

DOI: 10.15276/EJ.01.2025.10
DOI: 10.5281/zenodo.15188488
UDC: 658:338.2
JEL: O33, Q55

ОСНОВНІ НАПРЯМИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРАНСФОРМАЦІЙ В 4D-ІНДУСТРІЇ

MAIN DIRECTIONS OF TECHNOLOGICAL TRANSFORMATIONS IN THE 4D INDUSTRY

Nataliia I. Duliaba, PhD in Economics, Associate Professor
Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
ORCID: 0000-0002-4377-874X
Email: nataliia.i.duliaba@lpnu.ua

Received 21.02.2025

Дуляба Н.І. Основні напрями технологічних трансформацій в 4D-індустрії. Оглядова стаття.

У статті розкрито основні напрями технологічних трансформацій у межах 4D-індустрії, яка охоплює цифровізацію, децентралізацію, дематеріалізацію та демократизацію виробничих процесів. Проаналізовано ключові цифрові технології (штучний інтелект, інтернет речей, аналітика великих баз даних, цифрова екосистема, доповнена віртуальна реальність, цифрові двійники, блокчейн, автономні роботи), їх переваги та виклики для бізнесу. Визначено перспективи розвитку та використання інноваційних технологій 4D-Індустрії в соціально-економічні процеси та виробничу діяльність, стратегічну роль 4D-індустрії у підвищенні ефективності, адаптивності та конкурентоспроможності підприємств. Обґрунтовано перспективи впровадження інновацій у різні галузі економіки з метою забезпечення сталого розвитку в умовах цифрової трансформації.

Ключові слова: 4D-індустрія, технологічна трансформація, цифровізація, цифрові технології, четверта промислова революція

Duliaba N.I. Main Directions of Technological Transformations in the 4D Industry. Review article.

The article reveals the main directions of technological transformations within the 4D industry, which includes digitalization, decentralization, dematerialization and democratization of production processes. The key digital technologies (artificial intelligence, Internet of Things, big data analytics, digital ecosystem, augmented virtual reality, digital twins, blockchain, autonomous robots), their advantages and challenges for business are analyzed. The prospects for the development and use of innovative technologies of the 4D industry in socio-economic processes and production activities are determined, the strategic role of the 4D industry in increasing the efficiency, adaptability and competitiveness of enterprises is determined. The prospects for the introduction of innovations in various sectors of the economy in order to ensure sustainable development in the conditions of digital transformation are substantiated.

Keywords: 4D industry, technological transformation, digitalization, digital technologies, the fourth industrial revolution

Сучасний етап розвитку світової економіки характеризується стрімким впровадженням інноваційних технологій, які змінюють не лише характер виробництва, а й саму логіку функціонування промислових підприємств. Одним із найактуальніших напрямів трансформації є поява та розвиток так званої 4D-індустрії – концепції, що поєднує цифровізацію, децентралізацію, дематеріалізацію та демократизацію виробництва. Ця модель орієнтована на створення більш гнучких, адаптивних і стійких промислових систем, які здатні оперативно реагувати на виклики глобального ринку.

Під впливом цифрових технологій відбувається радикальна перебудова бізнес-процесів, змінюється структура виробничих ланцюгів, зростає значення даних як стратегічного ресурсу. Водночас технологічна трансформація охоплює й соціально-економічні аспекти: формується нова корпоративна культура, зростає потреба в цифрових компетенціях, змінюються вимоги до управлінців і працівників.

У цьому контексті виникає нагальна потреба в системному аналізі основних напрямів технологічних змін у рамках 4D-індустрії, їхніх переваг, викликів та перспектив для різних секторів економіки. Саме цій проблематиці і присвячена дана стаття.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

За характеристикою, наведеною в «Концепція розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018-2020 роки», основним напрямом та сенсом Четвертої промислової революції є «насичення фізичного світу електронно-цифровими пристроями, засобами, системами та налагодження електронно-комунікаційного обміну між ними, що фактично уможливило інтегральну взаємодію віртуального та фізичного, тобто створює кіберфізичний простір. Основна мета цифровізації полягає у досягненні цифрової трансформації існуючих та створенні нових галузей економіки, а також трансформації сфер життєдіяльності у нові більш ефективні та сучасні. Такий приріст є можливим лише тоді, коли ідеї, дії, ініціативи та програми, які стосуються цифровізації, будуть інтегровані, зокрема, в національні, регіональні, галузеві стратегії і програми розвитку. Цифровізація є визнаним механізмом економічного зростання завдяки здатності технологій позитивно впливати на ефективність, результативність, вартість та якість економічної, громадської та особистої діяльності» [1].

