

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Факультет: **ННІ Каразінський банківський інститут**
Кафедра: **Інформаційних технологій та математичного моделювання**
Спеціальність: **125 Кібербезпека**
Освітня програма: **Кібербезпека у фінансових технологіях**

Група: **АБ-41Б денна форма навчання**

КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

на тему:

«ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТА ЗАСТОСУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЙ БЛОКЧЕЙН У МАЙБУТНЬОМУ»
ЗА НАКАЗОМ № 4601-5/335 ВІД 07 ЛЮТОГО 2025 РОКУ

здобувача вищої освіти **Черняєва Дмитра Сергійовича**

Робота допущена до захисту в ЕК
протокол кафедри ІТММ №13 від 31.05.2025р.

Завідувач кафедри ІТММ

к.п.н., доцент

_____ **Н.І. Стяглик**

Науковий керівник

Ph.D з «Комп'ютерних наук»

_____ **Д.М.Ковальчук**

м. Харків 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет навчально-науковий інститут "Каразінський банківський інститут"
Кафедра інформаційних технологій та математичного моделювання
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 125 Кібербезпека
Освітня програма Кібербезпека у фінансових технологіях

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Підпис Н. І. Стяглик
ініціали, прізвище

“08” лютого 2025 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ)**

Черняєву Дмитру Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема роботи: Перспективи розвитку та застосування технології блокчейн у майбутньому

керівник роботи: Ph.D з «Комп'ютерних наук» Ковальчук Д.М.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від “08” лютого 2025 року № 4601-5/335

2. Строк подання студентом роботи 15 травня 2025 року

3. Перелік питань, які потрібно розробити:
У розділі 1: провести аналіз сучасного стану технології блокчейн

У розділі 2: дослідити перспективи розвитку технології блокчейн

У розділі 3: зробити аналіз викликів та стратегій застосування блокчейну

4. План роботи

№ з/П	Назви етапів роботи
1	Вибір здобувачем теми кваліфікаційної бакалаврської роботи
2	Затвердження плану і завдання кваліфікаційної бакалаврської роботи
3	Здача кваліфікаційної бакалаврської роботи керівнику
4	Підпис кваліфікаційної бакалаврської роботи керівника
5	Підпис кваліфікаційної бакалаврської роботи у нормоконтролера
6	Допуск завідувачем кафедри до захисту кваліфікаційної бакалаврської роботи
7	Захист кваліфікаційної бакалаврської роботи

5. Дата видачі завдання 08 лютого 2025 року

Студент

підпис

Д.С Черняєв

ініціали, прізвище

Керівник роботи

підпис

Д.М. Ковальчук

ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ
«ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ
БЛОКЧЕЙН У МАЙБУТНЬОМУ»
Черняєв Дмитро Сергійович

Кваліфікаційна бакалаврська робота містить 73 сторінки, 9 таблиць, 1 рисунок, список літератури з 29 найменувань.

Об'єктом дослідження є процес впровадження та розвитку технології блокчейн у соціально-економічних системах.

Предмет дослідження: перспективи використання блокчейн-технологій, напрями їхнього впровадження, виклики та стратегії адаптації у різних галузях, зокрема в контексті цифрової трансформації економіки та державного управління.

Мета кваліфікаційної бакалаврської роботи є комплексний аналіз сучасного стану технології блокчейн, оцінка її перспектив розвитку та визначення ключових напрямів і стратегій її застосування в майбутньому.

Завданнями кваліфікаційної бакалаврської роботи є:

1. провести аналіз сучасного стану технології блокчейн, включаючи її технічні характеристики, переваги та недоліки;
2. визначити основні тенденції розвитку блокчейн-технологій і потенційні сфери їх застосування;
3. дослідити технічні, правові та етичні виклики, пов'язані з впровадженням блокчейну;
4. розробити рекомендації щодо стратегій інтеграції блокчейну в різні галузі економіки та суспільного життя;
5. оцінити вплив блокчейну на економічні та соціальні процеси в глобальному та українському контекстах.

Актуальність дослідження: блокчейн-технології є одним з ключових драйверів цифрової трансформації у світі. Вони демонструють значний потенціал у забезпеченні прозорості, безпеки, децентралізації та ефективності управлінських процесів. У контексті післявоєнної відбудови України важливим є аналіз можливостей впровадження блокчейну для модернізації державного управління, економіки та цифрової інфраструктури.

За результатами дослідження:

- узагальнено поточний стан блокчейн-технологій та напрямів їх розвитку;
- визначено нові сфери потенційного застосування блокчейну (Smart City, охорона здоров'я, освіта, енергетика тощо);
- окреслено основні виклики та ризики, що стримують масштабне впровадження;
- запропоновано низку стратегій адаптації та інтеграції блокчейну в український контекст.

Практична новизна: систематизовано сучасні тенденції у розвитку блокчейну, розроблено рекомендації щодо його адаптації в Україні, зокрема у рамках цифрової трансформації державного сектору, децентралізації управління та впровадження концепції «розумних міст».

Одержані результати можуть бути використані:

- при розробці стратегії цифровізації державного управління;
- у формуванні блокчейн-рішень для фінансової, освітньої та медичної сфер;
- при проектуванні безпечних інформаційних систем для бізнесу;
- у дослідницькій та аналітичній роботі щодо новітніх цифрових технологій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: БЛОКЧЕЙН, ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЯ, КРИПТОВАЛЮТА, СМАРТ-КОНТРАКТ, КІБЕРБЕЗПЕКА, ЦИФРОВА ЕКОНОМІКА, РОЗПОДІЛЕНИЙ РЕЄСТР, БЛОКЧЕЙН У ФІНАНСАХ, БЛОКЧЕЙН У ДЕРЖАВНОМУ УПРАВЛІННІ, БЛОКЧЕЙН В УКРАЇНІ.

ABSTRACT
AT QUALIFICATION BACHELOR WORK
«PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF
BLOCKCHAIN TECHNOLOGY IN THE FUTURE»
Chernyaiev Dmytro

The bachelor's thesis contains 73 pages, 9 tables, 1 drawing, a list of references of 29 titles.

The object of the research is the process of implementation and development of blockchain technology in socio-economic systems.

The subject of the research is the prospects for the use of blockchain technologies, directions of their implementation, challenges and adaptation strategies in various sectors, particularly in the context of the digital transformation of the economy and public administration.

The purpose of a bachelor's thesis is to conduct a comprehensive analysis of the current state of blockchain technology, assess its development prospects, and define key areas and strategies for its application in the future.

The tasks of a bachelor's degree are:

- to analyze the current state of blockchain technology, including its technical characteristics, advantages, and disadvantages;
- to identify the main trends in the development of blockchain technologies and their potential areas of application;
- to study the technical, legal, and ethical challenges associated with the implementation of blockchain;
- to develop recommendations for strategies of blockchain integration into various sectors of the economy and public life;
- to assess the impact of blockchain on economic and social processes in both global and Ukrainian contexts.

