

О. О. МЕЛЬНИК

кандидат технічних наук,
доцент кафедри технології машинобудування
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-8667-4262

Ю. Ю. ВАРИВОДА

кандидат технічних наук,
доцент кафедри процесів та апаратів харчової інженерії
Львівський національний університет ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С. З. Гжицького
ORCID: 0009-0008-2779-2366

А. А. СУБІН

кандидат технічних наук,
доцент кафедри технології машинобудування
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-5747-2397

РОЗРОБКА ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО ЗНОСУ ВИРОБНИЧОГО ОБЛАДНАННЯ

З метою підвищення ефективності управління виробничими процесами та прогнозування технічного зносу обладнання у роботі досліджено особливості застосування цифрових технологій у реальному секторі економіки, що охоплює як індустріальні, так і агропромислові підприємства. Визначено, що цифрові двійники виступають базовим інструментом для створення віртуальної моделі фізичних об'єктів, здатної відтворювати їхній стан у реальному часі на основі даних, отриманих із сенсорів IoT, алгоритмів машинного навчання та аналітики великих даних. Метою дослідження є обґрунтування ефективності впровадження цифрових двійників у системі управління технічним станом виробничих засобів і визначення переваг та ризиків цифрової трансформації. Для досягнення мети застосовано методи аналізу, синтезу та узагальнення.

Показано, що використання технологій штучного інтелекту, IoT та Big Data сприяє підвищенню продуктивності підприємств на 20–30 %, зменшенню операційних витрат на 15–25 % і скороченню часу простоїв обладнання. У роботі систематизовано ключові фактори успішного впровадження цифрових технологій, серед яких розвиток компетентностей персоналу, стратегічне планування інтеграції систем і посилення кіберзахисту. Запропоновано концепцію поетапного впровадження цифрових двійників у структуру підприємств із метою підвищення точності діагностики, зменшення аварійності та оптимізації ремонтних процесів. Визначено основні виклики цифровізації, серед яких високі початкові витрати, дефіцит кваліфікованих кадрів і ризики кібербезпеки. З огляду на це, рекомендовано посилити підготовку персоналу, впровадити навчальні програми та вдосконалити політику інформаційного захисту. Отримані результати можуть бути використані для формування інтегрованих систем прогнозування стану технічних засобів у межах концепції «розумного виробництва» та подальшої цифрової трансформації промислових підприємств.

Ключові слова: цифрові технології, виробничі процеси, управління, автоматизація, продуктивність, IoT, штучний інтелект, Big Data.

O. O. MELNYK

Ph.D. in Engineering,
Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology
Educational and Research Institute of Mechanical Engineering
of National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-8667-4262

YU. YU. VARYVODA

Ph.D. in Engineering,
Associate Professor at the Department of Processes
and Apparatus of Food Engineering
Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine
and Biotechnologies Lviv
ORCID: 0009-0008-2779-2366

A. A. SUBIN

PhD in Engineering,
Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology
Institute of Mechanical Engineering
of National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-5747-2397

DEVELOPMENT OF DIGITAL TWINS FOR PREDICTING TECHNICAL WEAR OF PRODUCTION EQUIPMENT

The study explores the features of digital technology implementation in the real sector of the economy, encompassing both industrial and agro-industrial enterprises, with the aim of improving the efficiency of production process management and predicting the technical wear of equipment. It is determined that digital twins serve as a fundamental tool for creating virtual models of physical objects capable of reproducing their condition in real time based on data obtained from IoT sensors, machine learning algorithms, and big data analytics.

The purpose of the study is to substantiate the effectiveness of implementing digital twins in systems for managing the technical condition of production assets and to identify the advantages and risks of digital transformation. To achieve this goal, methods of analysis, synthesis, and generalization were applied.

It is shown that the use of artificial intelligence, IoT, and Big Data technologies contributes to increasing enterprise productivity by 20–30%, reducing operating costs by 15–25%, and decreasing equipment downtime. The study systematizes the key factors for the successful implementation of digital technologies, including personnel competency development, strategic system integration planning, and strengthening of cybersecurity. A concept for the phased introduction of digital twins into enterprise structures is proposed to improve diagnostic accuracy, reduce accident rates, and optimize maintenance processes.

The main challenges of digitalization are identified, such as high initial costs, shortage of qualified personnel, and cybersecurity risks. Therefore, it is recommended to enhance staff training, introduce educational programs, and improve information protection policies. The obtained results can be used to develop integrated systems for predicting the condition of technical assets within the framework of the “smart manufacturing” concept and to further advance the digital transformation of industrial enterprises.

