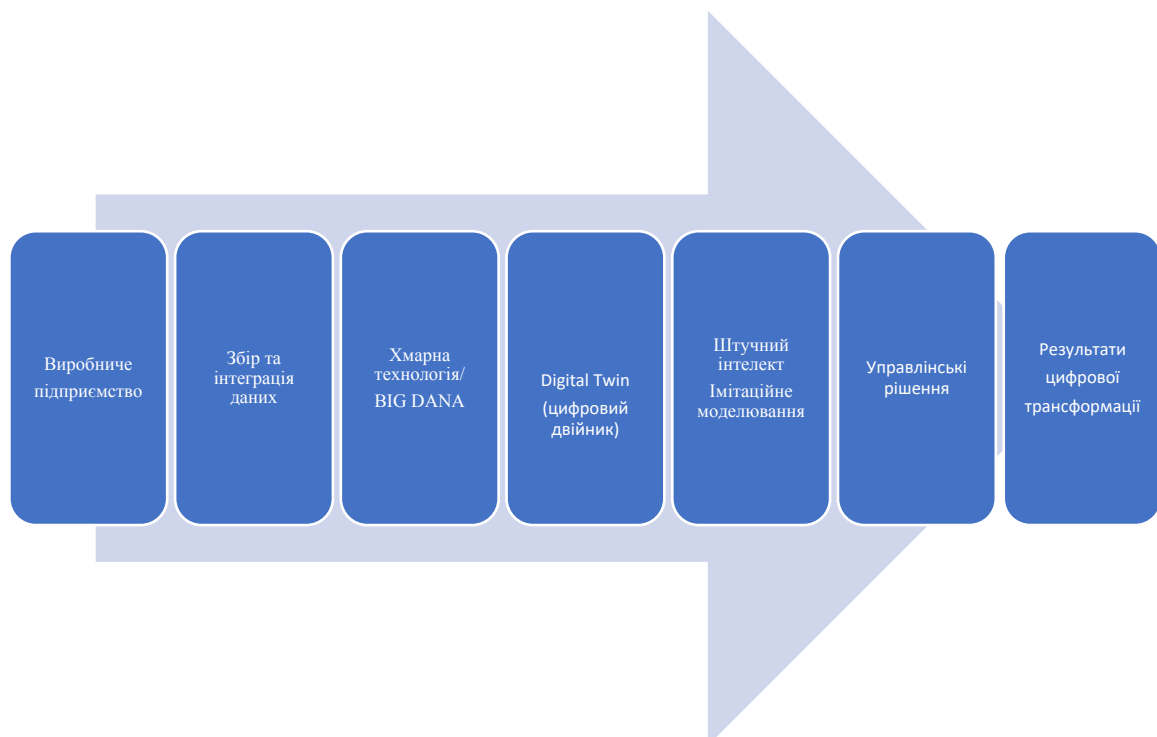


Рис.1. Концептуальна модель цифрового моделювання виробничих процесів на основі технології Digital Twin.

Джерело: розроблено автором.

На другому рівні відбувається інтеграція даних із корпоративних інформаційних систем ERP, MES, WMS, APS та інших цифрових платформ, що забезпечує формування єдиного інформаційного

простору підприємства. Отримані дані накопичуються та обробляються із застосуванням хмарних технологій і технологій Big Data, що створює інформаційну основу для побудови цифрового двійника.

Центральним елементом моделі є Digital Twin — цифрова копія виробничої системи, яка відображає її поточний стан, дозволяє моделювати виробничі процеси, аналізувати матеріальні потоки, оцінювати ефективність використання ресурсів і прогнозувати наслідки управлінських рішень без втручання у реальне виробництво.

Функціональні можливості цифрового двійника суттєво розширюються завдяки застосуванню технологій штучного інтелекту та імітаційного моделювання, які забезпечують прогнозування технічного стану обладнання, оптимізацію виробничих процесів, виявлення «вузьких місць» виробництва, оцінювання альтернативних сценаріїв розвитку та підтримку прийняття управлінських рішень.