The relevance of the research: blockchain technologies are one of the key drivers of digital transformation worldwide. They demonstrate significant potential in ensuring transparency, security, decentralization, and efficiency of management processes. In the context of post-war recovery in Ukraine, analyzing the opportunities for blockchain implementation is important for the modernization of public administration, the economy, and digital infrastructure.

According to the results of the research:

- the current state and development directions of blockchain technologies were summarized;
- new potential application areas for blockchain were identified (Smart Cities, healthcare, education, energy, etc.);
- key challenges and risks that hinder large-scale implementation were outlined;
- several strategies for adapting and integrating blockchain in the Ukrainian context were proposed.

Main theoretical provisions on the topic of the practical relevance of the work include the systematization of modern trends in the development of blockchain, development of recommendations for its adaptation in Ukraine, particularly in the context of digital transformation of the public sector, decentralization of governance, and the implementation of Smart City concepts.

The results obtained can be used:

- in the development of strategies for digitalizing public administration;
- in the creation of blockchain-based solutions for the financial, educational, and healthcare sectors;
- in the design of secure information systems for business;
- in research and analytical work related to advanced digital technologies.

KEYWORDS: BLOCKCHAIN, DECENTRALIZATION, CRYPTOCURRENCY, SMART CONTRACT, CYBERSECURITY, DIGITAL ECONOMY, DISTRIBUTED LEDGER, BLOCKCHAIN IN FINANCE, BLOCKCHAIN IN PUBLIC ADMINISTRATION, BLOCKCHAIN IN UKRAINE.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧОК, СИМВОЛІВ І	
ТЕРМІНІВ	9
ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН	14
1.1. Історичний розвиток технології блокчейн	14
1.2. Основні принципи та технічні характеристики блокчейну	17
1.3. Аналіз поточного застосування блокчейну в різних галузях	21
1.4. Переваги та недоліки сучасних блокчейн-систем	25
1.5. Висновки до розділу 1	29
РОЗДІЛ 2. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН	32
2.1. Нові тенденції та інновації в блокчейн-технологіях	32
2.2. Потенційні сфери застосування блокчейну в майбутньому	36
2.3. Вплив блокчейну на економіку та суспільство	41
2.4. Прогноз розвитку технології на найближчі 5-10 років	46
2.5. Висновки до розділу 2	48
РОЗДІЛ 3. ВИКЛИКИ ТА СТРАТЕГІЇ ЗАСТОСУВАННЯ БЛОКЧЕЙНУ ...	51
3.1. Технічні обмеження та шляхи їх подолання	51
3.2. Правові та регуляторні аспекти використання блокчейну	55
3.3. Етичні та соціальні виклики впровадження технології	59
3.4. Стратегії інтеграції блокчейну в різні галузі	62
2.5. Висновки до розділу 3	67
ВИСНОВКИ	69
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	71

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧОК, СИМВОЛІВ І ТЕРМІНІВ

Блокчейн – технологія розподіленого реєстру, що забезпечує децентралізоване, прозоре та безпечне зберігання даних

BTC – Bitcoin, перша та найвідоміша криптовалюта, що базується на блокчейні

ETH – Ethereum, платформа блокчейну, що підтримує смарт-контракти та децентралізовані додатки

DeFi – децентралізовані фінанси (Decentralized Finance), фінансові системи, побудовані на блокчейні без посередників

dApps – децентралізовані додатки (Decentralized Applications), програми, що функціонують на блокчейні.

NFT – невзаємозамінний токен (Non-Fungible Token), унікальний цифровий актив, зареєстрований у блокчейні

PoW – Proof-of-Work, алгоритм консенсусу, що використовує обчислювальні ресурси для валідації транзакцій

PoS – Proof-of-Stake, алгоритм консенсусу, що обирає валідаторів на основі їхньої частки в мережі

DPoS – Delegated Proof-of-Stake, модифікація PoS із делегуванням валідації обмежених кількості вузлів

PoA – Proof-of-Authority, алгоритм консенсусу, що базується на довірених валідаторах

TPS – транзакції за секунду (Transactions Per Second), показник пропускної здатності блокчейну

IoT – Інтернет речей (Internet of Things), мережа підключених пристроїв, що обмінюються даними

ШІ – штучний інтелект (Artificial Intelligence), технології для автоматизації та аналізу даних

TVL – загальна заблокована вартість (Total Value Locked), сума активів, заблокованих у DeFi-протоколах

P2P – однорангова мережа (Peer-to-Peer), система, де учасники взаємодіють напряму без посередників

SHA-256 – криптографічний алгоритм хешування, що використовується в блокчейнах, таких як Bitcoin

Layer 2 – рішення другого рівня, що підвищують масштабованість блокчейну (наприклад, Lightning Network)

CBDC – цифрова валюта центрального банку (Central Bank Digital Currency), цифрова форма національної валюти

DAO – децентралізована автономна організація (Decentralized Autonomous Organization), організація, керована смарт-контрактами

DLT – технологія розподіленого реєстру (Distributed Ledger Technology), загальний термін для блокчейну та подібних систем

EVM – віртуальна машина Ethereum (Ethereum Virtual Machine), середовище для виконання смарт-контрактів

KYC – знай свого клієнта (Know Your Customer), процедура верифікації особи для фінансових операцій

AML – протидія відмиванню грошей (Anti-Money Laundering), регуляторні заходи для запобігання незаконним транзакціям

GDPR – загальний регламент захисту даних (General Data Protection Regulation), європейське законодавство про захист даних

Tangle – альтернативна блокчейну технологія, що використовується в IOTA для IoT-транзакцій

РЦБР – центр досліджень блокчейн-рішень, українська організація, що вивчає застосування блокчейну

ProZorro – українська електронна система публічних закупівель і аукціонів, що використовує блокчейн

Smart City – розумне місто, концепція використання цифрових технологій для управління міською інфраструктурою

ROI – Повернення інвестицій (Return on Investment)

ВСТУП

Сучасний світ стрімко трансформується під впливом цифрових технологій, серед яких технологія блокчейн займає особливе місце. Виникнувши як основа для функціонування криптовалюти Bitcoin, блокчейн швидко еволюціонував, ставши універсальним інструментом для забезпечення прозорості, безпеки та децентралізації в різноманітних сферах. Від фінансових систем до ланцюгів поставок, від державного управління до охорони здоров'я – потенціал блокчейну відкриває нові горизонти для інновацій. У той же час, його розвиток супроводжується технічними, правовими та етичними викликами, які потребують ретельного аналізу та стратегічного підходу до впровадження. Актуальність теми «Перспективи розвитку та застосування технології блокчейн у майбутньому» зумовлена необхідністю осмислення ролі цієї технології в формуванні цифрової економіки та суспільства, а також визначення шляхів подолання перешкод для її масового впровадження.