Key words: digital technologies, production processes, management, automation, productivity, IoT, artificial intelligence, Big Data.

Постановка проблеми

У сучасному реальному секторі економіки, який охоплює як індустріальне, так і агропромислове виробництво, виникають численні виклики, зокрема проблеми технічного зносу обладнання, подолання яких потребує інноваційних підходів до управління виробничими процесами. Зношене устаткування знижує ефективність виробництва і може призводити до аварій, технологічних збоїв та фінансових втрат, що підкреслює важливість розробки нових методів прогнозування зносу.

Цифрові двійники (далі – ЦД), що використовуються як віртуальні аналоги фізичних об’єктів, дозволяють здійснювати детальний аналіз стану обладнання в реальному часі на основі даних IoT, систем штучного інтелекту та BigData для моделювання його поведінки й оптимізації технічного обслуговування.

Проте впровадження ЦД супроводжується низкою викликів, таких як високі початкові витрати, необхідність спеціалізованих знань, інтеграції з наявними виробничими системами та забезпечення кібербезпеки даних.

Дослідження ЦД у контексті прогнозування технічного зносу є актуальним, оскільки поєднує теоретичні аспекти цифрових технологій із практичними завданнями реального сектору економіки, що охоплює промислові й агропромислові підприємства. Актуальність теми полягає у необхідності підвищення ефективності виробництва через впровадження сучасних цифрових технологій (далі – ЦТ). Це сприятиме зміцненню конкурентоспроможності підприємств на глобальному ринку та формуванню практичних рекомендацій щодо оптимізації впровадження ЦД.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз наукових публікацій демонструє активне вивчення інтеграції сучасних цифрових технологій з метою підвищення надійності виробничих систем. Значна увага приділяється розробці та впровадженню цифрових двійників у контексті промислового Інтернету речей (далі – ІоТ) для прогнозування технічного стану обладнання. Так, І. Невлюдов, С. Новосьолов та О. Сичова представили архітектуру автоматизованої системи управління технологічними процесами, основу на концепції розумного заводу. У цій роботі ЦД, тісно інтегровані з ІоТ, використовуються для моделювання виробничих процесів та прогнозування їхнього розвитку, що своєю чергою забезпечує вдосконалення децентралізованого управління [1]. Розвиваючи цю тезу, І. Невлюдов, С. Новосьолов, О. Сичова, В. Гопєєнко та Н. Косєнко запропонували моделі децентралізованого управління, специфічні для умов Індустрії 4.0, акцентуючи увагу на необхідності вбудовування сенсорних систем у кіберфізичні системи для досягнення високої точності прогнозів зносу [2].

С. Аттаран (S. Attaran), М. Аттаран (M. Attaran) та Б. Г. Челік (B. G. Celik) підтверджують критичну роль ЦД у верифікації експлуатаційних характеристик та оцінюванні залишкового ресурсу механізмів, хоча і вказують на методологічні труднощі у чіткому розмежуванні функціоналу ЦД порівняно із традиційними методами моделювання [3].

Паралельно з технічними аспектами в низці досліджень розглядається ширший вплив цифровізації. Так, І. Томашук, Ю. Сусідєнко та М. Бурдяк фокусують свою увагу на макро- та мікроекономічних наслідках, пов'язуючи впровадження цифрових рішень з екологічними цілями, зокрема моніторингом екологічного сліду для забезпечення сталого розвитку, навіть у такому специфічному секторі, як аграрний [4]. М. Бурдяк та І. Томашук також демонструють, як принципи Четвертої промислової революції трансформують бізнес-моделі в сільському господарстві, стимулюючи сталий розвиток цієї сфери [5]. І. Гончарук та І. Томашук підкреслюють, що для реалізації цих змін в аграрному секторі критично необхідним є впровадження інноваційно-інвестиційної моделі, де стратегічні інновації та ресурсозберігаючі технології забезпечують комплексні економічні, соціальні та екологічні вигоди, стимульовані синергією держави, бізнесу та науки [6].

Окрім апаратних та виробничих рішень, значна частина наукової уваги зосереджена на ролі ШІ. К. Чєн (K. Chen) визначає ШІ як основну рушійну силу сучасних технологічних інновацій та промислової трансформації, що має глибокий вплив як на глобальну економіку, так і на внутрішні процеси організацій [7].

