



DOI 10.58423/2786-6742/2023-4-164-177

УДК 004.5:338.45

### **Олександр ШАПУРОВ**

доктор економічних наук, професор,  
професор кафедри інформаційної економіки,  
підприємництва та фінансів,  
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні  
Запорізького національного університету  
м. Запоріжжя, Україна  
**ORCID ID:** 0000-0002-4381-4886  
**Scopus Author ID:** 36070023600

## **ПРОМИСЛОВІ ІННОВАЦІЇ: ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, БЛОКЧЕЙН, ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК**

***Анотація.** Досліджуючи інновації у промисловості, дана стаття пропонує систематичний огляд ключових аспектів промислового Інтернету речей (IIoT), машинного навчання, технології блокчейн, цифрових двійників та інших напрямів, що стали суттєвими в рамках Індустрії 4.0. Досліджено вплив цих інновацій на промислові операції, ланцюги поставок та виробничі процеси, доводячи їхню значущість та позитивний вплив у металургії та інших галузях промисловості. Зазначено, що IIoT стає ключовим компонентом у модернізації виробництва, а також відіграє значну роль у вдосконаленні ланцюгів поставок, транспорті, охороні здоров'я. Технології, які використовуються для підтримки IIoT, включають штучний інтелект, хмарні обчислення, аналітику великих даних, блокчейн та віртуальну реальність. Розглянуто використання машинного навчання, що базується на різних фреймворках, та показано їхню значущість для подальшого розвитку в контексті IIoT. Також розглянуто технологію блокчейн та її застосування у гірничодобувній промисловості, підкресливши її потенціал у покращенні ефективності управління ресурсами. Доведено, що технологія блокчейн може діяти як безпечний реєстр записів, що забезпечує динамічний обмін важливими документами. Окреслено значення цифрових двійників як технологічних рішень, які сприяють у плануванні та виробництві, дозволяючи прогнозувати працездатність об'єктів та вдосконалювати виробничі процеси. Відзначено динамічне зростання ринку цифрових двійників та їх широке застосування у ланцюгах поставок, технічному обслуговуванні та візуалізації активів, що сприяє покращенню господарської діяльності в промисловості. На основі визначеного про цифрового двійника важливо зауважити, що стандарт ISO 23247 для цифрових двійників допоможе встановити систематичний підхід до їхнього практичного використання в промисловості. Такі стандартизовані підходи стимулюватимуть подальше поширення та розвиток цих інновацій, сприяючи їхньому ефективному впровадженню в промислове виробництво.*

***Ключові слова:** промисловий інтернет речей, блокчейн, цифровий двійник, машинне навчання, фреймворк.*

**JEL Classification:** O32, O33.

***Absztrakt.** Az ipari innovációt vizsgálva ez a cikk szisztematikus áttekintést nyújt az ipari dolgok internete (IIoT), a gépi tanulás, a blokklánc-technológia, a digitális hasonmás és más olyan területek kulcsfontosságú aspektusairól, amelyek az Ipar 4.0-ban elengedhetelenné váltak. Feltárják ezen innovációk hatását az ipari műveletekre, az ellátási láncokra és a gyártási folyamatokra, bemutatva jelentőségüket és pozitív hatásukat a kohászatban és más iparágakban. Megjegyzendő, hogy az IIoT a termelés korszerűsítésének kulcsfontosságú elemévé válik, és jelentős szerepet játszik az ellátási láncok,*



a szállítás és az egészségügy fejlesztésében is. Az IIoT támogatására használt technológiák közé tartozik a mesterséges intelligencia, a felhőtechnológia, a Big Data elemzés, a blokklánc és a virtuális valóság. Áttekintésre kerül a különböző keretrendszereken alapuló gépi tanulás használatát, és bemutatjuk azok jelentőségét a további fejlesztés szempontjából az IIoT kontextusában. A blokklánc technológiát és annak alkalmazását a bányászatban is figyelembe veszik, hangsúlyozva a benne rejlő lehetőségeket az erőforrás-gazdálkodás hatékonyságának javításában. Bebizonyosodott, hogy a blokklánc technológia biztonságos nyilvántartásként szolgálhat az iratok számára, lehetővé téve a fontos dokumentumok dinamikus cseréjét. Körvonalazódik a digitális technológiai megoldások jelentősége, amelyek hozzájárulnak a tervezéshez és a gyártáshoz, lehetővé téve tárgyak teljesítményének előrejelzését és a gyártási folyamatok javítását. Megfigyelhető a digitális hasonmás piacának dinamikus növekedése és széles körű elterjedése az ellátási láncokban, az eszközök karbantartásában és megjelenítésében, ami hozzájárul az ipar gazdasági tevékenységének javulásához. A digitális hasonmásra vonatkozó definíciók alapján fontos megjegyezni, hogy a digitális hasonmásokra vonatkozó ISO 23247 szabvány segít szisztematikus megközelítést kialakítani gyakorlati ipari használatukra vonatkozóan. Az ilyen szabványosított megközelítések ösztönözni fogják ezen innovációk további elterjedését és fejlesztését, hozzájárulva azok hatékony alkalmazásához az ipari termelésben.