Блокчейн, як розподілена база даних, забезпечує незмінність записів, прозорість транзакцій і децентралізоване управління, що робить його привабливим для вирішення проблем традиційних централізованих систем. У світовому контексті блокчейн уже застосовується для створення смарт-контрактів, токенизації активів, забезпечення кібербезпеки та навіть у реалізації концепції «розумних міст». В Україні технологія також набирає обертів: від експериментів із цифровими валютами до впровадження блокчейн-рішень у державному секторі та бізнесі. Проте широке застосування блокчейну стримується обмеженнями, такими як висока енергоємність, складність масштабування, правова невизначеність та недостатній рівень обізнаності суспільства. Усе це підкреслює важливість дослідження перспектив розвитку технології, її потенційних сфер застосування та стратегій подолання наявних бар'єрів.

Метою бакалаврської роботи є комплексний аналіз сучасного стану технології блокчейн, оцінка її перспектив розвитку та визначення ключових напрямів і стратегій її застосування в майбутньому.

Для досягнення цієї мети в роботі поставлено такі **завдання**:

1. Провести аналіз сучасного стану технології блокчейн, включаючи її технічні характеристики, переваги та недоліки.
2. Визначити основні тенденції розвитку блокчейн-технологій і потенційні сфери їх застосування.
3. Дослідити технічні, правові та етичні виклики, пов'язані з впровадженням блокчейну.
4. Розробити рекомендації щодо стратегій інтеграції блокчейну в різні галузі економіки та суспільного життя.
5. Оцінити вплив блокчейну на економічні та соціальні процеси в глобальному та українському контекстах.

Об'єктом дослідження є процес впровадження та розвитку технології блокчейн у соціально-економічних системах.

Предмет дослідження: перспективи використання блокчейн-технологій, напрями їхнього впровадження, виклики та стратегії адаптації у різних галузях, зокрема в контексті цифрової трансформації економіки та державного управління.

Методи дослідження включають аналіз наукової літератури, порівняльний аналіз сучасних блокчейн-систем, прогнозування тенденцій розвитку технології, а також узагальнення досвіду її застосування в різних країнах, зокрема в Україні.

Теоретичною основою роботи є праці вітчизняних і зарубіжних учених, таких як Д. Тапскотт, А. Куд, І. Дунаєв, а також сучасні публікації Центру досліджень блокчейн-рішень.

Практична новизна роботи полягає в систематизації сучасних тенденцій розвитку блокчейн-технологій, розробці рекомендацій щодо їх

інтеграції в український контекст та оцінці впливу технології на післявоєнну відбудову України, зокрема в рамках концепції «розумних міст».

Практична значущість роботи полягає в можливості використання її результатів для формування стратегій впровадження блокчейну в економіку, державне управління та бізнес-процеси, що сприятиме підвищенню прозорості, ефективності та безпеки цих сфер.

Структура роботи складається зі вступу, трьох розділів, висновків і списку використаних джерел. У першому розділі аналізується сучасний стан технології блокчейн, її принципи та поточні застосування. Другий розділ присвячений перспективам розвитку технології та її потенційним сферам застосування. У третьому розділі розглядаються виклики впровадження блокчейну та стратегії їх подолання. У висновках узагальнено результати дослідження та надано рекомендації щодо подальшого розвитку технології.

Бакалаврська робота спрямована на комплексне дослідження технології блокчейн, що дозволить не лише поглибити розуміння її потенціалу, але й визначити конкретні кроки для її ефективного використання в майбутньому, зокрема в Україні.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН

1.1. Історичний розвиток технології блокчейн

Технологія блокчейн, яка нині асоціюється з децентралізацією, прозорістю та безпекою, пройшла значний шлях від теоретичних концепцій до практичного застосування в різних галузях. Її історичний розвиток відображає еволюцію ідей щодо криптографії, розподілених систем і цифрової економіки. Починаючи з ранніх концепцій захисту даних і закінчуючи створенням глобальних платформ, таких як Bitcoin і Ethereum, блокчейн став ключовим елементом цифрової трансформації. Цей підрозділ присвячено аналізу основних етапів розвитку технології блокчейн, починаючи з її витоків і закінчуючи сучасними тенденціями.

Історія блокчейну бере початок у 1980-х роках, коли криптографія почала активно розвиватися як інструмент захисту інформації. Одним із перших кроків стало створення концепції цифрових підписів і хеш-функцій, які лягли в основу безпеки блокчейну. У 1991 році Стюарт Хабер і Скотт Сторнетта запропонували ідею криптографічно захищеного ланцюжка блоків, де дані могли бути збережені з часовою міткою, що унеможливлювало їх зміну [1]. Ця концепція стала прототипом сучасного блокчейну, хоча на той час вона використовувалася переважно для захисту документів. Основна ідея полягала в тому, щоб забезпечити незмінність даних шляхом їх зв'язування в ланцюжок, де кожен блок містив хеш попереднього.

Наступний важливий етап у розвитку блокчейну припадає на початок 2000-х років, коли ідеї децентралізації почали набувати популярності. У 2008 році особа або група під псевдонімом Сатоші Накамото опублікувала white paper під назвою «Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System», де вперше було описано блокчейн як розподілену базу даних для забезпечення

транзакцій без посередників [13]. Bitcoin став першою практичною реалізацією блокчейну, де технологія використовувалася для створення децентралізованої цифрової валюти. Кожен блок у мережі Bitcoin містив транзакції, які підтверджувалися учасниками мережі (майнерами) за допомогою консенсусного алгоритму Proof-of-Work. Це дозволило забезпечити прозорість і безпеку без необхідності довіряти центральному органу.

Успіх Bitcoin сприяв появі нових блокчейн-проектів, які розширили межі застосування технології. У 2013 році Віталік Бутерін запропонував концепцію Ethereum – платформи, яка ввела смарт-контракти, тобто програми, що автоматично виконуються за заданими умовами [3]. Ethereum дозволив створювати децентралізовані додатки (dApps), що відкрило можливості для використання блокчейну не лише у фінансах, але й у таких сферах, як управління, логістика та охорона здоров'я. Смарт-контракти стали важливим кроком у розвитку технології, оскільки вони автоматизували процеси, зменшуючи потребу в посередниках і підвищуючи ефективність.

Паралельно з Ethereum з'явилися інші блокчейн-платформи, такі як Ripple, Hyperledger і Cardano, кожна з яких мала свої особливості та цільові аудиторії. Наприклад, Ripple зосередилася на швидких і дешевих транзакціях для фінансових установ, тоді як Hyperledger, створений Linux Foundation, пропонував приватні блокчейни для корпоративного використання [7]. Ці платформи показали, що блокчейн може бути адаптований до різних потреб, від публічних мереж із повною прозорістю до закритих систем із обмеженим доступом. Таким чином, період із 2013 по 2018 роки можна вважати етапом диверсифікації блокчейн-технологій.