Як зазначають А. Малік (A. Malik), П. Будвар (P. Budhwar) та Б. П. Казмі (B. A. Kazmi), попри доведену здатність ШІ підвищувати продуктивність у сфері управління людськими ресурсами (УЛР), спостерігається дефіцит чіткої стратегічної бази для HR-менеджерів щодо ефективної інтеграції цих інструментів. Це зумовлює суттєву трансформацію робочих процесів і ролей працівників [8].

На думку М. Дарон (M. Daroń) і М. Гурської (M. Górska), ШІ став глобальним стандартом, який визначає ринкові переваги та формує нові бізнес-моделі, при цьому особливу увагу вони приділяють потребі посилення регулювання його використання. Це проілюстровано на прикладі впливу ШІ на підприємництво за даними Євростату [9].

У дослідженні Х. Ван (H. Wang) підкреслюється, що для підвищення операційної ефективності й конкурентоспроможності в умовах цифрової трансформації підприємствам Китаю необхідно створити систему управління на основі даних, розвивати кадровий потенціал у сфері штучного інтелекту та впроваджувати інтелектуальні системи менеджменту, узгоджені з національною стратегією розвитку цифрової економіки [10].

Отже, аналіз останніх досліджень показує, що розробка ефективних механізмів прогнозування зносу виробничого обладнання нерозривно пов'язана з повноцінною інтеграцією кіберфізичних систем ІоТ, потужним аналітичним апаратом ЦД та застосуванням алгоритмів ШІ. Виявлено, що технічні аспекти моделювання та інтеграції досить добре вивчені, однак залишається прогалина у формуванні уніфікованих стратегічних рамок для повноцінного використання потенціалу цих технологій у контексті управління активами, а також у доведенні прямого економічного ефекту від застосування ЦД в прогнозуванні зносу на рівні, порівнянному з наявними дослідженнями щодо ШІ та цифровізації загалом. Подальше дослідження має на меті заповнити цю прогалину шляхом розробки верифікованої моделі ЦД, орієнтованої саме на точне прогнозування залишкового ресурсу обладнання.

Формулювання мети дослідження

Мета статті: вивчення впливу ЦТ на ефективність управління виробничими процесами в промисловості, а також визначення основних переваг і викликів, пов'язаних із їх впровадженням.

Завдання статті:

1. Проаналізувати сучасні ЦТ, що використовуються в управлінні виробничими процесами, такі як ІоТ, Big Data та ШІ.
2. Визначити основні переваги впровадження ЦТ у виробництво.
3. Описати можливі виклики та ризики, пов'язані з інтеграцією ЦТ у виробничі процеси, а також запропонувати рекомендації для їх подолання.

Викладення основного матеріалу дослідження

Цифрові двійники – це концептуально-методологічна конструкція, що є віртуальним, динамічно оновлюваним аналогом фізичного об'єкта, процесу чи системи. У контексті прогнозування технічного зносу виробничого обладнання ЦД функціонує як динамічний віртуальний аналог фізичного активу. Він об'єднує точну геометричну та функціональну реплікацію цього активу з постійним потоком даних у режимі реального часу, отриманих через IoT-датчики (наприклад, температура, вібрація, навантаження). На основі цих даних та вбудованих фізичних моделей двійник симулює процеси деградації компонентів. Інтегровані алгоритми машинного навчання ШІ здійснюють прогностичну аналітику, що дає змогу точно визначати час до критичного збою та оцінювати вплив різних експлуатаційних режимів.

ЦД стають незамінним інструментом для оптимізації технічного обслуговування та запобігання незапланованим зупинкам виробництва. Ця можливість реалізується завдяки сучасним ЦТ, таким як IoT, Big Data та ШІ, які відіграють ключову роль в управлінні виробничими процесами, підвищуючи загальну ефективність підприємств та знижуючи операційні витрати.

IoT – це комплексна структура, що охоплює взаємопов'язані фізичні об'єкти, людей, системи та інформаційні ресурси. Ця концепція дозволяє створювати мережі пристроїв, здатних обробляти дані як з реального, так і з віртуального середовища, а також реагувати на них. Мережі IoT безперервно акумулюють інформацію, аналізують її та виконують автоматизовані дії на основі отриманих даних [11, с. 218]. IoT базується на сенсорах, які вимірюють фізичні параметри, перетворюючи їх на цифрові дані, та кінцевих точках для їх агрегації й передачі [12, с. 55].