Фактично в процесі Четвертої промислової революції сформувалася концепція промислового розвитку Індустрія 4.0 (4D-Індустрія). Як відображають у своєму дослідженні Т.І. Олешко, Н.В. Касьянова, С.Ф. Смерічевський та ін., особливість Індустрії 4.0 полягає «в масовому впровадженні кіберфізичних систем у виробництво» [2].

Як відображається в дослідженні Дж. Хертера та Дж. Овчарової, «ключовими постулатами Індустрії 4.0 є інтеграція фізичних елементів виробництва і IT-систем з метою розвитку і використання кіберфізичних систем для виробництва продукції» [3]. При цьому активне впровадження цифрових механізмів у виробництво поступово наповнює останнє новим, більш якісним та «розумнішим» змістом, стираючи межі фізичним, цифровим та біологічним. Таким чином, 4D-Індустрія ґрунтується на використанні цифрових систем у виробничі процеси, надаючи цим процесам метафізичних властивостей.

Як зазначають Т.І. Олешко, Н.В. Касьянова, С.Ф. Смерічевський та ін., концепцію 4D-Індустрії було сформульовано для «впровадження кіберфізичних систем в заводські процеси. Передбачається, що ці системи об'єднаються в одну мережу і будуть зв'язуватися одна з однією в режимі реального часу, самостійно налагоджуватися і вчитися новим моделям поведінки. Такі мережі зможуть вибудовувати виробництво з меншою кількістю помилок, взаємодіяти з виробленими товарами і при необхідності адаптуватися під нові потреби споживачів» [3]. Передбачалося, що таке виробництво буде саморегульованим, здійснюватиметься в повністю автономному режимі без людського управління чи допомоги.

Сформульовані німецькими промисловцями принципи 4D-Індустрії в значній мірі відображають зміст нового технологічного укладу та результати Четвертої промислової революції:

- функціональна сумісність людини і машини, яка надає можливість контактувати напряму через інтернет;
- прозорість інформації і здатність систем створювати віртуальну копію фізичного світу;
- технічна допомога машин людині для об'єднання великих обсягів даних і виконання ряду небезпечних для людини завдань;
- здатність систем самостійно і автономно приймати рішення» [4].

Індустрія 4.0 вирізняється впровадженням повністю автоматизованих виробничих процесів, що управляються в режимі реального часу та адаптуються до змін у зовнішньому середовищі. На основі сучасних інтернет-технологій забезпечується інтерактивна взаємодія між машинами, обладнанням і персоналом, що дозволяє досягати високої гнучкості виробництва.

Ключовим елементом є кіберфізичні системи, які здатні створювати цифрові моделі фізичних об'єктів, контролювати хід виробничих процесів і самокеровано здійснювати вибір. Ці системи функціонують у єдиному інформаційному просторі, можуть об'єднуватися в інтелектуальні мережі, самостійно адаптуватися до нових умов і вдосконалюватися в процесі експлуатації.

Завдяки такій інтеграції досягається можливість масового виробництва продукції, індивідуалізованої під конкретного споживача, з одночасною оптимізацією витрат. Такий підхід забезпечує підвищення ефективності, точності та якості на всіх етапах виробничого ланцюга.

Таким чином, численні теоретичні та прикладні дослідження відображають суттєві зміни, зумовлені Четвертою промисловою революцією, проте лише вибірково відображають основні напрями технологічних трансформацій, які виникли та реалізуються в 4D-Індустрії.

Метою статті є дослідити ключові напрями технологічних трансформацій у 4D-індустрії, охарактеризувати особливості впровадження інноваційних рішень та визначити їх переваги, ризики та перспективи реалізації в діяльність сучасних підприємств.

Для досягнення поставленої мети в статті визначено наступні цілі:

- проаналізувати сутність концепції 4D-індустрії та її місце в забезпеченні розвитку підприємств в сучасних умовах;
- визначити основні технологічні тренди, що лежать в основі трансформацій у 4D-індустрії;
- виявити переваги, виклики та перспективи впровадження новітніх технологій на підприємствах різних галузей.

Виклад основного матеріалу дослідження

Поєднання цифрових, фізичних та біологічних технологій у виробничих процесах зумовило роль 4D-індустрії у сучасному економічному розвитку. Вона сприяє підвищенню продуктивності праці, ефективному використанню ресурсів і зниженню витрат за рахунок автоматизації та розумних систем управління. У соціальному аспекті 4D-Індустрія відкриває нові можливості для зайнятості у високо-технологічних сферах та сприяє підвищенню якості життя через створення інноваційних продуктів і сервісів. Загалом, формує нову модель економіки знань, що базується на сталому розвитку та постійному оновленні технологій.