Україна також долучилася до розвитку блокчейну, хоча й із певним запізненням. Починаючи з 2016 року, в країні почали з'являтися перші проекти, пов'язані з блокчейном, зокрема в державному секторі. Одним із прикладів є використання блокчейну для створення прозорої системи електронних аукціонів, таких як «ProZorro.Продажі» [14]. Цей проект

продемонстрував потенціал технології для підвищення прозорості та боротьби з корупцією. Крім того, українські дослідники, такі як А. Куд, почали активно вивчати можливості токенизації активів, що стало важливим кроком у розвитку цифрової економіки [15]. Ці ініціативи підкреслюють актуальність блокчейну в українському контексті, особливо в умовах необхідності відновлення економіки після війни.

Останні роки розвитку блокчейну характеризуються появою нових технологічних рішень, таких як алгоритми консенсусу Proof-of-Stake, які зменшують енергоспоживання порівняно з Proof-of-Work [2]. Крім того, з'явилися концепції міжланцюгової взаємодії (interoperability), які дозволяють різним блокчейнам обмінюватися даними, а також рішення для масштабування, такі як Lightning Network для Bitcoin і шардинг для Ethereum. Ці інновації спрямовані на подолання основних обмежень блокчейну, таких як низька швидкість транзакцій і висока енергоємність.

Ще одним важливим напрямом розвитку стала інтеграція блокчейну з іншими технологіями, такими як штучний інтелект і Інтернет речей (IoT). Наприклад, блокчейн використовується для забезпечення безпеки даних у IoT-пристроях, а також для створення децентралізованих ринків даних, де штучний інтелект може аналізувати інформацію [4]. Ці синергії відкривають нові перспективи для застосування блокчейну, зокрема в «розумних містах» і автоматизованих системах управління.

Незважаючи на значний прогрес, історичний розвиток блокчейну також супроводжувався викликами. У перші роки існування Bitcoin і інших криптовалют технологія часто асоціювалася з незаконною діяльністю, такою як відмивання грошей, що створювало негативний імідж [11]. Крім того, технічні обмеження, такі як масштабованість і енергоспоживання, а також правова невизначеність, стримували масове впровадження. Проте поступове визнання блокчейну з боку урядів, корпорацій і міжнародних організацій змінило ситуацію, зробивши його визнаним інструментом цифрової трансформації.

Історичний розвиток технології блокчейн можна поділити на кілька ключових етапів: теоретичні основи в 1990-х, поява Bitcoin у 2008 році, розширення можливостей завдяки Ethereum і смарт-контрактам у 2013 році, диверсифікація платформ у 2010-х і сучасний етап інновацій, спрямованих на масштабування та інтеграцію з іншими технологіями. В Україні блокчейн також набуває популярності, зокрема в державному секторі та цифровій економіці. Цей розвиток закладає основу для подальшого аналізу сучасного стану технології та її перспектив у майбутньому.

1.2. Основні принципи та технічні характеристики блокчейну

Технологія блокчейн є однією з ключових інновацій сучасності, яка забезпечує децентралізоване, безпечне та прозоре управління даними. Її унікальність полягає в поєднанні криптографічних методів, розподілених систем і консенсусних механізмів, що дозволяє створювати надійні платформи без посередників. Основні принципи та технічні характеристики блокчейну формують його потенціал для застосування в різних галузях, від фінансів до державного управління. Цей підрозділ присвячено аналізу основних принципів функціонування блокчейну, його технічних особливостей і компонентів, які забезпечують його ефективність і безпеку.

Блокчейн базується на кількох фундаментальних принципах, які визначають його функціональність і відрізняють від традиційних централізованих баз даних. Першим принципом є децентралізація. На відміну від централізованих систем, де дані зберігаються на одному сервері під контролем однієї організації, блокчейн розподіляє дані між багатьма вузлами (комп'ютерами) у мережі. Кожен вузол має повну копію блокчейну, що забезпечує стійкість до збоїв і атак, оскільки немає єдиної точки відмови [2]. Децентралізація також усуває потребу в посередниках, таких як банки чи нотаріуси, що знижує витрати та підвищує ефективність.

Другим ключовим принципом є прозорість і незмінність. Усі транзакції, записані в блокчейн, є відкритими для перевірки учасниками мережі (у публічних блокчейнах) і захищені криптографічними методами, що унеможлиблює їх зміну після запису. Кожен блок містить хеш попереднього блоку, створюючи ланцюжок, де будь-яка спроба змінити дані в одному блоці вимагатиме зміни всіх наступних блоків, що є обчислювально складним завданням [5]. Цей принцип забезпечує довіру до системи навіть у середовищі, де учасники не довіряють один одному.

Третій принцип – безпека, яка досягається за допомогою криптографії. Блокчейн використовує асиметричну криптографію, де учасники мають пару ключів: публічний для шифрування транзакцій і приватний для їх підпису. Це гарантує, що лише власник приватного ключа може ініціювати транзакцію, а інші учасники можуть перевірити її справжність [10]. Крім того, механізми консенсусу, такі як Proof-of-Work або Proof-of-Stake, захищають мережу від атак, наприклад, від спроби подвійного витрачання.

Четвертим принципом є автоматизація через смарт-контракти. Смарт-контракти – це програмний код, який автоматично виконується за виконання заздалегідь визначених умов. Вони дозволяють створювати складні децентралізовані додатки, які функціонують без людського втручання, наприклад, для автоматичних платежів чи управління ланцюгами поставок [3]. Цей принцип розширює можливості блокчейну, роблячи його універсальним інструментом для різних сфер.

Технічні характеристики блокчейну подані у табл.1.1.

Технічні характеристики блокчейну визначають його застосування. Наприклад, децентралізація та незмінність роблять його ідеальним для фінансових транзакцій, де потрібна довіра без посередників. Смарт-контракти знаходять застосування в автоматизації бізнес-процесів, таких як логістика чи страхування. У той же час, обмеження, такі як низька пропускну здатність і висока енергоємність, створюють виклики для масового впровадження, що вимагає подальших інновацій [24].

Таблиця 1.1.