**Kulcsszavak:** ipari dolgok internete, blokklánc, digitális hasonmás, gépi tanulás, keretrendszer.

**Abstract.** Investigating innovations in the industry, this article provides a systematic overview of key aspects of the Industrial Internet of Things (IIoT), machine learning, blockchain technology, digital twins, and other directions significant within Industry 4.0. The impact of these innovations on industrial operations, supply chains, and manufacturing processes is examined, emphasizing their significance and positive effects across various industrial sectors. IIoT is identified as a pivotal component in manufacturing modernization and plays a substantial role in enhancing supply chains, transportation, healthcare, and other domains. Technologies supporting IIoT encompass artificial intelligence, cloud computing, big data analytics, blockchain, and virtual reality. The utilization of machine learning, based on diverse frameworks, is explored, demonstrating their significance for further development in the context of IIoT. Additionally, the application of blockchain technology in the mining industry is discussed, highlighting its potential in improving resource management efficiency. It is established that blockchain technology can act as a secure ledger facilitating dynamic exchange of crucial documents. The significance of digital twins as technological solutions facilitating planning and production, enabling the prediction of object performance, and refining manufacturing processes is outlined. The dynamic growth of the digital twins market and their broad applications in supply chains, technical servicing, and asset visualization contribute to increased efficiency in the industrial sector. Based on the importance of digital twins, it is noted that the ISO 23247 standard for digital twins will establish a systematic approach to their practical application in the industry. Such standardized approaches will encourage further dissemination and development of these innovations, promoting their effective integration into industrial production.

**Keywords:** industrial Internet of things, blockchain, digital twin, machine learning, framework

**Постановка проблеми.** Сучасна економіка, перебуваючи на етапі трансформації, створює нові завдання для суспільства, держави та учасників бізнесу, які реагують на ці виклики шляхом новаторських підходів і революційних рішень у всіх галузях економіки. Однією з найзначущих галузей є металургія, яка сприяє формуванню додаткової вартості. Головним з основних каталізаторів розвитку металургійної галузі є промислова революція та її цифрові інструменти. Цифрові інструменти представляють собою потужні інновації, які можуть сприяти оптимізації операцій, а також зміцненню соціальної та екологічної

стійкості. Цей процес зокрема актуальний для країн, які знаходяться на етапі розвитку та мають великі об'єми продукції видобувних та обробних галузей промисловості. Розуміння впливу, переваг і можливих перешкод у впровадженні цифрових технологій має вирішальне значення для економіки, довкілля та суспільства цих країн і планети загалом. Тому дане дослідження детально висвітлює переваги використання технологій Індустрії 4.0 у промисловості, а також шляхи застосування даних інновацій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні засади розвитку промислового інтернету речей досліджується у роботах зарубіжних вчених Fei C., Zhe X., Laizhong C., Qiuzhen L., Jianqiang L., Shui Y., Abid Haleem, Mohd J., Abid H., Ravi P. S. Rajiv S, Li D., Ren M., Meng G., Jiangfeng C., Weihai C., Fei T., Chun-Liang L.

Групою науковців Mohd J., Abid H., Ravi P. S. Rajiv S представлено огляд IoT і технологій, що лежать в його основі, детально обговорюються основні переваги та особливості IoT у виробництві, розумні перетворення, здійснені у виробничій сфері за допомогою IoT Culture, ідентифіковано та обговорено двадцять дев'ять важливих застосувань IoT у сфері виробництва [3]. Mohd Javaid, Abid Haleem, Rajiv Suman доповнюють необхідність поєднання промислового інтернету речей з віртуальним відображенням існуючих показників за допомогою цифрового двійника [18]. Fei C., Zhe X., Laizhong C., Qiuzhen L., Jianqiang L., Shui Y. розглянули найостанніші дослідницькі роботи, в яких блокчейн використовувався для створення надійних систем Інтернету речей. Автори розділили застосування блокчейну в системах Інтернету речей на чотири сценарії застосування, а саме: контроль доступу, походження і цілісність даних, довірена третя сторона і платформи автоматичних платежів [16]. Li D., Ren M., Meng G. пропонують в своїх дослідженнях систему прогнозного обслуговування, засновану на технології Інтернету речей, для зміни наявного режиму обслуговування обладнання вугільної шахти, це гарантує безпечну та ефективну роботу гірничодобувного обладнання [4]. Jiangfeng C., Weihai C., Fei T., Chun-Liang L. систематизують розумне виробництво на основі кіберфізичних виробничих систем (CPMS), яке стало тенденцією розвитку і отримало широке визнання в усьому світі [5].

В наукових дослідженнях зазначених авторів повно та обґрунтовано досліджено основні аспекти промислового інтернету речей, блокчейн технологій, та особливості застосування цифрових двійників. Але на нашу думку для системного представлення, розуміння основних принципів розвитку промислової революції 4.0 необхідно: розглянути перспективи дохідності промислового інтернету речей, визначити основних гравців ринку (суб'єктів господарювання інноваційної галузі), сформувані взаємозв'язок машинного навчання, промислового інтернету речей та штучного інтелекту, розкрити сутність основних фреймворків машинного навчання, сформувані систему конкурентних принципів технології блокчейн, розглянути Digital Twin та основний стандарт його застосування

**Формулювання цілей статті.** Сформувані основні концептуальні аспекти розвитку промислових інновацій у металургійному секторі.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розглянемо концептуальні аспекти розвитку промислових інновацій у металургійному секторі у трьох векторах розвитку: промисловий інтернету речей та фреймворки машинного навчання; блокчейн та основні його конкурентні принципи, цифровий двійник в системі управління промисловим підприємством

### 1. Промисловий інтернету речей та фреймворки машинного навчання

Відповідно до аналітичного агентства Statista за 10 річний період доходи від Інтернету речей зростуть майже у 3,5 рази, з 181,5 млрд. дол. до 621,6 млрд.дол. (рис.1)