ЦД, використовуючи дані сенсорів IoT у реальному часі, створюють віртуальні моделі фізичних об'єктів для прогнозування стану та технічного зносу. Така інтеграція забезпечує своєчасне виявлення проблем та оптимізацію обслуговування.

Принципи роботи IoT включають постійний моніторинг фізичних явищ сенсорами, передачу зібраних даних через мережі з використанням різних протоколів та подальшу аналітичну обробку (включно з машинним навчанням) для виявлення аномалій та генерації рекомендацій [11, с. 219; 13].

Інтеграція IoT і ЦД є критично важливою для промисловості, оскільки сприяє підвищенню ефективності, зниженню витрат та запобіганню аваріям шляхом точного прогнозування технічного зносу.

У промисловості IoT використовується для предиктивного обслуговування та автоматизації. Наприклад, Rolls-Royce реалізує проєкт Intelligent Engine, що передбачає застосування «розумних» авіадвигунів, які можуть взаємодіяти між собою і з мережею підтримки. Ці двигуни «вчаться» на основі попереднього досвіду й можуть адаптувати свої параметри роботи залежно від умов [14].

Ще один приклад – компанія JohnDeere, яка інвестує 250 млн дол. США у стартап Bear Flag Robotics для автоматизації тракторів. Трактори використовують камери та радары, підключені до хмарної платформи, що дозволяє їм самостійно обробляти поля і збирати дані для клієнтів. Власники ферм можуть переглядати результати роботи через смартфони або ПК [15].

IoT у промисловості не лише підвищує ефективність виробництв, але й пропонує інноваційні механізми для вирішення актуальних проблем, таких як нестача кваліфікованої робочої сили в сільському господарстві. Автономні технології слугують безпечною і продуктивною альтернативою для подолання зазначених викликів. У цьому контексті аналіз BigData стає важливим інструментом, що дає змогу підприємствам оптимізувати необхідні процеси та приймати обґрунтовані рішення на основі отриманих даних.

Big Data охоплюють значні масиви як структурованої, так і неструктурованої інформації, що генерується внаслідок діяльності підприємств і технологічних процесів. Вони характеризуються великими обсягами, високою швидкістю обробки та різноманітністю, що робить їх ключовим інструментом для оптимізації виробництв, прогнозування зносу обладнання та підвищення ефективності. Використання технологій аналізу Big Data дозволяє виявляти закономірності в роботі обладнання та покращувати логістичні процеси, сприяючи зниженню витрат і підвищенню якості продукції [16, с. 3].

Сенсорні технології забезпечують моніторинг стану обладнання в реальному часі, а хмарні сервіси дають змогу ефективно зберігати та обробляти ці дані. Програмне забезпечення, таке як Hadoop і Spark, допомагає виявляти корисні патерни, а алгоритми машинного навчання використовуються для прогнозування зносу на основі історичних даних.

Штучний інтелект також стає важливим елементом управління виробництвом, забезпечуючи оптимізацію процесів, зниження витрат і підвищення продуктивності через новітні технології, зокрема такі, як глибинне навчання та робототехніка (див. табл. 1) [16, с. 4].

Алгоритми машинного навчання застосовуються для аналізу даних продажів, що дає змогу точно передбачати майбутній попит на продукцію, сприяючи ефективному плануванню виробництва та управлінню запасами. Аналіз великих даних допомагає компаніям виявляти проблеми в ланцюгах постачання та оптимізувати їх, що веде до зниження витрат і покращення термінів доставки.

Таблиця 1

Основні алгоритми та технології ШІ

| Алгоритми та технології ШІ | Опис |
|----------------------------|--|
| Машинне навчання | Завдяки сучасним технологіям системи здатні аналізувати інформацію, виявляти закономірності та ухвалювати рішення з мінімальним людським втручанням. Ці технології активно використовуються для прогнозування попиту, управління запасами та налагодження взаємин з клієнтами |
| Глибинне навчання | Як складова машинного навчання, глибинне навчання застосовує багатошарові нейронні мережі для обробки складних наборів даних, дозволяючи вирішувати завдання, пов'язані з розпізнаванням образів і мовлення. Це особливо корисно в таких сферах, як оцінювання кредитних ризиків та планування технічного обслуговування |
| Обробка природної мови | Технологія надає комп'ютерам можливість інтерпретувати та генерувати людську мову. Вона широко використовується для автоматизації обслуговування клієнтів через чат-боти і віртуальних асистентів, а також для аналізу споживчих настроїв |
| Комп'ютерний зір | Системи комп'ютерного зору мають здатність інтерпретувати візуальну інформацію, що робить їх корисними для контролю якості продукції, автоматизації інвентаризаційних процесів і моніторингу робочих потоків |
| Робототехніка | Використання роботизованих систем для виконання небезпечних або рутинних завдань сприяє підвищенню ефективності виробництва та зменшенню ризиків для працівників |
| Експертні системи | Програмні рішення імітують процес прийняття рішень експертами в різних галузях, що дозволяє здійснювати діагностику проблем та прогнозування майбутніх подій |