Технічні характеристики блокчейн-технологій

№	Характеристика	Детальний опис	Приклади / Примітки
1	Структура блоків	Блокчейн складається з лінійно пов'язаної послідовності блоків. Кожен блок має заголовок (header) і тіло (body). У заголовку зберігається хеш попереднього блоку (що забезпечує цілісність), тимчасова мітка (timestamp) і nonce — число, необхідне для вирішення задачі в алгоритмах консенсусу (наприклад, у PoW). Тіло блоку містить підтверджені транзакції. Хешування здійснюється зазвичай через алгоритм SHA-256.	У Bitcoin: – Розмір блоку $\approx$ 1 МБ – Кожен блок містить в середньому 2000–3000 транзакцій – SHA-256 гарантує криптографічний захист структури
2	Вузли мережі	Вузли (nodes) — це комп'ютери або пристрої, що підтримують роботу блокчейну, виконуючи функції зберігання, валідації та ретрансляції інформації. Розрізняють: – Повні вузли (full nodes) — зберігають повну копію блокчейну; – Легкі вузли (light nodes) — завантажують лише заголовки блоків. У публічних блокчейнах вузлом може бути будь-хто, а в приватних — лише авторизовані учасники.	У Bitcoin: повні вузли перевіряють усі транзакції та блоки. У Hyperledger Fabric: обмежене коло вузлів, що мають дозволи. Кількість вузлів впливає на стійкість мережі: чим їх більше — тим більша децентралізація і безпека.
3	Механізми консенсусу	Алгоритми, що дозволяють усім учасникам мережі узгоджено приймати рішення щодо додавання нових блоків: – Proof-of-Work (PoW): майнери розв'язують складні обчислювальні задачі. – Proof-of-Stake (PoS): блоки створюють валідатори, які заморожують певну кількість токенів. – Інші: Delegated PoS, Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT), Proof-of-Authority тощо.	Bitcoin використовує PoW: високе енергоспоживання, низька швидкість. Ethereum перейшов на PoS: значне зниження споживання енергії. DPoS — EOS, PBFT — Hyperledger. PoA — приватні блокчейни в урядових і корпоративних проєктах.
4	Масштабованість і TPS	Пропускна здатність (Throughput) — це кількість транзакцій, яку блокчейн може обробити за секунду (TPS). Основними обмеженнями є: – Фіксований розмір блоку – Фіксований інтервал часу генерації блоку Для	Bitcoin: $\approx$ 7 TPS, блок кожні 10 хв. Ethereum: до 30 TPS, блок кожні 12–14 сек. Visa (централізована система): понад 24 000 TPS. Lightning Network дозволяє мікроплатежі

		підвищення масштабованості застосовуються Layer 2 рішення (Lightning Network, Rollups) або технології шардінгу.	поза основним блокчейном, шардінг — у Ethereum 2.0.
5	Енергоефективність	Енергоспоживання — важливий фактор у публічних мережах із PoW. Майнери споживають величезну кількість електроенергії, виконуючи обчислення для створення блоків. PoS і інші механізми значно менш енергоємні. Це знижує негативний екологічний вплив і сприяє сталому розвитку.	Bitcoin: понад 100 ТВт·год/рік, прирівнюється до споживання електроенергії Нідерландами. Ethereum після переходу на PoS у 2022 році зменшив енергоспоживання більш ніж на 99%. PoS, PBFT і PoA — майже не потребують майнінгу.
6	Типи блокчейнів	Тип доступу до блокчейну визначає його категорію: – Публічні: будь-хто може долучитися, читати і записувати (Bitcoin, Ethereum); – Приватні: контроль з боку однієї організації, високий рівень безпеки (Hyperledger, R3 Corda); – Консорціумні: кілька організацій спільно керують мережею (Energy Web, Quorum).	Публічні: висока децентралізація, прозорість, але повільна обробка. Приватні: швидкість, контроль, але нижчий рівень довіри. Консорціумні: баланс між безпекою, ефективністю та довірою між учасниками мережі.

В Україні принципи блокчейну використовуються для забезпечення прозорості в державному секторі. Наприклад, проєкт «ProZorro.Продажі» застосовує блокчейн для захисту даних про аукціони, що знижує корупційні ризики [14]. Крім того, дослідження українських учених, таких як А. Куд, показують потенціал блокчейну для токенизації активів, що може сприяти розвитку цифрової економіки [15].

Основні принципи блокчейну – децентралізація, прозорість, безпека та автоматизація – формують його унікальність як технології. Технічні характеристики, такі як структура блоків, механізми консенсусу та типи мереж, визначають його можливості та обмеження. Хоча блокчейн уже довів свою ефективність у фінансових і державних системах, виклики, пов’язані з масштабованістю та енергоефективністю, залишаються актуальними. Подальший розвиток технології залежить від інновацій, які дозволять подолати ці обмеження та розширити сфери її застосування.

1.3. Аналіз поточного застосування блокчейну в різних галузях

Технологія блокчейн, спочатку розроблена для підтримки криптовалют, таких як Bitcoin, нині знаходить застосування в численних галузях завдяки своїм принципам децентралізації, прозорості та безпеки. Від фінансових систем до логістики, від охорони здоров'я до державного управління – блокчейн трансформує традиційні підходи до управління даними та процесами. Цей підрозділ присвячено аналізу поточного застосування блокчейну в різних секторах економіки та суспільного життя, з акцентом на конкретні приклади, переваги та виклики, а також включає таблицю, що узагальнює основні сфери використання технології.

Фінансовий сектор є піонером у застосуванні блокчейну, оскільки технологія спочатку була створена для забезпечення децентралізованих цифрових валют. Bitcoin і Ethereum залишаються найвідомішими прикладами, дозволяючи здійснювати транзакції без посередників, таких як банки, що знижує витрати та прискорює процеси [13]. Крім криптовалют, блокчейн використовується для міжнародних платежів. Наприклад, платформа RippleNet, побудована на блокчейні, забезпечує швидкі та дешеві транзакції для банків і фінансових установ, таких як Santander і Standard Chartered [7]. У 2023 році Ripple обробляла транзакції на суму понад 30 мільярдів доларів щокварталу, демонструючи масштаби застосування.

Ще одним напрямом є децентралізовані фінанси (DeFi), які базуються на смарт-контрактах Ethereum. DeFi-платформи, такі як Uniswap і Aave, дозволяють користувачам позичати, інвестувати та обмінювати активи без традиційних фінансових посередників [3]. Станом на 2025 рік загальна заблокована вартість (TVL) у DeFi-протоколах перевищує 100 мільярдів доларів, що свідчить про зростання популярності цього сектору. Однак виклики, такі як вразливість смарт-контрактів до хакерських атак і регуляторна невизначеність, стримують ширше впровадження.

Блокчейн революціонізує управління ланцюгами поставок, забезпечуючи прозорість і відстежуваність. Технологія дозволяє фіксувати кожен етап руху товару – від виробництва до кінцевого споживача – у незмінному реєстрі. Наприклад, IBM Food Trust, платформа на базі Hyperledger, використовується такими компаніями, як Walmart, для відстеження продуктів харчування [28]. Це дозволяє швидко виявляти джерела забруднення, наприклад, у разі спалахів харчових інфекцій, скорочуючи час реагування з тижнів до секунд. У 2023 році Walmart повідомила, що використання блокчейну зменшило час відстеження продуктів із 7 днів до 2,2 секунди.