Результатом використання цифрового моделювання є підвищення продуктивності виробництва, скорочення виробничих витрат, мінімізація простоїв обладнання, раціоналізація використання ресурсів, підвищення якості продукції та гнучкості виробничої системи. У сукупності це створює технологічне підґрунтя для реалізації концепцій Industry 4.0 та Industry 5.0, що передбачають інтеграцію інтелектуальних цифрових технологій із принципами сталого розвитку та людиноцентричного управління промисловим виробництвом.

Обговорення

Інтерпретація результатів. Отримані результати свідчать, що ефект від технології Digital Twin виникає не від її ізольованого впровадження, а від інтеграції цифрового двійника з датчиками Інтернету речей, аналітикою великих даних та корпоративними системами ERP і MES. Саме безперервна синхронізація фізичного та віртуального контурів дає змогу переносити перевірку управлінських рішень у віртуальне середовище й ухвалювати їх до втручання в реальне виробництво.

Порівняння з іншими дослідженнями. Одержані висновки узгоджуються з положеннями M. Grieves і J. Vickers [3] та F. Tao зі співавторами [4] щодо ролі цифрового двійника як засобу безперервного обміну даними між фізичним і цифровим середовищем. Водночас, на відміну від зазначених праць, зорієнтованих переважно на технологічному аспекті, у цьому дослідженні наголошено на управлінському контурі моделі. Результати також підтверджують висновки A. Frank, L. Dalenogare і N. Ayala [9] про зростання ефективності від комплексного, а не вибіркового впровадження цифрових технологій та доповнюють підходи J. Barata й I. Kayser [12] і B. Wang зі співавторами [14] у частині поєднання цифрового двійника з людиноцентричними принципами Industry 5.0.

Наукова новизна (розгорнуто). Новизна дослідження полягає в тому, що цифрове моделювання виробничих процесів розглянуто не як окрему технологію, а як інтегровану архітектуру, у якій фізичне виробництво, корпоративні інформаційні системи ERP, MES, WMS, APS, технології Інтернету речей, Big Data та штучного інтелекту об'єднані в єдиний контур підтримки прийняття управлінських рішень. Такий підхід дає змогу перейти від опису окремих можливостей цифрових двійників до цілісного бачення цифрового виробничого середовища промислового підприємства.

Практичне значення (розгорнуто). Запропонована модель може використовуватися промисловими підприємствами як орієнтир під час формування цифрових стратегій, визначення послідовності впровадження цифрових технологій та оцінювання готовності інформаційної інфраструктури до побудови цифрового двійника. Наведений у табл. 1 перелік технологічних чинників і очікуваних ефектів придатний для попереднього відбору технологій відповідно до пріоритетів підприємства — скорочення простоїв, зниження витрат, підвищення якості продукції або гнучкості виробництва.

Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що цифрове моделювання виробничих процесів є одним із ключових напрямів цифрової трансформації промислових підприємств в умовах реалізації концепцій Industry 4.0 та Industry 5.0. Доведено, що комплексне використання технології Digital Twin у поєднанні з технологіями Інтернету речей, штучного інтелекту, Big Data, хмарними сервісами та корпоративними інформаційними системами ERP і MES забезпечує безперервний моніторинг виробничих процесів, прогнозування технічного стану обладнання, оптимізацію використання ресурсів, скорочення виробничих витрат і підвищення ефективності прийняття управлінських рішень. Обґрунтовано концептуальну модель цифрового моделювання виробничих процесів, яка інтегрує фізичне виробництво, цифрову інфраструктуру підприємства та сучасні інформаційні технології в єдине цифрове виробниче середовище. Практичне значення запропонованої

моделі полягає у можливості її використання промисловими підприємствами для підвищення продуктивності виробництва, гнучкості виробничих систем, якості продукції, рівня ресурсоефективності та конкурентоспроможності. Запропоновані теоретичні положення можуть бути використані як методична основа для розроблення цифрових стратегій розвитку підприємств і впровадження інтелектуальних виробничих систем. Перспективи подальших досліджень доцільно пов'язати з розробленням методичного інструментарію оцінювання ефективності цифрових двійників, економічної результативності їх впровадження та адаптації концепції Human Digital Twin до потреб промислових підприємств в умовах Industry 5.0.