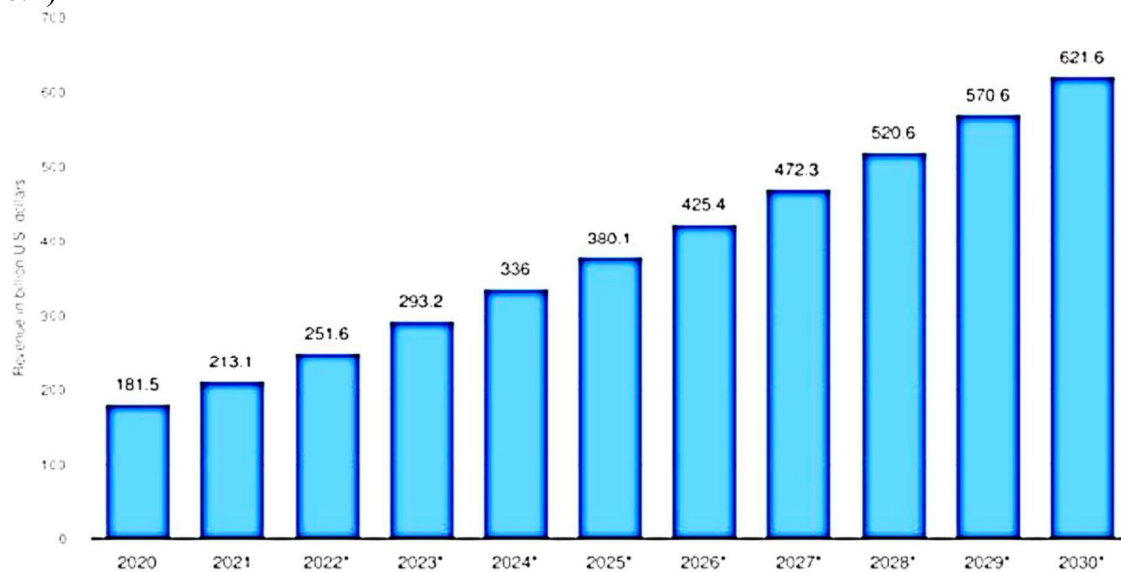


Рис.1. Прогноз доходів від Інтернета речей (період 2020-2030 рр.) [1].

Оцифрування машин, транспортних засобів та інших елементів фізичного світу є потужною ідеєю. Навіть на цій ранній стадії Інтернет речей починає мати реальний вплив. Інтернет речей змінює те, як виробляються та розподіляються товари, як продукти обслуговуються та вдосконалюються, а також як лікарі та пацієнти керують здоров'ям та самопочуттям [2].

Промисловий Інтернет речей (IIoT) – це наступний рівень технології Інтернету речей (IIoT), який є унікальним у своїй виробничій трансформації. Компаніям, які прагнуть конкурентної переваги сьогодні, потрібно просто поглянути на можливості, які IIoT може запропонувати переваги, починаючи від обслуговування, постачальників логістики, робочих процесів для співробітників та доставки продуктів та закінчуючи тим, що дозволяє виробникам оцифрувати практично всі частини свого бізнесу. Виробники можуть знизити основні ризики, пов'язані з ручною роботою та людськими помилками, звівши до мінімуму ручні процеси та записи [3].

Концепція Інтернету промов спочатку була введена із системи мережі радіочастотної ідентифікації (RFID) центром автоматичної ідентифікації, який був створений у Массачусетському технологічному інституті (MIT) у 1999 році. У цій системі всі елементи можуть бути під'єднані до Інтернету за допомогою



інформації радіочастотної ідентифікації, такої як чутливі пристрої. До його основних функцій належало: збір інформації; передача інформації; обробка інформації [4].

Термін «Промисловий Інтернет речей» широко використовується в промислових секторах як цифрова трансформація та пов'язує критично важливі активи, передову передиктивну та аналітику, що передує, і сучасний промисловий персонал. Це мережа промислових пристроїв, пов'язаних між собою комунікаційними технологіями для створення систем, які можуть відслідковувати, збирати, обмінюватись, аналізувати та давати важливі нові ідеї. Ці ідеї потім використовуються, щоб допомогти промисловим організаціям приймати більш ефективні та швидкі бізнес-рішення [5].

Промисловий Інтернет речей (IIoT) визначається як сукупність машин, робототехніки, когнітивних технологій і комп'ютерів для інтелектуальних промислових операцій за допомогою аналізу даних [6]. Промисловий Інтернет речей є частиною революції Індустрії 4.0, яка пов'язана з автоматизацією, інноваціями, великими даними та кіберфізичними системами в галузях. Промисловий Інтернет речей демонструє позитивний вплив на ланцюжки поставок, транспорт, охорону здоров'я, виробництво, нафтогазову, енергетичну/комунальну, хімічну та авіаційну промисловість.

Основними суб'єктами промислового ринку, які створюють ринок промислового інтернету речей: IBM Corp., Intel Corp., Schneider Electric SE, General Electric Company, Emerson Electric, ABB Ltd., Accenture PLC, Tech Mahindra Ltd, Softweb Solution Inc, Sasken. Tehnologies Ltd., ZIH Corp., Siemens AG. Robert Bosh GmbH та NEC Corp.

За прогнозами аналітичного агентства Statista загальний обсяг ринку промислового інтернету речей повинен збільшитись за період 2020-2028 рр. з 216,1 млрд. дол. До 1,1 трл. дол., тобто майже в 5 разів. (рис.2).