Джерело: узагальнено на основі [17, с. 4].

Системи комп'ютерного зору автоматично визначають дефекти на виробничих лініях, забезпечуючи високу якість продукції. Чат-боти та віртуальні асистенти, використовуючи обробку природної мови (NLP), значно покращують взаємодію з клієнтами, надаючи оперативні відповіді на запити. Глибинне навчання також допомагає підприємствам прогнозувати потреби в технічному обслуговуванні обладнання, що зменшує час простою та витрати на ремонті [16, с. 4].

Дослідження McKinsey, проведене з 11 по 21 квітня 2023 року, виявило, що лише 22 % підприємств регулярно використовують ШІ у своїй діяльності. Опитування охопило 1684 учасників з різних регіонів, включаючи Європу та Північну Америку. Найбільше респондентів (14 %) зазначили використання ШІ в маркетингу і продажах, 13 % – у розробці нових товарів, а 10 % – у сервісних операціях. Третина організацій вже впроваджує ШІ в управлінні, а 40 % планують збільшити інвестиції в цю технологію [18].

Впровадження ШІ у виробничі процеси відкриває нові можливості для оптимізації та підвищення ефективності підприємств. Використання сучасних алгоритмів покращує управлінські рішення, що у свою чергу сприяє розвитку компаній. Інтеграція цифрових технологій позитивно впливає на операційну ефективність завдяки автоматизації та об'єднанню інформаційних платформ, що скорочує час виконання завдань і знижує ризик виникнення помилок. Дослідження свідчать, що підприємства, які впроваджують цифровізацію, можуть підвищити продуктивність на 20–30 %, оптимізуючи робочі процеси. Крім того, автоматизоване управління дозволяє зменшити операційні витрати на 15–25 %, а інвестиції в цифрові рішення досягають точки беззбитковості протягом 1–3 років, підтверджуючи їх фінансову доцільність [19, с. 4].

ЦТ також позитивно впливають на якість продукції. Впровадження новітніх технологій, таких як системи моніторингу в реальному часі та аналітика даних, забезпечує точний контроль виробничих процесів. Наприклад, дрони використовуються для оцінювання стану сільськогосподарських культур, а автоматизовані системи контролю якості гарантують відповідність стандартам безпеки у харчовій промисловості.

Адаптація ЦТ нерідко супроводжується технічними та фінансовими труднощами. Приміром, значні початкові витрати можуть стати перешкодою для малих і середніх підприємств, оскільки придбання апаратно-програмних комплексів часто перевищує їхні фінансові можливості. Інтеграція нових систем з наявними може сповільнювати впровадження та призводити до додаткових витрат, що підкреслює необхідність стратегічного планування.

Організаційні ризики потребують серйозної уваги, оскільки набуття нових навичок працівниками є критично важливим у контексті сучасних технологій. Недостатня підготовка може негативно вплинути на продуктивність і якість роботи, а опір змінам з боку співробітників – суттєво зашкодити цифровізації. Тому активне управління змінами і стратегічний підхід до інтеграції цифрових засобів необхідні для успішного впровадження інновацій.

Проблеми безпеки даних та інформаційно-технологічні загрози становлять істотний ризик при використанні цифрових інструментів. Кіберзагрози можуть призвести до витоку конфіденційної інформації або зупинки діяльності, тому важливо впроваджувати заходи для забезпечення цілісності даних. Особливу увагу слід приділити розробці надійних архітектур безпеки для середовищ цифрових двійників, що включають шифрування даних, багаторфакторну автентифікацію та системи моніторингу загроз у режимі реального часу. Забезпечення стійкості системи до зовнішніх та внутрішніх кібератак є необхідною умовою для довіри до прогнозних моделей зносу обладнання.