Насамперед, 4D-Індустрія асоціюється із тотальним запровадженням та використанням інтернету в усіх бізнес-процесах, на всіх етапах промислового виробництва, а згодом – суспільно-економічних відносин. Р. Шлейфер, М. Кох, П. Меркгофер відображають, що в США та англослов'янському світі 4D-Індустрію часто називають «Інтернет речей» (Internet of Things), «Інтернет усього» (Internet of Everything), «Промисловий Інтернет» (Industrial Internet) [5]. Д. Оберхаус «Виробничий еквівалент Інтернету речей, орієнтованого на споживача, в якому повсякденні предмети від автомобілів до термостатів і тостерів будуть підключені до

Інтернету» [6]. Це, в свою чергу відображає і першочергові технології, запровадженні під впливом Четвертої промислової революції.

Виходячи із сутності та змісту 4D-Індустрії, спираючись на інформацію про основні напрями запровадження цифрових систем, вітчизняні та зарубіжні дослідники до основного переліку інноваційних технологій, обумовлених четвертою промисловою революцією, відносять: штучний інтелект, інтернет речей та аналітику великих баз даних [7]. Т.І. Олешко, Н.В. Касьянова, С.Ф. Смерічевський та ін. до базових технологій 4D-Індустрії відносять: інтернет речей, промисловий інтернет речей, цифрові екосистеми та аналітику великих баз даних [2]. Таким чином, науковці не надали особливого значення в сукупності технологій штучному інтелекту, але додали цифрові екосистеми. Г. Дергачова, Я. Колешня сформувати перелік технологій 4D-Індустрії в наступному вигляді: інтернет речей, великі дані, кіберфізичні системи, цифровий двійник, доповнена реальність та блокчейн [8]. При цьому вчені відмітили, що «перелік є набагато більшим, крім того технології постійно вдосконалюються (перехід від роботів до коботів, від транспорту до автопілотованого транспорту і дронів), з'являються нові технології, використовуються незвичні для бізнесу технології (наприклад, колективний інтелект)» [8].

Спроба максимально відобразити усі технології 4D-Індустрії, М. Рюсман, М. Лоренц, Ф. Герберт, М. Вальднер, Я. Юстус, П. Енгель, М. Харніш визначають сукупність із 9 складових: великі дані та їх аналіз, автономні роботи, моделювання, горизонтальна та вертикальна системна інтеграція, промисловий інтернет речей, кібербезпека (Cybersecurity), хмара, адитивне виробництво, доповнена (або віртуальна) реальність [9, 10]. Варто зазначити, що наведений перелік включає не типові для 4.0 технологій горизонтальну та вертикальну системну інтеграцію, яка, насамперед, передбачає використання існуючих та нових технологій у змінній взаємодії, а не інноваційну технологію; а також кібербезпеку, яка є важливою складовою використання цифрових технологій та механізмів, проте не є новітньою технологією, хоча передбачає використання нових технологій для створення безпечних умов функціонування бізнесу при застосуванні сучасних інновацій.

Виходячи із наведених технологій 4D-Індустрії, доцільно сформувати максимально повний їх перелік та привести характеристику кожної технології.

Штучний інтелект – це технологія, що дає змогу комп'ютерам і машинам імітувати людські когнітивні функції, як-от аналіз, логіка, навчання та прийняття рішень. AI використовується для прогнозування трендів, автоматизації рутинних процесів і створення адаптивних систем, що самостійно вдосконалюються. У виробництві AI дозволяє підвищити точність, швидкість і надійність виконання операцій. Також він лежить в основі багатьох інших технологій, як-от автономні системи, аналітика великих даних та роботизація.

Інтернет речей – це концепція з'єднання фізичних об'єктів із мережею Інтернет з метою збору, обміну та аналізу даних. Побутові пристрої, автомобілі, медичне обладнання та промислові машини можуть передавати інформацію без участі людини. Це дозволяє оперативно приймати рішення на основі актуальних даних і здійснювати контроль у реальному часі. Інтернет речей відкриває нові можливості для автоматизації, оптимізації витрат і підвищення безпеки [11].

Аналітика великих баз даних – це обробка величезних масивів інформації, які надходять із різних джерел у режимі реального часу. Завдяки використанню спеціальних алгоритмів і машинного навчання стає можливим виявлення прихованих закономірностей і тенденцій. Це дозволяє бізнесу приймати стратегічні рішення на основі фактичних даних, а не припущень. У 4D-індустрії Big Data відіграє ключову роль у персоналізації послуг, прогнозуванні попиту та попередженні збоїв [11].