Промисловий Інтернет речей збирає велику кількість даних, які пізніше використовуються для прогнозованого обслуговування, управління часом і контролю витрат після впровадження моделей машинного навчання. Моделі машинного навчання складають ядро логістичних рішень і рішень для ланцюжка поставок з точки зору оптимізації розміру пакета продукції, вибору транспортного засобу доставки, вибору маршруту доставки, розрахунку часу доставки.

Практичним прикладом використання промислового інтернету речей може також стати тематичне дослідження, проведене гірничодобувною компанією Altos de Punitaqui на відкритому кар'єрі Фьюжнада. На багатьох великих шахтах по всьому світу управління навантаженням та транспортуванням здійснюється за допомогою комп'ютерного диспетчерського програмного забезпечення з 1980х років. Системи управління парком (FMS) були розроблені для максимізації продуктивності або зниження вимог до обладнання для досягнення виробничих цілей, мінімізації повторної обробки, забезпечення поставок на завод та досягнення цілей змішування (коли різні сорти руди поєднуються для полегшення вилучення металів у процесі видобутку). збагачувальні фабрики). У цьому науковому дослідженні представлена недорога розробка IoT та впровадження

інформаційної системи (FIS) замість (FMS) для отримання та обробки даних та оптимізації процесів завантаження та транспортування на відкритій копальні в Чилі [7].

За однією з оцінок, до 2025 року кількість пристроїв промислового Інтернету речей зросте до 75,44 мільярда. Технологіями, що забезпечують промисловий Інтернет речей, є: Інтернет речей, штучний інтелект, хмарні обчислення, штучний інтелект для кіберфізичних систем (CPS), аналітика великих даних, блокчейн, доповнена та віртуальна реальність

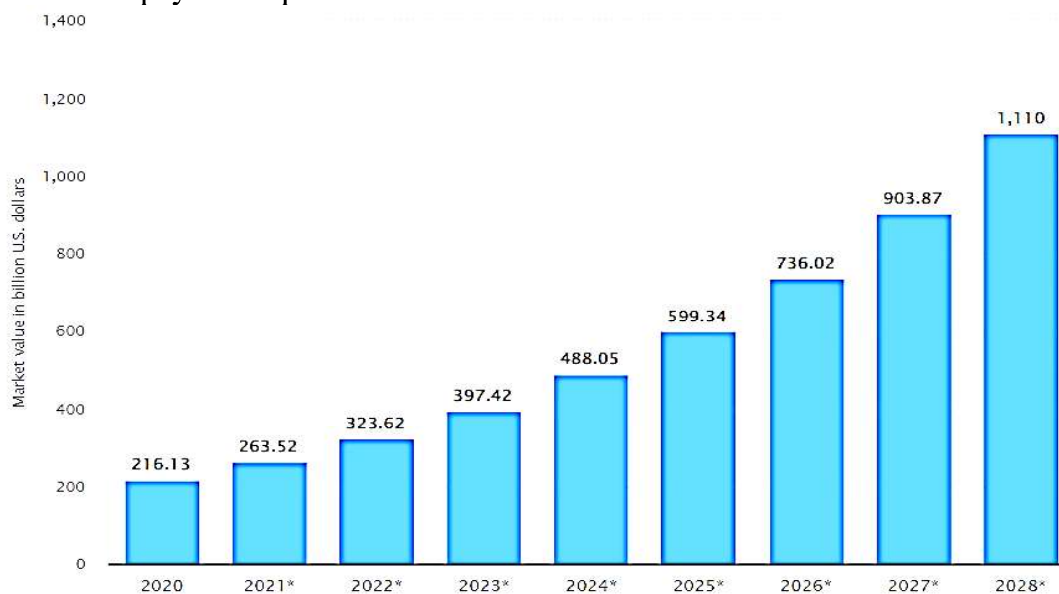


Рис.2. Обсяг ринку промислового інтернету речей (2020-2028рр.) [8].

Машинне навчання є підмножиною штучного інтелекту. Машинне навчання буває різних типів, таких як контрольоване (функції введення та виведення відомі заздалегідь), навчання без учителя (алгоритм/модель вивчає шаблони наборів даних і групує їх у кластери) та навчання з підкріпленням (навчання відбувається через винагороду та покарання). Класифікація зображень, виявлення шахрайства, діагностика захворювань, погода та прогнозування ринку використовують контрольоване навчання (лінійна регресія, машина опорних векторів, дерево рішень, K найближчий сусід). Рекомендаційна система та візуалізація великих даних використовує навчання без учителя (K-Mean Clustering, FP Growth). Для прийняття рішень у реальному часі та навігації робота використовується навчання з підкріпленням.

Промисловий Інтернет речей (датчики, виконавчі механізми, веб-додатки та системи управління) генерує величезні обсяги та різноманітність даних. Обсяг і різноманітність є характеристиками великих даних [9]. В першу чергу дані використовуються для розробки, навчання та тестування моделі машинного навчання. Алгоритми машинного навчання (класифікація (Random Forest, Support Vector Machines), кластеризація (K-Means, K-Near Neighbors) і бінарна класифікація (Logistic Regression)), які найкраще відповідають даним, складають

основу моделі машинного навчання. Фреймворки машинного навчання допомагають у розробці моделі машинного навчання.

Таким чином сформуємо основні фреймворки машинного навчання з відкритим вихідним кодом:

1) Tensorflow: Tensorflow має багато версій, але останні версії швидші, гнучкіші та підтримують нові мови. Його використовують транснаціональні компанії, такі як Qualcomm (для мобільних платформ Snapdragon), China mobile (для виявлення мережових аномалій) і CEVA (процесори глибокого навчання). Tensorflow підтримує високопродуктивні обчислення для розпізнавання облич і рукописного тексту [10].