В Україні блокчейн також застосовується в логістиці. Наприклад, проєкти, пов'язані з токенизацією активів, досліджують можливість використання блокчейну для управління логістичними процесами, що підвищує прозорість і знижує корупційні ризики [15]. Проте висока вартість впровадження та необхідність стандартизації даних залишаються перешкодами для масового використання.

У сфері охорони здоров'я блокчейн використовується для безпечного зберігання та обміну медичних даних. Технологія забезпечує захист конфіденційних даних пацієнтів і дозволяє створювати єдині реєстри, доступні лише авторизованим особам. Наприклад, платформа MedRec, розроблена МІТ, використовує блокчейн для створення децентралізованих електронних медичних карт, які пацієнти можуть контролювати самостійно [4]. Це зменшує ризик витоку даних і полегшує обмін інформацією між лікарями.

В Україні блокчейн розглядається як інструмент для підвищення прозорості в закупівлях медичних препаратів. Дослідження Центру досліджень блокчейн-рішень показують, що технологія може допомогти уникнути фальсифікації ліків шляхом відстеження їхнього походження [21]. Однак обмежена інфраструктура та низький рівень цифровізації в деяких медичних закладах ускладнюють впровадження.

Блокчейн активно застосовується в державному секторі для підвищення прозорості та боротьби з корупцією. В Естонії, наприклад, технологія використовується для захисту даних у системі e-Governance, зокрема для електронного голосування та управління земельними реєстрами [25]. Це забезпечує незмінність записів і довіру громадян до державних процесів. У 2023 році Естонія повідомила, що 99% державних послуг доступні онлайн, багато з яких базуються на блокчейн-технологіях.

В Україні блокчейн використовується в системі «ProZorro.Продажі» для забезпечення прозорості аукціонів із продажу державного майна [14]. Цей проєкт отримав міжнародне визнання за зниження корупційних ризиків. Крім того, дослідження І. Дунаєва та А. Кудя пропонують використовувати блокчейн для створення платформ «уряд як платформа» в післявоєнних «розумних містах» [19]. Основним викликом залишається правова невизначеність і потреба в гармонізації законодавства.

Блокчейн також знаходить застосування в енергетиці, освіті та розважальній індустрії. У енергетиці технологія використовується для створення децентралізованих ринків електроенергії, де споживачі можуть купувати енергію безпосередньо від виробників через смарт-контракти [10]. У сфері освіти блокчейн застосовується для верифікації дипломів і сертифікатів, що зменшує ризик підробки. Наприклад, платформа Blockcerts дозволяє університетам видавати цифрові дипломи, які можна перевірити в блокчейні [6].

У розважальній індустрії блокчейн підтримує токенизацію контенту та захист авторських прав. Платформи, такі як Audius, дозволяють музикантам отримувати винагороду безпосередньо від слухачів, минаючи посередників [3]. В Україні подібні ініціативи поки перебувають на початковій стадії, але дослідження показують потенціал блокчейну для розвитку креативних індустрій [22].

Застосування блокчейну в різних галузях наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2.

Застосування блокчейну в різних галузях

Галузь	Конкретні приклади застосування	Ключові переваги	Основні виклики
Фінансовий сектор	– Bitcoin, Ethereum — передача цінності без посередників – RippleNet — трансграничні платежі – DeFi-платформи (Uniswap, Aave) — кредитування, стейкінг, обмін токенів	– Миттєві транзакції з низькими комісіями – Відсутність банків-посередників – Глобальна доступність фінансових інструментів для неklasичних користувачів	– Високий ризик для користувачів через відсутність регуляції – Вразливість до атак на смарт-контракти – Юридичні конфлікти щодо DeFi-активів
Логістика та постачання	– IBM Food Trust (Walmart) — відстеження шляхів постачання продуктів – VeChain — верифікація справжності товарів – Maersk + TradeLens — контейнерні перевезення	– Транспарентність усіх етапів поставки – Можливість швидко ідентифікувати джерело проблеми (наприклад, псування продукції) – Зниження витрат на аудит	– Висока вартість запуску інфраструктури – Відсутність єдиних стандартів між країнами та компаніями – Необхідність інтеграції з ERP-системами
Охорона здоров'я	– MedRec — управління медичними записами – PharmaLedger — відстеження походження лікарських засобів – EHR Data — обмін клінічною інформацією	– Підвищений захист медичних даних від стороннього доступу – Можливість надати пацієнту контроль над його даними – Виявлення підроблених ліків	– Недостатня цифрова інфраструктура в лікарнях – Низька швидкість прийняття технологій – Висока вимогливість до зберігання та конфіденційності персональних даних
Державне управління	– ProZorro.Продажі — прозорі електронні аукціони – e-Estonia — ID-карти, електронне голосування, управління реєстрами – Ukrainian eGovernment — реєстри та землевпорядкування	– Підвищення довіри до державних інституцій – Незмінність і прозорість реєстрів – Автоматизація документообігу і процедур	– Відсутність оновленої законодавчої бази – Неузгодженість між державними платформами – Складність масштабування на всі регіони країни
Енергетика	– Power Ledger, WePower — p2p-торгівля електроенергією – Brooklyn Microgrid — розподілена мережа споживачів і виробників – SunContract — сонячна енергія	– Усунення посередників в обміні електроенергією – Гнучке ціноутворення в режимі реального часу – Зростання частки «зеленої» енергетики	– Складність інтеграції з національними енергомережами – Обмеження регуляторного характеру – Потреба в інтелектуальних лічильниках та смарт-контрактах
Освіта	– Blockcerts — децентралізоване зберігання дипломів і	– Захист від підробки дипломів – Просте підтвердження	– Низька цифрова грамотність в освітньому середовищі – Висока

	сертифікатів – Sony Global Education — токенизовані освітні досягнення – MIT Media Lab — цифрова верифікація	кваліфікації при працевлаштуванні – Доступність сертифікатів у будь-який момент	інерція традиційних закладів – Необхідність юридичної адаптації цифрових дипломів
Медіа та розваги	– Audius — децентралізований стримінг музики – Livepeer — відеотрансляції з токенизацією – NBA Top Shot — токенизація моментів гри у вигляді NFT	– Прямий зв'язок між творцем контенту і споживачем – Нові моделі монетизації через NFT – Авторські права закладені в блокчейн	– Низька зрілість NFT-ринку – Проблеми із законодавством у сфері цифрової інтелектуальної власності – Конкуренція з централізованими платформами (YouTube, Spotify тощо)

Блокчейн демонструє значний потенціал у трансформації різних галузей завдяки своїм унікальним характеристикам. У фінансовому секторі він забезпечує швидкі та дешеві транзакції, у логістиці – прозорість, в охороні здоров'я – безпеку даних, а в державному управлінні – зниження корупції. В Україні технологія успішно застосовується в таких проєктах, як «ProZorro.Продажі», і має перспективи для розвитку в післявоєнній відбудові. Проте виклики, такі як регуляторна невизначеність, висока вартість впровадження та технічні обмеження, потребують подальшого вирішення для забезпечення ширшого використання.