Промисловий інтернет речей – це спеціалізований напрям інтернету речей, який фокусується на інтеграції «розумних» сенсорів і пристроїв у виробничі процеси. Він дозволяє віддалено контролювати, аналізувати й автоматизувати діяльність підприємств. Дані з обладнання допомагають виявляти несправності ще до їх виникнення, що знижує витрати на обслуговування. IIoT сприяє створенню повністю цифровізованих і взаємопов'язаних виробничих середовищ [2].

Цифрова екосистема – це взаємопов'язане середовище, в якому компанії, партнери, клієнти та технології взаємодіють для створення спільної цінності. Вона базується на спільному використанні даних, хмарних сервісах та API-інтеграції. Такі екосистеми забезпечують гнучкість, інноваційність і швидке масштабування бізнес-моделей. Їх значення зростає в умовах глобалізації та цифрової трансформації [12].

Доповнена (віртуальна) реальність – це технології візуалізації, що дозволяють створювати нові рівні взаємодії з цифровим середовищем. Доповнена реальність накладає цифрові об'єкти на реальний світ, тоді як віртуальна – занурює користувача у повністю створене середовище. Вони використовуються для навчання персоналу, моделювання виробничих процесів і створення інноваційного споживацького досвіду. У промисловості забезпечують безпечні умови для відпрацювання сценаріїв і тестування нових рішень [13].

Блокчейн – це децентралізована цифрова база даних, яка забезпечує прозорість, захист і незмінність інформації. Технологія дозволяє створювати смарт-контракти, автоматизувати транзакції та знижувати ризики шахрайства. Блокчейн активно використовується у фінансах, логістиці, охороні здоров'я та ланцюгах постачання. Його перевага – у збереженні довіри між учасниками процесів без потреби у посередниках [14].

Цифровий двійник це віртуальна модель реального об'єкта, процесу або системи, яка постійно оновлюється за допомогою даних із датчиків, IoT-пристроїв і інших джерел. Він дає змогу відстежувати стан об'єкта в реальному часі, прогнозувати його поведінку, тестувати різні сценарії та виявляти можливі несправності ще до їх виникнення. Завдяки цифровим двійникам підприємства можуть підвищити точність планування, оптимізувати технічне обслуговування та скоротити витрати. Вони активно використовуються у виробництві, будівництві, енергетиці, транспорті та охороні здоров'я. Цифровий двійник є ключовим елементом в архітектурі Індустрії 4.0 та 4D-індустрії, сприяючи глибокій інтеграції фізичного та цифрового світів [15].

Автономні роботи – це системи, які здатні виконувати завдання без постійного контролю з боку людини, використовуючи штучний інтелект і сенсорні технології. Вони застосовуються в логістиці, будівництві, сільському господарстві та на виробництві. Автономні роботи можуть самостійно адаптуватися до змін середовища, виконуючи завдання з високою точністю та швидкістю. Вони суттєво знижують людський фактор і ризики, підвищуючи ефективність підприємств [16].

Хмарні сервіси забезпечують віддалений доступ до обчислювальних ресурсів, програм і сховищ даних через Інтернет. Це дозволяє компаніям масштабувати IT-інфраструктуру без значних капіталовкладень. Хмарні технології підтримують безперебійну роботу, гнучкість і мобільність бізнесу, а також спрощують цифрову трансформацію. У 4D-індустрії вони є базисом для роботи з великими даними, інтеграцією IoT і впровадженням інновацій [16].

Усі наведені технології мають свої переваги для соціально-економічного розвитку та розвитку бізнесу в сучасних умовах. Доцільно їх об'єднати в таблиці 1.