2) Microsoft Cognitive Toolkit: Корпорація Майкрософт володіє Microsoft Cognitive Toolkit. Це допомагає підприємствам і організаціям у вивченні рішень машинного навчання. Це середовище розробки глибокого навчання з відкритим вихідним кодом, яке підтримує серверні частини з кількома машинами-кількома графічними процесорами [11].

3) H2O: Це один з найбільших фреймворків розробки моделей машинного навчання з відкритим вихідним кодом для бізнесу та підприємств [12].

4) Torch: The Torch — це фреймворк для розробки моделі машинного навчання з відкритим вихідним кодом. Ним володіє Facebook. The Torch — це бібліотека, фреймворк наукових обчислень і скриптова мова для машинного навчання на основі GPU/CPU.

5) PyTorch: Facebook володіє PyTorch. Він схожий на Torch і менш зрілий, ніж Tensorflow. PyTorch дотримується об'єктно-орієнтованої парадигми. Написання коду в PyTorch просте завдяки функціоналу умовних операторів і циклів. PyTorch використовується такими компаніями, як IBM, Facebook і Yandex

6) Caffe (Convolutional Architecture for Fast Feature Embedding): Він був розроблений у Berkeley Vision and Learning Center (BVLC). Це одна з найшвидших систем для DNN, яка може обробляти 60 мільйонів зображень на день за допомогою одного графічного процесора [13].

## **2. Блокчейн та основні його конкурентні принципи**

Останніми роками блокчейн привернув значну увагу дослідників. Це свого роду децентралізована розподілена база даних, яка походить від Біткойна. Вона вирізняється комбінованим, але творчим використанням наявних методів інформатики, таких як розподілене сховище даних, двоточкова мережа, механізм консенсусу та алгоритм шифрування. Блокчейн спирається на механізм консенсусу, який дає змогу кожному узгодити новостворений блок даних і працювати разом, щоб підтримувати всі блоки у вигляді унікальної бази даних [14].

Технологія блокчейн може докорінно змінити спосіб роботи гірничодобувної промисловості та пов'язаних ланцюжків поставок. Блокчейн — це незмінний і криптографічно безпечний архів записів, що зберігаються в розподіленому реєстрі, в якому використовуються смарт-контракти, створені на платформі Ethereum. Ця технологія дає змогу зацікавленим сторонам, під'єднаним до ланцюжка, безпечно обмінюватися важливими торговельними документами,



такими як коносаменти й акредитиви, за допомогою смарт-контрактів. Переваги технології блокчейн ідеально пов'язані з комерційними та операційними аспектами гірничодобувної, металургійної та інших галузей [15].

Іншими словами, цифровий видобуток – оцифроване, технологічно опосередковане виробництво, зберігання, аналіз і розповсюдження даних, отриманих шляхом відстеження та відстеження фізичного походження і соціально-екологічного впливу корисних копалин та інших природних ресурсів. Насамперед технологія блокчейн увійшла до лексики гірничодобувної промисловості з обіцянкою відмовитися від потреби в посередниках або довірених партнерах для перевірки, аудиту або сертифікації інформації про ланцюжок поставок. Будучи вдосконаленою версією технологій розподіленого реєстру, блокчейни ефективно розширюють масштаб і соціально-економічний вплив наявних ініціатив з відстеження.

Державні та корпоративні суб'єкти почали просувати і сертифікувати більш прозорі та етичні методи видобутку корисних копалин для зниження екологічних і репутаційних ризиків, пов'язаних з геологорозвідкою і методами видобутку, від програм корпоративної соціальної відповідальності до появи нових нормативних стандартів для ланцюжків поставок корисних копалин [16].

Блокчейн також можна використовувати для комплексного наскрізного відстеження руд і корисних копалин. Процес вимагатиме, щоб запечатані мішки або контейнери з концентратами і рудою були проштамповані унікальним ідентифікаційним номером, який згодом буде зареєстрований у блокчейні. Ідентифікатор міститиме інформацію про якість і кількість кожної партії руди або концентрату, а також буде постійно оновлюватися з постійним відстеженням часової шкали та реєстрацією переміщень [17].

Якщо розглядати сталеливарні підприємства, то в серпні 2019 року Metinvest уклав контракт на постачання обладнання через блокчейн-платформу we.trade. У травні 2020 року гірничодобувний гігант ВНР завершив операцію щодо залізної руди з блокчейном у Китаї. У липні 2020 року Nanjing Iron & Steel закрила блокчейн-угоду з купівлі залізної руди в Австралії.

На нашу думку, необхідно сформувати систему конкурентних принципів технології блокчейн:

– принцип безпечної системи контрактів (смарт-контрактів). Суб'єкт металургійного сектора автоматично отримує грошові кошти під час доставки товару в пункт призначення споживача;

– принцип прозорості системи постачання. Прозорість полягає в можливості відстежити походження товару на кожному етапі просування до кінцевого споживача;

– принцип аунтифікації документа. Хорошим прикладом може слугувати проєкт SAP зі створення єдиного галузевого реєстру сертифікатів на основі блокчейну для металопродукції. Метою цього реєстру є засвідчення справжності сертифікатів і, таким чином, боротьба з контрафактною продукцією, яка, за експертними оцінками, перевищує 10% від загального обсягу споживання.



– принцип цифрових аналогів реальних активів (токени). Це нові фінансові інструменти на біржовому ринку [17].