Список використаних джерел

1. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. Securing the Future of German Manufacturing Industry: Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0 : Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. Acatech — National Academy of Science and Engineering, 2013. 678 p.
2. Monostori L. Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges. *Procedia CIRP*. 2014. P. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.115>
3. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. Cham : Springer International Publishing, 2016. P. 85–113.
4. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. Vol. 15, № 4. P. 2405–2415. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
5. 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. № 4. С. 127–132. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.127>
6. Law A. M. Design and Analysis of Simulation Experiments Using Three Simple Statistical Formulas. 2023 Winter Simulation Conference (WSC). 2023. P. 1487–1500. DOI: <https://doi.org/10.1109/WSC60868.2023.10407750>
7. Madni A. M., Madni K. K., Lucero S. D. Using Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*. 2019. Vol. 7, № 1. P. 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
8. Zhou K., Liu T., Zhou L. Industry 4.0: Towards Future Industrial Opportunities and Challenges. 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), Zhangjiajie, China, 15–17 August 2015. P. 2147–2152. DOI: <https://doi.org/10.1109/FSKD.2015.7382284>
9. Frank A. G., Dalenogare L. S., Ayala N. F. Industry 4.0 Technologies: Implementation Patterns in Manufacturing Companies. *International Journal of Production Economics*. 2019. Vol. 210. P. 15–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
10. Thelen A., Zhang X., Fink O., Lu Y., Ghosh S., Youn B. D., Todd M. D., Mahadevan S., Hu C., Hu Z. A Comprehensive Review of Digital Twin. Part 1: Modeling and Twinning Enabling Technologies. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2022. Vol. 65, № 12. P. 354. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03425-4>
11. Thelen A., Zhang X., Fink O., Lu Y., Ghosh S., Youn B. D., Todd M. D., Mahadevan S., Hu C., Hu Z. A Comprehensive Review of Digital Twin. Part 2: Roles of Uncertainty Quantification and Optimization, a Battery Digital Twin, and Perspectives. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2022. Vol. 66, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03410-x>
12. Barata J., Kayser I. How Will the Digital Twin Shape the Future of Industry 5.0? *Technovation*. 2024. Vol. 134. P. 103025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2024.103025>
13. Isaza Domínguez L. G. Digital Twins in Industry 5.0: A Systematic Literature Review. *European Public & Social Innovation Review*. 2024. Vol. 9. P. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.31637/epsir-2024-641>
14. Wang B., Zhou H., Li X., Yang G., Zheng P., Song C., Yuan Y., Wuest T., Yang H., Wang L. Human Digital Twin in the Context of Industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2024. Vol. 85. P. 102626. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102626>
15. Dörner K., Edelman D. What “Digital” Really Means. *McKinsey Digital*. 2015. URL: <http://www.mckinsey.com/industries/high-tech/our-insights/what-digital-really-means>
16. Nahavandi S. Industry 5.0 — A Human-Centric Solution. *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Art. 4371. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11164371>
17. Özdemir V., Hekim N. Birth of Industry 5.0: Making Sense of Big Data with Artificial Intelligence, “the Internet of Things” and Next-Generation Technology Policy. *OMICS: A Journal of Integrative Biology*. 2018. Vol. 22, № 1. P. 65–76. DOI: <https://doi.org/10.1089/omi.2017.0194>

18. Rosen R., von Wichert G., Lo G., Bettenhausen K. D. About the Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48, № 3. P. 567–572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
19. Zafar M. H., Langås E. F., Sanfilippo F. Exploring the Synergies between Collaborative Robotics, Digital Twins, Augmentation, and Industry 5.0 for Smart Manufacturing: A State-of-the-Art Review. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2024. Vol. 89. P. 102769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102769>