Таблиця 1. Переваги та виклики використання технологій 4D – Індустрії

Технологія	Переваги	Виклики
Штучний інтелект (AI)	- Автоматизація рутинних процесів - Прогнозування та аналітика - Підвищення продуктивності	- Необхідність якісних даних - Етичні та юридичні дилеми - Висока вартість впровадження
Інтернет речей (IoT)	- Постійний моніторинг обладнання - Підвищення ефективності операцій - Нові бізнес-моделі	- Загрози кібербезпеці - Високі витрати на інфраструктуру - Складність інтеграції
Аналітика великих даних	- Виявлення прихованих закономірностей - Підтримка прийняття рішень - Оптимізація процесів	- Потреба у спеціалістах - Проблеми конфіденційності - Якість та сумісність даних
Промисловий IoT (IIoT)	- Підвищення точності та автоматизації - Прогнозне обслуговування - Оптимізація виробництва	- Складність захисту систем - Потреба в модернізації обладнання - Сумісність технологій
Цифрові екосистеми	- Співпраця між компаніями - Централізація даних - Гнучкість і масштабованість	- Ризик залежності від партнерів - Управління складними зв'язками - Проблеми узгодження стандартів
Доповнена/віртуальна реальність (AR/VR)	- Інтерактивне навчання - Технічна візуалізація - Покращення взаємодії з продуктами	- Висока вартість обладнання - Потреба в складному програмному забезпеченні - Обмежена доступність
Блокчейн	- Прозорість транзакцій - Підвищення довіри - Децентралізація	- Високе енергоспоживання - Недостатня правова база - Масштабованість
Автономні роботи	- Підвищення безпеки - Робота в екстремальних умовах - Безперервне виробництво	- Витрати на розробку і обслуговування - Опір персоналу - Складність програмування
Хмарні технології	- Гнучкий доступ до даних - Зниження витрат на IT-інфраструктуру - Швидке масштабування	- Ризики безпеки даних - Залежність від провайдерів - Проблеми з конфіденційністю
Цифровий двійник	- Моделювання і тестування віртуальних сценаріїв - Оптимізація обслуговування - Скорочення витрат і збоїв	- Необхідність великих обсягів даних - Високі витрати на розробку - Складність у точному відтворенні фізичних об'єктів

Джерело: власна розробка автора

Кожна з цих технологій має унікальні можливості та разом формує потужну основу для інноваційного прориву, водночас ставлячи перед бізнесом і суспільством низку серйозних викликів. Серед основних переваг технологій нового покоління – значне зростання ефективності виробництва, оптимізація витрат, підвищення якості продукції та послуг, а також створення нових моделей взаємодії між людьми, машинами та цифровими системами. Наприклад, використання штучного інтелекту дозволяє здійснювати глибоку аналітику даних, автоматизувати процеси прийняття рішень, виявляти тренди, що ще вчора були

непомітними для людського ока. Штучний інтелект стає незамінним у сферах фінансів, охорони здоров'я, логістики, безпеки, роздрібною торгівлі.

Інтернет речей та промисловий Інтернет речей забезпечують безперервний обмін даними між пристроями, що дає змогу оперативно контролювати виробничі процеси, відстежувати стан обладнання, передбачати поломки та своєчасно проводити обслуговування. У логістиці IoT сприяє ефективному управлінню ланцюгами постачання, у розумних містах – контролює трафік, освітлення, споживання енергії.

Аналітика великих даних дозволяє обробляти гігантські масиви інформації в реальному часі, виділяти закономірності, робити прогнози й ухвалювати стратегічно важливі рішення. Вона допомагає компаніям краще розуміти поведінку споживачів, персоналізувати маркетинг, виявляти нові ніші для розвитку.

Цифрові екосистеми інтегрують різні учасники ринку (виробників, постачальників, клієнтів, посередників) у єдиний простір, у якому кожен має доступ до спільних ресурсів і даних. Це формує новий рівень співпраці та взаємодії, стимулюючи відкриті інновації.

Доповнена і віртуальна реальність значно розширюють можливості навчання, моделювання, дизайну, розваг. Вони забезпечують ефект занурення, дозволяють тестувати нові продукти чи архітектурні рішення ще до їхнього фізичного втілення.

Блокчейн надає прозорість, безпечність і незмінність даних у транзакціях, що є критично важливим у сфері фінансів, логістики, охорони здоров'я та публічного адміністрування. Він мінімізує ризики шахрайства, забезпечує довіру без посередників.

Автономні роботи та роботизовані системи підвищують продуктивність, звільняють людей від небезпечної або рутинної праці, знижують виробничі ризики.

Хмарні технології дають змогу підприємствам гнучко масштабувати IT-інфраструктуру, зменшувати витрати на обладнання та забезпечувати безперервний доступ до даних незалежно від географії.

Цифрові двійники – це віртуальні копії фізичних об'єктів чи процесів, які дозволяють у режимі реального часу симулювати поведінку системи, прогнозувати її стан та оптимізувати функціонування.

Незважаючи на численні переваги, 4D-технології ставлять перед суспільством і бізнесом серйозні виклики. Один з основних – питання кібербезпеки. Чим більше систем під'єднано до мережі, тим вищий ризик несанкціонованого доступу, зловживань і витоків конфіденційної інформації. Наприклад, у випадку з Інтернетом речей чи хмарними сервісами необхідне чітке управління ризиками та постійне оновлення протоколів безпеки.

Інша важлива проблема – високі початкові інвестиції в інфраструктуру, навчання персоналу, інтеграцію нових технологій. Малий і середній бізнес часто не має достатніх ресурсів для повноцінного переходу до цифрової моделі.