В епоху великих даних величезна кількість великих даних, що генеруються обробною промисловістю, має характеристики надвисокої розмірності. Як працювати з цими даними надвисокої розмірності, використовувати їхню потенційну цінність і розробити модель потоку даних, що підходить для нового виробничого середовища, - складна проблема. В даний час аналіз, заснований на великих даних, принесе більше ідеальних переваг виробничому сектору завдяки взаємній підтримці відповідних нових технологій на тлі Індустрії 4.0. Процес аналізу даних спрямований на підвищення прозорості прийняття рішень [17].

### **3. Цифровий двійник в системі управління промисловим підприємством**

Еволюція штучного інтелекту мала значний вплив на формування нового концепту – «Цифрові двійники». Цей підхід передбачає створення віртуальної моделі фізичного об'єкта в цифровій формі та сприяє інтеграції фізичного та інформаційного світів, забезпечуючи надійну основу для індустриальної інформаційної інтеграції [18]. Цифрові двійники здатні імітувати різні процеси, що відбуваються з матеріальними об'єктами, і прогнозувати їхню працездатність у складних умовах на основі реальних даних. В основному, концепція цифрових двійників передбачає використання Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (AI) та аналітики даних для поліпшення вихідних результатів та інших допоміжних даних (наприклад, мікропрограм пристрою, конфігурацій, калібрувань, даних налаштувань).

Розробники створюють цифрові двійники або віртуальні моделі, які можуть отримувати зворотний зв'язок від датчиків, пов'язаних із фізичною системою. Ці датчики збирають важливі робочі дані, тоді як цифрова модель імітує реальний час фізичної системи. Цифрові двійники застосовуються для вивчення варіантів продовження терміну служби продукту, поліпшення виробництва і процесів, створення продукту і тестування прототипу [19].

Останні дослідження від MarketsandMarkets вказують, що світовий ринок цифрових двійників оцінювали у 3,1 мільярда доларів США у 2020 році і, за прогнозами, він досягне 48,2 мільярда доларів США до 2026 року. Аналіз компанії Global Market Insight засвідчив, що розмір ринку цифрових двійників у 2022 році становив 8 мільярдів доларів США, і очікується, що він зростатиме приблизно на 25 % щорічно з 2023 по 2032 рік.

Наразі в проєктуванні та виробництві цифрові двійники використовуються для точного віртуального представлення об'єктів і моделювання операційних процесів. Цифрові двійники (Digital twins) застосовуються для управління ланцюгами поставок, відстеження операцій, технічного обслуговування транспорту, віддаленої допомоги, візуалізації активів і налаштування дизайну [20].

Створення цифрового двійника в Omniverse для архітекторів, інженерів і будівельних бригад може прискорити розробку і забезпечити виконання контрактів. Більшість систем промислової автоматизації підтримують функціональний інтерфейс моделювання (FMI) для інтеграції версії цифрового



двійника в реальному часі для роботи паралельно з реальною машиною. Це дає змогу швидко планувати роботу і тестувати у віртуальному середовищі, перш ніж вносити зміни в комп'ютерну систему. Рішення Digital Twins корисні для планування графіків і операцій у гірничодобувній промисловості, де моделювання робочого середовища дає змогу шахтарям створювати довгострокові та короткострокові програми. Фахівці на місцях роботи можуть використовувати рішення Digital Twins для моделювання обладнання, механізмів і всього робочого процесу, а також для тестування новинок у найважливіших робочих процесах [21].

Зростання попиту на автоматизацію в різних галузях промисловості є очікуваним фактором, який створюватиме високий попит на платформу Digital Twin у довгостроковій перспективі. У міру розвитку процесів цифровізації в масштабі світового рівня, рішення Digital Twin відіграватимуть дедалі важливішу роль у різних галузях. Для полегшення впровадження цифрових двійників у виробництво, ISO нещодавно розробила стандарт ISO 23247 - Платформа цифрових двійників для виробництва. Даний стандарт надає загальну структуру розробки, яка включає в себе підсистеми і компоненти, з яких виробники можуть вибирати для своїх власних реалізацій цифрових двійників в залежності від конкретного випадку. Це допомагає промисловим підприємствам систематично ідентифікувати застосовні компоненти, їхні складові та характеристики взаємодії. Стандартна серія ISO 23247 наразі охоплює чотири частини: огляд і загальні принципи, еталонна архітектура, цифрове представлення та обмін інформацією.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Промисловий Інтернет речей (ІоТ) – це система, яка об'єднує машини, робототехніку, когнітивні технології та комп'ютери для забезпечення інтелектуальних промислових операцій через аналіз даних. ІоТ є ключовим елементом Індустрії 4.0, включаючи автоматизацію, інновації, обробку великих обсягів даних та кіберфізичні системи у виробництві. ІоТ позитивно впливає на ланцюги постачання, транспорт, охорону здоров'я, виробництво та інші сфери промисловості. Основними лідерами ринку промислового інтернету речей є: IBM Corp., Intel Corp., Schneider Electric SE, General Electric Company. Відповідно до аналітичних даних Statista, очікується зростання ринку ІоТ з 216,1 млрд. доларів у 2020 році до 1,1 трлн. доларів у 2028 році. До 2025 року передбачається зростання пристроїв ІоТ до 75,44 млрд. Технології, які підтримують ІоТ: штучний інтелект, хмарні обчислення, аналітика великих даних, блокчейн, доповнена та віртуальна реальність.