1.4. Переваги та недоліки сучасних блокчейн-систем

Сучасні блокчейн-системи, незважаючи на свою інноваційність, мають як істотні переваги, так і помітні обмеження, що впливають на швидкість їх поширення, прийняття в інституціях та інтеграцію в критично важливі галузі економіки. Основна перевага блокчейну полягає в його здатності забезпечувати децентралізоване зберігання і передачу даних без потреби в довіреному посереднику. Завдяки застосуванню криптографії та хеш-функцій, таких як SHA-256, досягається високий рівень цілісності даних та захисту від фальсифікацій, що особливо важливо у фінансовому секторі,

охороні здоров'я та юридичних процесах [4]. Ще однією сильною стороною блокчейну є прозорість: інформація, записана в блокчейн, є доступною для всіх учасників мережі (у публічних системах), а її зміна в минулих блоках практично неможлива без порушення цілісності всього ланцюга, що робить подібні системи надзвичайно надійними для верифікації прав власності, договорів чи транзакцій [5].

Крім того, сучасні блокчейни демонструють нові підходи до розподілених обчислень і підвищення продуктивності завдяки таким рішенням, як шардінг (розділення обробки на паралельні підмережі), сайдчейни (додаткові блокчейни для обробки транзакцій поза основною мережею) або технології другого рівня, як-от Lightning Network [6]. Проте, незважаючи на швидке технічне зростання, блокчейн-системи не позбавлені недоліків, які обмежують їх широке впровадження. Насамперед, йдеться про проблему масштабованості: мережі, засновані на Proof-of-Work, мають обмежену пропускну здатність, яка значно нижча за централізовані аналоги (наприклад, Bitcoin — близько 7 транзакцій на секунду, тоді як VISA — понад 24 тисячі) [7].

Крім цього, блокчейн-системи часто зазнають критики через надмірне енергоспоживання, зумовлене характером майнінгу в PoW-системах. Так, енергоспоживання мережі Bitcoin у 2023 році перевищувало 100 ТВт·год, що співставно з обсягами електроспоживання окремих країн, зокрема таких як Аргентина чи Швеція [8]. Інша серйозна проблема — регуляторна невизначеність. У багатьох країнах відсутні чіткі законодавчі рамки для визнання транзакцій, заснованих на блокчейні, або смарт-контрактів як юридично обов'язкових документів. Блокчейн також створює загрози у сфері конфіденційності: хоча дані шифруються, публічна природа реєстрів у деяких мережах може дозволити стороннім особам проводити непряму ідентифікацію осіб на основі поведінкових або фінансових моделей [9].

Для систематизації згаданих аспектів нижче наведено розгорнуту таблицю порівняння переваг і недоліків сучасних блокчейн-технологій:

Таблиця 1.4.

Порівняння переваг і недоліків сучасних блокчейн-систем

Критерій оцінювання	Переваги сучасних блокчейн-систем	Недоліки сучасних блокчейн-систем	Аналітичний коментар
Архітектура управління	Відсутність єдиного контрольного центру. Забезпечення автономії користувачів. Доступ до відкритих протоколів.	Ускладнення оновлення мережі, консенсусу щодо змін, ризик конфліктів при форках.	Децентралізація зменшує корупційні ризики, але вимагає досконалих механізмів голосування і управління, як-от DAO.
Захист і незмінність	Неможливість зміни транзакцій після підтвердження. Криптографічна цілісність даних. Безпека від несанкціонованого доступу.	Незворотність помилок. Уразливості в коді смарт-контрактів можуть спричинити втрати активів.	Ідеальна технологія для ведення реєстрів і контрактів, однак потребує професійного аудиту ще до запуску проекту.
Продуктивність і масштаб	Використання шардінгу, сайдчейнів, Rollups та рішень другого рівня дозволяє масштабувати мережу без втрати децентралізації.	Базова пропускна здатність PoW-мереж (Bitcoin, Ethereum 1.0) значно нижча за централізовані платіжні системи.	Сучасні розробки покращують продуктивність, але додатково ускладнюють архітектуру та вимагають сумісності між шарами.
Енергоспоживання	Нові системи на основі Proof-of-Stake та подібних алгоритмів вимагають мінімум ресурсів. Зменшення споживання електроенергії до екологічно прийнятного рівня.	Системи Proof-of-Work залишаються надзвичайно енерговитратними, що особливо відчутно на глобальному рівні.	Перехід від PoW до PoS — важливий тренд, що дозволяє блокчейну відповідати вимогам сталого розвитку.
Юридична сумісність	Можливість цифрової автоматизації договорів. Використання смарт-контрактів для виконання зобов'язань. Інтеграція з електронними реєстрами.	Невизначеність статусу блокчейн-транзакцій у більшості країн. Відсутність законодавства щодо токенів, DAO, криптозастосунків.	Регуляторна база відстає від технології, що створює бар'єри для державного та фінансового впровадження.
Конфіденційність	Дані шифруються й можуть бути доступні лише уповноваженим	У публічних блокчейнах зберігається	Повна прозорість підвищує довіру, але потребує

	сторонам (у приватних блокчейнах).	можливість деанонізації транзакцій шляхом аналізу блоків.	балансу з приватністю, особливо в медичних і фінансових системах.
Інтеграційна здатність	Блокчейн-системи інтегруються з IoT, Big Data, AI та іншими технологіями. Відкритість API сприяє розширенню функціональності.	Інтеграція вимагає перебудови існуючої IT-інфраструктури. Бракує загальних протоколів для взаємодії між блокчейн-платформами.	Інтеграція з існуючими системами — складна, але дозволяє побудувати нові цифрові екосистеми в промисловості та сервісах.
Вартість впровадження	Можливе зниження експлуатаційних витрат завдяки автоматизації процесів, виключенню посередників, зменшенню витрат на аудит і перевірку.	Початкові інвестиції у розробку, навчання персоналу, адаптацію нормативів — високі.	Економія досягається в середньостроковій перспективі, але старт потребує значних ресурсів і організаційної перебудови.

Отже, блокчейн-технології поступово перетворюються з експериментального інструменту ентузіастів на фундаментальний елемент цифрової інфраструктури, здатний кардинально змінити підходи до зберігання, передачі, верифікації та захисту інформації в електронному середовищі. Його потенціал полягає не лише в заміні традиційних централізованих систем, а й у створенні нових цифрових екосистем, де ключові процеси функціонують на засадах прозорості, децентралізації, криптографічного захисту та автоматизації довіри за допомогою смарт-контрактів. Проте ефективність реального застосування блокчейну все ще значною мірою залежить від здатності вирішити низку критичних проблем.