Штучний інтелект і автономні системи викликають дискусії щодо етики, відповідальності за рішення, прийняті машинами, а також можливого витіснення працівників. Актуальним стає питання перенавчання кадрів, адаптації освіти до нових вимог ринку.

Технології доповненої та віртуальної реальності можуть викликати перевантаження інформацією, впливати на психоемоційний стан користувачів, а в деяких випадках – створювати ілюзію безпеки у віртуальному просторі.

Блокчейн, попри переваги, потребує високих енергетичних витрат (особливо в алгоритмах консенсусу, таких як Proof of Work), а також чітких правових регуляцій. Відсутність законодавчої бази ускладнює його повномасштабне впровадження у державних структурах.

Цифрові екосистеми можуть стати джерелом нових форм монополізації або залежності малих гравців від великих платформ, що створює виклики для справедливої конкуренції.

Хмарні обчислення вимагають особливого підходу до зберігання та обробки персональних даних, адже фізичне розміщення серверів іноді ускладнює дотримання національних законів про конфіденційність.

Цифрові двійники створюють небувалі можливості, але водночас потребують точного налаштування й оновлення, інакше віртуальна модель може спотворити реальність та спричинити помилкові управлінські рішення.

У найближчі роки технології четвертої індустріальної революції продовжать глибоко трансформувати усі сфери суспільного й економічного життя. Вони відкривають нові перспективи для розвитку виробництва, освіти, медицини, транспорту, енергетики, аграрного сектору та державного управління. Однією з ключових переваг є можливість створення високоефективного виробничого середовища, де основні операції виконуються автоматизовано, з мінімальним втручанням людини. Це дозволяє підвищити якість продукції, зменшити кількість помилок і пришвидшити обслуговування клієнтів.

Інформаційні технології нового покоління забезпечують оперативний обмін даними між пристроями, системами і людьми, що дає змогу будувати інтегровані бізнес-моделі з гнучким реагуванням на потреби споживачів. Завдяки інтелектуальним алгоритмам підприємства отримують можливість прогнозувати тенденції, ефективніше використовувати ресурси та швидше ухвалювати стратегічні рішення.

Застосування віртуального моделювання та цифрових копій дає змогу ще до запуску продукту чи процесу провести тестування, оцінити ризики та уникнути потенційних втрат. Це значно знижує витрати на дослідження та розробку, прискорюючи вихід нових рішень на ринок. У галузі охорони здоров'я новітні

інструменти відкривають доступ до персоналізованої медицини, діагностики на основі великих обсягів даних, дистанційного лікування та реабілітації.

У сфері логістики та транспорту активно впроваджуються інтелектуальні системи управління потоками, автономні засоби доставки, електронні платформи для моніторингу вантажів у реальному часі. У сільському господарстві нові технології сприяють точному землеробству, ефективному використанню добрив, води та енергії, що є особливо актуальним у контексті зміни клімату.

Перспективи впровадження сучасних технологій не обмежуються лише економічними вигодами. Вони формують основу для побудови більш справедливого, екологічного й інклюзивного суспільства, де знання, інновації та цифрові рішення служать на благо людини.

Висновки

Упровадження технологій 4D-індустрії є неминучим кроком до цифрового майбутнього, в якому ефективність, інноваційність і гнучкість відіграватимуть ключову роль. Разом із тим, цей процес вимагає стратегічного підходу: формування цифрової культури, підвищення цифрової грамотності, модернізації регуляторних механізмів, розвитку кіберзахисту та етичних стандартів. Успішна інтеграція новітніх технологій можлива лише за умови балансу між технологічним прогресом та суспільною відповідальністю, а також активної співпраці держави, бізнесу, наукової спільноти та громадянського суспільства. Тільки тоді 4D-індустрія стане каталізатором сталого економічного зростання, соціального добробуту та глобальної конкурентоспроможності.

Перспективи подальших досліджень технологічних трансформацій в 4D-Індустрії повинні полягати у визначенні основних напрямів безпечного використання інноваційних технологій та формуванні прикладних аспектів їх впровадження та використання в бізнес-процесах, в різних сферах господарювання для забезпечення зростання конкурентоспроможності підприємств.

Abstract

This article examines the main directions of technological transformation within the framework of the emerging 4D industry – an advanced industrial development model that synthesizes digitization, decentralization, dematerialization, and democratization. In the context of the Fourth Industrial Revolution, the industrial sector is undergoing fundamental changes, where physical production is deeply integrated with digital technologies, creating cyber-physical systems and intelligent environments. The introduction highlights how digital technologies reshape value chains, increase the strategic importance of data, and redefine corporate culture and management competencies.