Проекти в аграрному секторі потребують комплексного підходу, що включає аналіз процесів і ресурсів підприємства для виявлення вразливостей та пріоритетів. На основі цього аналізу слід визначити цільові показники, такі як підвищення продуктивності та зниження витрат. Розробка детальної дорожньої карти інтеграції цифрових рішень є критично важливою для реалізації стратегії. Після завершення проєкту важливо постійно оцінювати його результати та коригувати стратегію відповідно до змін на ринку.

Ключовим аспектом успішної розробки ЦД є розвиток професійних навичок працівників. Для цього пропонується впровадження освітніх ініціатив, зокрема визначення необхідних компетенцій для ефективного використання нових технологій та створення спеціалізованих навчальних програм. Використання інтерактивних модулів, віртуальних семінарів і практичних тренінгів сприятиме швидкому засвоєнню нових інструментів. залучення кваліфікованих фахівців до навчального процесу допоможе сформувати менторське середовище.

Систематичний моніторинг результатів навчання дозволить виявити прогалини у знаннях та оптимізувати програми підвищення кваліфікації. Забезпечення конфіденційності даних є важливим елементом розробки ЦД в агропромисловості. Рекомендується проводити оцінювання кіберризиків для виявлення загроз, розробити політику інформаційної безпеки, організувати навчальні сесії з кіберзахисту та впровадити системи проактивного моніторингу.

Отже, методологічні рекомендації щодо інтеграції цифрових інструментів як у промисловість, так і в аграрному секторі повинні охоплювати три ключові аспекти: технологічну імплементацію, розвиток людського капіталу та посилення кібербезпеки. Такий комплексний підхід є необхідним для успішної адаптації до нових умов функціонування та забезпечення сталого прогресу у сфері експлуатації виробничого обладнання.

Висновки

Дослідження показує, що сучасні цифрові технології відіграють ключову роль в управлінні виробничими процесами. Це може привести до збільшення продуктивності на 20–30 %, зменшення витрат на 15–25 % та покращення якості продукції. Проте, поряд із цими перевагами постають і виклики, такі як недостатня підготовленість працівників, високі початкові витрати та питання безпеки даних. Запропоновані рекомендації можуть полегшити інтеграцію цифрових технологій у виробництво.

Подальші дослідження варто зосередити на аналізі успішних випадків впровадження цифрових технологій у різних секторах та розробці адаптивних стратегій для малих і середніх підприємств. Важливим напрямом також є дослідження впливу нових технологій на управлінські рішення і формування інноваційних бізнес-моделей, заснованих на аналітиці даних та автоматизації.

Список використаної літератури

1. Невлюдов І., Новосьолов С., Сичова О. Метод децентралізованого керування технологічними процесами в інтелектуальному виробництві. *Інноваційні технології та наукові рішення для галузей*. 2025. № 1 (31). С. 166–179. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.1.166>
2. Decentralized information systems in intelligent manufacturing management tasks / I. Nevludov et al. *Advanced Information Systems*. 2024. Vol. 8, no. 3. P. 100–110. URL: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.3.12> (date of access: 15.10.2025).
3. 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. P. 100398. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100398> (date of access: 15.10.2025).
4. Томашук І., Сусіденко Ю., Бурдяк М. Глобальні тенденції розвитку світової економіки за умов цифровізації: екологічний аспект. *Бізнес-Навігатор*. 2024. № 2(75). DOI: <https://doi.org/10.32782/business-navigator.75-3>
5. Бурдяк М., Томашук І. Концептуальні засади формування стратегічних напрямків розвитку сільськогосподарських підприємств в умовах цифрування економіки. *Бізнес-Навігатор*. 2024. № 1 (74). DOI: <https://doi.org/10.32782/business-navigator.74-1>
6. Гончарук І., Томашук І. Вплив інноваційних процесів на підвищення конкурентоспроможності сільськогосподарських підприємств. Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки та практичної діяльності. 2023. № 1(63). С. 30–47. DOI: <https://doi.org/10.37128/2411-4413-2023-1-3>
7. Chen K. Innovation of Enterprise Management in the Era of Artificial Intelligence. *International Journal of Global Economics and Management*. 2024. Vol. 2, no. 2. P. 281–285. URL: <https://doi.org/10.62051/ijgem.v2n2.35> (date of access: 15.10.2025).
8. Malik A., Budhwar P., Kazmi B. A. Artificial intelligence (AI)-assisted HRM: Towards an extended strategic framework. *Human Resource Management Review*. 2022. P. 100940. URL: <https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2022.100940> (date of access: 15.10.2025).
9. Daroń M., Górska M. Enterprises development in context of artificial intelligence usage in main processes. *Procedia Computer Science*. 2023. Vol. 225. P. 2214–2223. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.10.212> (date of access: 15.10.2025).