Машинне навчання є супутнім продуктом промислового інтернету речей, що базується на відповідних фреймворках. В результаті дослідження сформовані наступні найбільш споживані фреймворки промисловими підприємствами: TensorFlow, Microsoft Cognitive Toolkit, H2O, Torch і PyTorch, Caffe.

Досліджено ключові аспекти застосування технології блокчейн у галузі гірничодобувної промисловості. Визначено, що ця технологія може відіграти значну роль у покращенні ефективності та прозорості ланцюжків поставок, а також в управлінні та відстеженні ресурсів. Доведено, що блокчейн може



слугувати незмінним реєстром записів, де використовуються смарт-контракти, що робить можливим безпечний обмін важливими торговельними документами. В дослідженні зазначено, що технологія блокчейн вже застосовується в ряді проєктів та угод, спрямованих на вдосконалення процесів у гірничодобувній промисловості. Крім того, сформовано конкурентні принципи використання технології блокчейн у металургійній галузі, які включають безпечну систему контрактів, прозору систему постачання, аунтифікацію документів та цифрові аналоги реальних активів. Зазначимо, що аналіз великих даних, що виникають у промисловості, може приносити вагомі переваги завдяки взаємодії з новими технологіями в рамках Індустрії 4.0, сприяючи підвищенню прозорості у прийнятті рішень.

Четверта промислова революція дала можливість розвитку промислового інтернету речей, машинному навчанню, блокчейн технологіям, віртуальній та доповненій реальності, а також виділенню в окремий напрям такого явища, як цифровий двійник, який синтезує в собі декілька компонентів Індустрії 4.0. Встановлено, що цифрові двійники використовуються для прогнозування працездатності об'єктів у складних умовах, для поліпшення виробництва та тестування прототипів. Визначено, що ринок цифрових двійників зростає і прогнозується його подальше зростання, що свідчить про динамічний попит на ці технології. Підкреслено, що цифрові двійники знаходять широке застосування в управлінні ланцюгами поставок, технічному обслуговуванні, візуалізації активів, що сприяє підвищенню ефективності у різних сферах промисловості. Доведено, що такі технології корисні у плануванні операцій і в тестуванні нововведень. Нарешті, зазначено, що введення стандарту ISO 23247 для цифрових двійників сприятиме їхньому практичному використанню в промисловості, надаючи систематичний підхід до вибору компонентів та їх взаємодії для виробників, що сприятиме подальшому їхньому поширенню та вдосконаленню.



### Список використаних джерел

1. Statista. Internet of Things (IoT) total annual revenue worldwide from 2020 to 2030 Statista, 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/1194709/iot-revenue-worldwide/> (date of access: 29.11.2023).
2. McKinsey Global Institute. The internet of things: mapping the value beyond the hype. *McKinsey & Company*, june 2015. 24 p. URL: [https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/high%20tech/our%20insights/the%20internet%20of%20things%20the%20value%20of%20digitizing%20the%20physical%20world/unlocking\\_the\\_potential\\_of\\_the\\_internet\\_of\\_things\\_executive\\_summary.pdf](https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/high%20tech/our%20insights/the%20internet%20of%20things%20the%20value%20of%20digitizing%20the%20physical%20world/unlocking_the_potential_of_the_internet_of_things_executive_summary.pdf) (date of access: 29.11.2023).
3. Upgrading the manufacturing sector via applications of Industrial Internet of Things (IIoT) / M. Javaid et al. *Sensors International*. 2021. Vol. 2. P. 100129. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100129> (date of access: 29.11.2023).
4. Dong L., Mingyue R., Guoying M. Application of Internet of Things Technology on Predictive Maintenance System of Coal Equipment. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 174. P. 885–889. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.237> (date of access: 29.11.2023).
5. Industrial IoT in 5G environment towards smart manufacturing / J. Cheng et al. *Journal of Industrial Information Integration*. 2018. Vol. 10. P. 10–19. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2018.04.001> (date of access: 29.11.2023).
6. INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*. 2017. URL: <https://doi.org/10.7324/ijasre.2017.32538> (date of access: 29.11.2023).
7. Low-cost internet of things (IoT) for monitoring and optimising mining small-scale trucks and surface mining shovels / H. Aguirre-Jofré et al. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 131. P. 103918. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103918> (date of access: 29.11.2023).
8. Statista. Industrial Internet of Things (IIoT) market size worldwide from 2020 to 2028 Statistic, 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/611004/global-industrial-internet-of-things-market-size/> (date of access: 29.11.2023).
9. Al-Badi A., Tarhini A., Khan A. I. Exploring Big Data Governance Frameworks. *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 141. P. 271–277. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.181> (date of access: 29.11.2023).
10. Tensorflow URL: <https://www.tensorflow.org/about?hl=ru> (date of access: 29.11.2023).
11. Microsoft Cognitive Toolkit URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/cognitive-toolkit/> (date of access: 29.11.2023).
12. h2o URL: <https://h2o.ai/>
13. iscoop. The Industrial Internet of Things (IIoT): the business guide to Industrial IoT. Available from: <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/industrial-internet-things-iiot-saving-costs-innovation/> (date of access: 29.11.2023).
14. Blockchain for Internet of things applications: A review and open issues / F. Chen et al. *Journal of Network and Computer Applications*. 2020. Vol. 172. P. 102839. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102839> (date of access: 29.11.2023).
15. World Economic Forum. 4 ways blockchain will transform the mining and metals industry. World Economic Forum. 2018, July. Available at: <https://www.weforum.org/agenda/2018/07/4-ways-blockchain-will-transform-the-mining-and-metals-industry/> (date of access: 29.11.2023).
16. Calvão F., Archer M. Digital extraction: Blockchain traceability in mineral supply chains. *Political Geography*. 2021. Vol. 87. P. 102381. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2021.102381>
17. Gmk.Center. Why the steel industry needs blockchain. *Blockchain.2020* Available at: <https://gmk.center/en/opinion/why-the-steel-industry-needs-blockchain/> (accessed May 10, 2023).
18. Javaid M., Haleem A., Suman R. Digital Twin applications toward Industry 4.0: A Review. *Cognitive Robotics*. 2023. Vol. 3. P. 71–92. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.003> (date of access: 29.11.2023).
19. Attaran M., Celik B. G. Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*. 2023. Vol. 6. P. 100165. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165> (date of access: 29.11.2023).