The study aims to provide a comprehensive analysis of the essence and components of the 4D industry, as well as to identify the strategic opportunities and challenges associated with the implementation of innovative technologies in business processes. The specific objectives of the article are to define the concept and principles of the 4D industry, to determine key technological trends, and to assess their advantages, risks, and development prospects for enterprises in various sectors.

To achieve the goals, the article uses methods of comparative analysis, systematization of academic literature, structural decomposition, and synthesis. A particular focus is placed on examining global and national perspectives on digital transformation and technological modernization.

The results of the study provide a detailed overview of the core technologies that define the 4D industry: artificial intelligence, the Internet of Things, big data analytics, industrial IoT, digital ecosystems, augmented and virtual reality, blockchain, autonomous robotics, cloud computing, and digital twins. Each of these technologies is characterized by its functionality, advantages for production efficiency, and potential impact on organizational structure. Furthermore, the article discusses the risks and barriers associated with implementation, including cybersecurity threats, the need for large-scale investments, legal and regulatory gaps, and the transformation of the labor market.

In conclusion, the article emphasizes that the adoption of 4D industry technologies represents a key factor in achieving sustainable economic growth and global competitiveness. However, their effective implementation requires a strategic approach, responsible innovation management, digital skills development, regulatory adaptation, and cross-sectoral collaboration. The article suggests that future research should focus on applied models for safely integrating advanced technologies into enterprise activities and adapting economic ecosystems to the requirements of digital transformation.

Список літератури:

1. Концепція розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018-2020 роки : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 17.01.2018 р. № 67-р. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/67-2018-%D1%80?lang=ru>.

2. Цифрова економіка: підручник. Т.І. Олешко, Н.В. Касьянова, С.Ф. Смерічевський та ін. К.: НАУ, 2022. 200 с.
3. Herter J., Ovtcharova J. A Model based Visualization Framework for Cross Discipline Collaboration in Industry 4.0 Scenarios. *Procedia CIRP*, 2016. Vol. 57. P. 398-403.
4. Härtling R.C., Reichstein C., Jozinovic P. The potential value of digitization for business—insights from German-speaking experts, *Informatik. Lecture Notes in Informatics (LNI)*, Gesellschaft für Informatik, Bonn. 2017. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://dl.gi.de/bitstream/handle/20.500.12116/3931/B21-5.pdf?sequence=4&isAllowed=y>.
5. Schlaefel R., Koch M., Merkofer P. Industry 4.0. Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies. Zurich : Creative Studio of Deloitte, 2014. 32 p.
6. Oberhaus D. This Is What the Fourth Industrial Revolution Looks Like. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.vice.com/en/article/4x3p43/life-after-the-fourth-industrial-revolution>.
7. Четверта промислова революція: зміна напрямів міжнародних інвестиційних потоків. За наук. ред. д.е.н., проф. А.І. Крисоватого та д.е.н., проф. О.М. Сохаської. Тернопіль: Осадца Ю.В., 2018. 478 с.
8. Дергачова Г.М., Колішня Я.О. Цифрова трансформація бізнесу: сутність, ознаки, вимоги та технології. *Економічний вісник НТУУ «КПІ»* : збірник наукових праць. 2020. № 17. С. 280-290.
9. Schlaefel R., Koch M., Merkofer P. Industry 4.0. Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies. Zurich : Creative Studio of Deloitte, 2014. 32 p.
10. Hermann M., Pentek T., and Otto B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. *Proceedings of 49th Hawaii International Conference on System Sciences HICSS*. Koloa, 5-8 January 2016. P. 3928-3937. DOI: 10.13140/RG.2.2.29269.22248.
11. Індустрія 4.0. IT-Enterprise. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation/industry-4>.
12. Семенов А.Ю. Концептуальні засади розвитку цифрових платформ в умовах формування цифрової економіки. *Наукові записки Національного університету «Острозька академія». Серія «Економіка»*. 2019. № 14. С. 21-26. DOI: 10.25264/2311-5149-2019-14(42)-21-26.
13. AR та VR як бренди почали їх використовувати? *Gwara media*. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://gwaramedia.com/ar-y-vr-yak-brendy-pochaly-yih-vykorystovuvaty>.
14. Що таке блокчейн технологія: це не лише про криптовалюту. *Future now*. 2020. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://futurenow.com.ua/shho-take-blokchejn-tehnologiya-tse-ne-lyshe-pro-kryptovalyutu>.
15. Маліцький О.О. Цифровий двійник. Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу: Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції. Національний авіаційний університет. Київ, 2021. С. 59.
16. Скіцько В.І. Синергія цифрових технологій в логістичних системах. *Інвестиції: практика та досвід*. 2018. № 16. С. 18-24.