10. Wang H. Analysis of the Impact of Artificial Intelligence on Modern Enterprise Management. *Modern Economics & Management Forum*. 2024. Vol. 5, no. 3. P. 495. URL: <https://doi.org/10.32629/memf.v5i3.2370> (date of access: 15.10.2025).
11. Гриб'юк О. О., Фільченко О. П. Специфіка використання Інтернет-технологій у підготовці майбутніх інженерів-програмістів у контексті змішаного навчання. *Інноваційна педагогіка*. 2025. Т. 2, № 85. С. 215–223. DOI: <https://doi.org/10.32782/ip/85.2.39>
12. Журило О., Ляшенко О. Архітектура та системи безпеки Інтернету речей на основі туманних обчислень. *Інноваційні технології та наукові рішення для промисловостей*. 2024. № 1 (27). С. 54–66. DOI: <https://doi.org/10.30837/itssi.2024.27.054>
13. Інтернет речей: що це таке та де застосовують?. *CyberCalm | Кіберзахист та кібербезпека простою мовою*. URL: <https://cybercalm.org/internet-recipe-shho-tse-take-ta-de-zastosovuyut/> (дата звернення: 15.10.2025).
14. Ukrinform. Rolls-Royce розробляє «розумний» авіадвигун, здатний ремонтувати сам себе. *Українформ – актуальні новини України та світу*. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/2397104-rollsroyce-rozroblaer-zozumnij-aviadvigun-zdatnij-remontuvati-sam-sebe.html> (дата звернення: 15.10.2025).
15. JohnDeere купить розробника автономних тракторів BearFlagRobotics. *Пропозиція – Головний журнал з питань агробізнесу*. URL: <https://propozitsiya.com/news/john-deere-kupyt-rozrobnyka-avtonomnykh-traktoriv-bear-flag-robotics> (дата звернення: 15.10.2025).
16. Максимова Ю. Значення великих даних у промисловості та економіці. *Економіка та суспільство*. 2021. Вип. 28. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-28-38> (дата звернення: 15.10.2025).
17. Орехов Д. Застосування штучного інтелекту в управлінні сучасним підприємством. *Економіка та суспільство*. 2024. № 64. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-64-143>
18. The state of AI in 2023: generative AI's breakout year. *McKinsey Company*. URL: [https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai-in-2023-generative-ais-breakout-year#/\(date of access: 15.10.2025\)](https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai-in-2023-generative-ais-breakout-year#/).
19. Ярошук Р. Вплив цифрових технологій на підвищення ефективності аграрного виробництва. *Економіка та суспільство*. 2024. Вип. 68. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-58> (дата звернення: 15.10.2025).