References

1. Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Acatech — National Academy of Science and Engineering. [in English].
2. Monostori, L. (2014). Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. Procedia CIRP, 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.115> [in English].
3. Grieves, M., & Vickers, J. (2016). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches (pp. 85–113). Springer International Publishing. [in English].
4. Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 15(4), 2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186> [in English].
5. Shcheglov, V. R., & Morozova, O. I. (2022). Metody ta tekhnolohii rozroblennia tsyfrovyykh dviinykiv dlia harantozdatnykh system industrialnoho internetu rechei [Methods and technologies for developing digital twins for dependable systems of the Industrial Internet of Things]. Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku, (4), 127–132. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.127> [in Ukrainian].
6. Law, A. M. (2023). Design and analysis of simulation experiments using three simple statistical formulas. In 2023 Winter Simulation Conference (WSC) (pp. 1487–1500). <https://doi.org/10.1109/WSC60868.2023.10407750> [in English].
7. Madni, A. M., Madni, K. K., & Lucero, S. D. (2019). Using digital twin technology in model-based systems engineering. Systems, 7(1), 7. <https://doi.org/10.3390/systems7010007> [in English].
8. Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2015). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. In 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD) (pp. 2147–2152). <https://doi.org/10.1109/FSKD.2015.7382284> [in English].
9. Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. International Journal of Production Economics, 210, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004> [in English].
10. Thelen, A., Zhang, X., Fink, O., Lu, Y., Ghosh, S., Youn, B. D., Todd, M. D., Mahadevan, S., Hu, C., & Hu, Z. (2022). A comprehensive review of digital twin — Part 1: Modeling and twinning enabling technologies. Structural and Multidisciplinary Optimization, 65(12), 354. <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03425-4> [in English].
11. Thelen, A., Zhang, X., Fink, O., Lu, Y., Ghosh, S., Youn, B. D., Todd, M. D., Mahadevan, S., Hu, C., & Hu, Z. (2022). A comprehensive review of digital twin — Part 2: Roles of uncertainty quantification and optimization, a battery digital twin, and perspectives. Structural and Multidisciplinary Optimization, 66(1). <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03410-x> [in English].
12. Barata, J., & Kayser, I. (2024). How will the digital twin shape the future of Industry 5.0? Technovation, 134, 103025. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2024.103025> [in English].
13. Isaza Domínguez, L. G. (2024). Digital twins in Industry 5.0: A systematic literature review. European Public & Social Innovation Review, 9, 1–21. <https://doi.org/10.31637/epsir-2024-641> [in English].
14. Wang, B., Zhou, H., Li, X., Yang, G., Zheng, P., Song, C., Yuan, Y., Wuest, T., Yang, H., & Wang, L. (2024). Human digital twin in the context of Industry 5.0. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 85, 102626. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102626> [in English].
15. Dörner, K., & Edelman, D. (2015). What “digital” really means. McKinsey Digital. <http://www.mckinsey.com/industries/high-tech/our-insights/what-digital-really-means> [in English].
16. Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0 — A human-centric solution. Sustainability, 11, 4371, 1–13. <https://doi.org/10.3390/su11164371> [in English].

17. Özdemir, V., & Hekim, N. (2018). Birth of Industry 5.0: Making sense of big data with artificial intelligence, “the Internet of Things” and next-generation technology policy. *OMICS: A Journal of Integrative Biology*, 22(1), 65–76. <https://doi.org/10.1089/omi.2017.0194> [in English].
18. Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., & Bettenhausen, K. D. (2015). About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 567–572. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141> [in English].
19. Zafar, M. H., Langås, E. F., & Sanfilippo, F. (2024). Exploring the synergies between collaborative robotics, digital twins, augmentation, and Industry 5.0 for smart manufacturing: A state-of-the-art review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 89, 102769. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102769> [in English].