References:

1. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2018). Concept of the development of the digital economy and society of Ukraine for 2018-2020. *Rozporiadzhennia KMU vid 17 sichnia 2018 r. № 67-r*. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/67-2018-%D1%80?lang=ru> [in Ukrainian].
2. Oleshko, T.I., Kasyanova, N.V., & Smerichevskiy, S.F. (2022). Digital economy. Kyiv: NAU [in Ukrainian].
3. Herter, J., & Ovtcharova, J. (2016). A model-based visualization framework for cross discipline collaboration in Industry 4.0 scenarios. *Procedia CIRP*, 57, 398-403 [in English].
4. Härtling, R.C., Reichstein, C., & Jozinovic, P. (2017). The potential value of digitization for business – Insights from German-speaking experts. *Informatik. Lecture Notes in Informatics (LNI)*, Gesellschaft für Informatik. Bonn. Retrieved from: <https://dl.gi.de/bitstream/handle/20.500.12116/3931/B21-5.pdf?sequence=4&isAllowed=y> [in English].
5. Schlaefel, R., Koch, M., & Merkofer, P. (2014). Industry 4.0. Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies. Zurich: Creative Studio of Deloitte [in English].
6. Oberhaus, D. (n.d.). This is what the fourth industrial revolution looks like. *VICE*. Retrieved from <https://www.vice.com/en/article/4x3p43/life-after-the-fourth-industrial-revolution> [in English].
7. Krysovatiy, A.I., & Sokhatska, O.M. (Eds.). (2018). The Fourth Industrial Revolution: Changes in directions of international investment flows. Ternopil: Osadtsa Yu.V. [in Ukrainian].
8. Derhachova, H.M., & Koleshnia, Ya.O. (2020). Digital transformation of business: Essence, features, requirements, and technologies. *Ekonomichnyi visnyk NTUU "KPI" (Economic Bulletin of NTUU "KPI")*, 17, 280-290 [in Ukrainian].
9. Schlaefel, R., Koch, M., & Merkofer, P. (2014). Industry 4.0. Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies. Zurich: Creative Studio of Deloitte [in English].

10. Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for Industrie 4.0 scenarios. In Proceedings of the 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS) (pp. 3928-3937). DOI: 10.13140/RG.2.2.29269.22248 [in English].
11. IT-Enterprise. (n.d.). Industry 4.0. Retrieved from: <https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation/industry-4> [in Ukrainian].
12. Semenoh, A.Yu. (2019). Conceptual foundations for the development of digital platforms in the context of digital economy formation. Naukovi zapysky Natsionalnoho universytetu "Ostrozka akademiia". Seriya: Ekonomika (Scientific Notes of National University "Ostroh Academy". Series: Economics), 14, 21-26. DOI: 10.25264/2311-5149-2019-14(42)-21-26 [in Ukrainian].
13. Gwara Media. (n.d.). AR and VR as brands started to use them? Retrieved from: <https://gwaramedia.com/ar-y-vr-yak-brendy-pochaly-yih-vykorystovuvaty> [in Ukrainian].
14. Future Now. (2020). What is blockchain technology: It's not just about cryptocurrency. Retrieved from: <https://futurenow.com.ua/shho-take-blokchejn-tehnologiya-tse-ne-lyshe-pro-kryptovalyutu>.
15. Malitskyi, O.O. (2021). Digital twin. In Inteliktualni tekhnologii linhvistychoho analizu: Tezy dopovidei mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii (p. 59). Kyiv: Natsionalnyi aviatsiyni universytet [in Ukrainian].
16. Skitsko, V.I. (2018). Synergy of digital technologies in logistics systems. Investytsii: praktyka ta dosvid (Investments: Practice and Experience), 16, 18-24 [in Ukrainian].

Посилання на статтю:

Дуляба Н.І. Основні напрями технологічних трансформацій в 4D-індустрії / Н.І. Дуляба // Економічний журнал Одеського політехнічного університету. – 2025. – № 1 (31). – С. 96-103. – Режим доступу: <https://economics.net.ua/ejopu/2025/No1/96.pdf>.

DOI: 10.15276/EJ.01.2025.10. DOI: 10.5281/zenodo.15188488.

Reference a Journal Article:

Duliaba N.I. Main Directions of Technological Transformations in the 4D Industry / N.I. Duliaba // Economic journal Odesa polytechnic university. – 2025. – № 1 (31). – P. 96-103. – Retrieved from: <https://economics.net.ua/ejopu/2025/No1/96.pdf>.

DOI: 10.15276/EJ.01.2025.10. DOI: 10.5281/zenodo.15188488.