References

1. Nevliudov, I., Novoselov, S., & Sychova, O. (2025). *Metod detsentralizovanoho keruvannia tekhnolohichnymy protsesamy v intelektualnomu vyrobnytstvi* [Method of decentralized control of technological processes in intelligent manufacturing]. *Innovatsiini tekhnolohii ta naukovi rishennia dlia haluzei*, 1(31), 166–179. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.1.166>
2. Nevliudov, I., Novoselov, S., Sychova, O., Gopejenko, V., & Kosenko, N. (2024). Decentralized information systems in intelligent manufacturing management tasks. *Advanced Information Systems*, 8(3), 100–110. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.3.12>
3. 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>
4. Tomashuk, I., Susidenko, Y., & Burdiak, M. (2024). *Hlobalni tendentsii rozvytku svitovoi ekonomiky za umov tsyfrovizatsii: ekolohichni aspekt* [Global trends in world economic development under digitalization: ecological aspect]. *Biznes-Navigator*, 2(75). <https://doi.org/10.32782/business-navigator.75-3>
5. Burdiak, M., & Tomashuk, I. (2024). *Kontseptualni zasady formuvannia stratehichnykh napriamkiv rozvytku silskohospodarskykh pidpriemstv v umovakh tsyfrovannia ekonomiky* [Conceptual principles for forming strategic directions for agricultural enterprises development under economy digitalization]. *Biznes-Navigator*, 1(74). <https://doi.org/10.32782/business-navigator.74-1>
6. Honcharuk, I., & Tomashuk, I. (2023). *Vplyv innovatsiinykh protsesiv na pidvyshchennia konkurentospromozhnosti silskohospodarskykh pidpriemstv* [The influence of innovative processes on improving agricultural enterprises competitiveness]. *Ekonomika, finansy, menedzhment: aktualni pytannia nauky ta praktychnoi diialnosti*, 1(63), 30–47. <https://doi.org/10.37128/2411-4413-2023-1-3>
7. Chen, K. (2024). Innovation of enterprise management in the era of artificial intelligence. *International Journal of Global Economics and Management*, 2(2), 281–285. <https://doi.org/10.62051/ijgem.v2n2.35>
8. Malik, A., Budhwar, P., & Kazmi, B. A. (2022). Artificial intelligence (AI)-assisted HRM: Towards an extended strategic framework. *Human Resource Management Review*, 100940. <https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2022.100940>
9. Daroń, M., & Górska, M. (2023). Enterprises development in context of artificial intelligence usage in main processes. *Procedia Computer Science*, 225, 2214–2223. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.10.212>
10. Wang, H. (2024). Analysis of the impact of artificial intelligence on modern enterprise management. *Modern Economics & Management Forum*, 5(3), 495. <https://doi.org/10.32629/memf.v5i3.2370>

11. Hrybiuk, O. O., & Filchenko, O. P. (2025). *Spetsyfika vykorystannia Internet-tekhnologii u pidhotovtsi maibutnikh inzheneriv-prohramistiv u konteksti zmishanoho navchannia* [Specifics of using Internet technologies in the training of future software engineers in the context of blended learning]. *Innovatsiina pedahohika*, 2(85), 215–223. <https://doi.org/10.32782/ip/85.2.39>
12. Zhurylo, O., & Liashenko, O. (2024). *Arkhitektura ta systemy bezpeky Internetu rechei na osnovi tumnykh obchyslen* [Architecture and security systems of the Internet of Things based on fog computing]. *Innovatsiini tekhnologii ta naukovi rishennia dlia promyslovosti*, 1(27), 54–66. <https://doi.org/10.30837/itssi.2024.27.054>
13. CyberCalm. (2025). *Internet rechei: shcho tse take ta de zastosovuiut?* [Internet of Things: what it is and where it is used]. *CyberCalm | Kiberzakhyst ta kiberbezpeka prostoiu movoiu*. <https://cybercalm.org/internet-rechej-shho-tse-take-ta-de-zastosovuyut/>
14. Ukrinform. (2025). Rolls-Royce rozrobliaie “rozumniy” avidvyhun, zdatnyi remontuvaty sam sebe [Rolls-Royce develops a “smart” aircraft engine capable of self-repair]. *Ukrinform – aktualni novyny Ukrainy ta svitu*. <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/2397104-rollsroyce-rozroblae-rozumnij-aviadvigun-zdatnij-remontuvati-sam-sebe.html>
15. Propozytsiia. (2025). John Deere kupyt rozrobnyka avtonomnykh traktoriv Bear Flag Robotics [John Deere acquires developer of autonomous tractors Bear Flag Robotics]. *Propozytsiia – Holovnyi zhurnal z pytan ahrobiznesu*. <https://propozitsiya.com/news/john-deere-kupyt-rozrobnyka-avtonomnykh-traktoriv-bear-flag-robotics>
16. Maksymova, Yu. (2021). *Znachennia velykykh danykh u promyslovosti ta ekonomitsi* [The importance of big data in industry and economy]. *Ekonomika ta suspilstvo*, (28). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-28-38>
17. Oriekhov, D. (2024). *Zastosuvannia shtuchnoho intelektu v upravlinni suchasnym pidpriemstvom* [Application of artificial intelligence in modern enterprise management]. *Ekonomika ta suspilstvo*, (64). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-64-143>
18. McKinsey & Company. (2023). *The state of AI in 2023: Generative AI's breakout year*. <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai-in-2023-generative-ais-breakout-year#/>
19. Yaroshchuk, R. (2024). *Vplyv tsyfrovyykh tekhnologii na pidvyshchennia efektyvnosti ahrarnoho vyrobnytstva* [Impact of digital technologies on increasing the efficiency of agricultural production]. *Ekonomika ta suspilstvo*, (68). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-58>

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025