20. Deloitte. The net zero workforce. *Mining & Metals*. 2021 Available at: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/uk/Documents/energy-resources/deloitte-uk-net-zero-workforce-mining-and-metals.pdf> (accessed May 10, 2023).
21. Shao G., Helu M. Framework for a digital twin in manufacturing: Scope and requirements. *Manufacturing Letters*. 2020. Vol. 24. P. 105–107. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.04.004> (date of access: 29.11.2023).

### References

1. Statista. Internet of Things (IoT) total annual revenue worldwide from 2020 to 2030 Statista, 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/1194709/iot-revenue-worldwide/> (date of access: 29.11.2023).
2. McKinsey Global Institute. (2015, june) The internet of things: mapping the value beyond the hype. *McKinsey & Company*, 24 p. URL: [https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/high%20tech/our%20insights/the%20internet%20of%20things%20the%20value%20of%20digitizing%20the%20physical%20world/unlocking\\_the\\_potential\\_of\\_the\\_internet\\_of\\_things\\_executive\\_summary.pdf](https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/high%20tech/our%20insights/the%20internet%20of%20things%20the%20value%20of%20digitizing%20the%20physical%20world/unlocking_the_potential_of_the_internet_of_things_executive_summary.pdf) (date of access: 29.11.2023).
3. Javaid, M., Abid Haleem, Pratap Singh, R., Rab, S., & Suman, R. (2021). Upgrading the manufacturing sector via applications of Industrial Internet of Things (IIoT). *Sensors International*, 2, 100129. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100129>
4. Dong, L., Mingyue, R., & Guoying, M. (2017). Application of Internet of Things Technology on Predictive Maintenance System of Coal Equipment. *Procedia Engineering*, 174, 885–889. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.237>
5. Cheng, J., Chen, W., Tao, F., & Lin, C.-L. (2018). Industrial IoT in 5G environment towards smart manufacturing. *Journal of Industrial Information Integration*, 10, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2018.04.001>
6. INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS. (2017). *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*. <https://doi.org/10.7324/ijasre.2017.32538>
7. Aguirre-Jofré, H., Eyre, M., Valerio, S., & Vogt, D. (2021). Low-cost internet of things (IoT) for monitoring and optimising mining small-scale trucks and surface mining shovels. *Automation in Construction*, 131, 103918. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103918>
8. Statista. Industrial Internet of Things (IIoT) market size worldwide from 2020 to 2028 Statistic, 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/611004/global-industrial-internet-of-things-market-size/> (date of access: 29.11.2023).
9. Al-Badi, A., Tarhini, A., & Khan, A. I. (2018). Exploring Big Data Governance Frameworks. *Procedia Computer Science*, 141, 271–277. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.181>
10. Tensorflow URL: <https://www.tensorflow.org/about?hl=ru> (date of access: 29.11.2023).
11. Microsoft Cognitive Toolkit URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/cognitive-toolkit/> (date of access: 29.11.2023).
12. h2o URL: <https://h2o.ai/>
13. iscoop. The Industrial Internet of Things (IIoT): the business guide to Industrial IoT. Available from: <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/industrial-internet-things-iiot-saving-costs-innovation/> (date of access: 29.11.2023).
14. Chen, F., Xiao, Z., Cui, L., Lin, Q., Li, J., & Yu, S. (2020). Blockchain for Internet of things applications: A review and open issues. *Journal of Network and Computer Applications*, 172, 102839. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102839>
15. World Economic Forum (2018, July) 4 ways blockchain will transform the mining and metals industry. World Economic Forum. Available at: <https://www.weforum.org/agenda/2018/07/4-ways-blockchain-will-transform-the-mining-and-metals-industry/> (date of access: 29.11.2023).
16. Calvão, F., & Archer, M. (2021). Digital extraction: Blockchain traceability in mineral supply chains. *Political Geography*, 87, 102381. <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2021.102381>



17. Gmk.Center. (2020) Why the steel industry needs blockchain. *Blockchain*. Available at: <https://gmk.center/en/opinion/why-the-steel-industry-needs-blockchain/> (accessed May 10, 2023).
  18. Javaid, M., Haleem, A., & Suman, R. (2023). Digital Twin applications toward Industry 4.0: A Review. *Cognitive Robotics*, 3, 71–92. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.003>
  19. Attaran, M., & Celik, B. G. (2023). Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, 6, 100165. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>
  20. Deloitte. (2021) The net zero workforce. *Mining & Metals*. Available at: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/uk/Documents/energy-resources/deloitte-uk-net-zero-workforce-mining-and-metals.pdf> (accessed May 10, 2023).
- Shao, G., & Helu, M. (2020). Framework for a digital twin in manufacturing: Scope and requirements. *Manufacturing Letters*, 24, 105–107. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.04.004>