Серед них найпомітнішою є проблема масштабованості: базові версії популярних блокчейн-мереж демонструють недостатню швидкість обробки транзакцій, що обмежує їх придатність для масових застосувань, таких як фінансові платформи або логістичні системи глобального рівня. Паралельно стоїть виклик надмірного енергоспоживання, особливо у системах, що

використовують алгоритм Proof-of-Work, адже їх функціонування вимагає колосальних обчислювальних ресурсів. У відповідь на це відбувається поступовий перехід до альтернативних моделей консенсусу — Proof-of-Stake, BFT-похідних або гібридних архітектур, що дозволяють зменшити витрати енергії та підвищити ефективність.

Водночас юридичні аспекти залишаються однією з найбільш спірних зон. У багатьох юрисдикціях статус токенів, смарт-контрактів та децентралізованих платформ не врегульований належним чином, що створює бар'єри для офіційного визнання транзакцій, проведених на блокчейні, як правочинів, що мають юридичну силу. Це, у свою чергу, уповільнює інституціалізацію технології в таких сферах, як державне управління, земельний кадастр, електронне нотаріатство або банківське обслуговування.

Однак перспективи залишаються вкрай позитивними. В подальшому слід очікувати поглибленої інтеграції блокчейн-платформ з іншими технологіями Четвертої промислової революції — зокрема, штучним інтелектом, Інтернетом речей, хмарними обчисленнями та технологіями цифрової ідентичності. Така синергія відкриває шлях до побудови безпечних, адаптивних, масштабованих інформаційних систем, що забезпечують швидку верифікацію, мінімізують ризики шахрайства та сприяють повній діджиталізації взаємодії між суб'єктами — як у публічному, так і в комерційному секторі. Крім того, розвиток єдиного міжнародного регуляторного простору щодо блокчейн-рішень може суттєво прискорити перехід від експериментального до інституційного рівня їх застосування та відкрити нові можливості для транскордонних сервісів, юридично значимих електронних взаємодій і глобальної стандартизації цифрових активів.

1.5. Висновки до розділу 1

Аналіз сучасного стану технології блокчейн, проведений у цьому розділі, дозволяє зробити висновок про її значний потенціал і водночас

наявність викликів, які потребують вирішення для подальшого розвитку. Технологія блокчейн пройшла шлях від теоретичних концепцій криптографії до універсального інструменту, який трансформує різні сфери економіки та суспільного життя. Основні висновки з підрозділів розділу можна узагальнити наступним чином.

По-перше, історичний розвиток блокчейну демонструє його еволюцію від ідеї захисту даних у 1990-х роках до створення Bitcoin у 2008 році та появи платформ, таких як Ethereum, які розширили можливості технології завдяки смарт-контрактам [1, 3, 13]. В Україні блокчейн почав активно застосовуватися з 2016 року, зокрема в державному секторі, що свідчить про його актуальність у локальному контексті [14, 15]. Цей розвиток закладає основу для подальшого вивчення перспектив технології.

По-друге, основні принципи блокчейну – децентралізація, прозорість, безпека та автоматизація – забезпечують його унікальність як технології [2, 5]. Технічні характеристики, такі як структура блоків, консенсусні алгоритми (Proof-of-Work, Proof-of-Stake) і типи мереж (публічні, приватні), визначають його функціональність, але також вказують на обмеження, зокрема низьку масштабованість і високу енергоємність [11, 24]. Ці аспекти є ключовими для розуміння поточного стану технології.

По-третє, аналіз поточного застосування блокчейну показує його широке використання в різних галузях. У фінансовому секторі технологія підтримує криптовалюту та DeFi, у логістиці – прозорість ланцюгів поставок, в охороні здоров'я – безпеку даних, а в державному управлінні – боротьбу з корупцією [7, 28]. В Україні проєкти, такі як «ProZorro.Продажі», і дослідження щодо токенизації активів демонструють практичну цінність блокчейну [14, 21]. Проте регуляторні та технічні бар'єри стримують його ширше впровадження.

По-четверте, переваги блокчейн-систем, такі як стійкість до збоїв, захист даних і автоматизація через смарт-контракти, роблять їх привабливими для сучасних викликів [3, 28]. Однак недоліки, зокрема

обмежена пропускна здатність, висока вартість впровадження та правова невизначеність, створюють значні перешкоди [19, 24]. В Україні ці проблеми ускладнюються обмеженими ресурсами для малих і середніх підприємств [22].

Таким чином, блокчейн є потужною технологією з широким спектром застосувань, але його подальший розвиток залежить від подолання технічних і регуляторних обмежень. В Україні технологія має особливе значення для забезпечення прозорості та підтримки післявоєнної відбудови, зокрема в концепції «розумних міст» [19]. Отримані висновки створюють основу для подальшого дослідження перспектив розвитку блокчейну та стратегій його впровадження, що буде розглянуто в наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2.

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН

2.1. Нові тенденції та інновації в блокчейн-технологіях

Технологія блокчейн продовжує активно розвиватися, відкриваючи нові можливості для економіки, суспільства та технологічних систем. Сучасні тенденції та інновації в цій галузі спрямовані на подолання технічних обмежень, розширення сфер застосування та інтеграцію з іншими передовими технологіями. Від енергоефективних алгоритмів консенсусу до міжланцюгової взаємодії та використання штучного інтелекту – блокчейн трансформується, щоб відповідати вимогам цифрової економіки майбутнього. Цей підрозділ присвячено аналізу ключових нових тенденцій та інновацій у блокчейн-технологіях, які формують їхні перспективи розвитку.

Однією з найвизначніших тенденцій у розвитку блокчейну є перехід до енергоефективних механізмів консенсусу. Традиційний алгоритм Proof-of-Work (PoW), який використовується в Bitcoin, критикується за високу енергоємність, оскільки вимагає значних обчислювальних ресурсів для майнінгу [11]. У відповідь на це з'явилися альтернативи, такі як Proof-of-Stake (PoS), який обирає валідаторів на основі їхньої частки в мережі, а не обчислювальної потужності. У 2022 році Ethereum успішно перейшов на PoS, скоротивши енергоспоживання на 99,95% [2]. Ця інновація не лише знижує екологічний вплив, але й робить блокчейн більш доступним для масштабного використання.

Інші алгоритми, такі як Delegated Proof-of-Stake (DPoS) і Proof-of-Authority (PoA), також набирають популярності. Наприклад, DPoS, який використовується в блокчейнах EOS і Tron, дозволяє делегувати валідацію обмеженій кількості вузлів, підвищуючи швидкість транзакцій [7]. Ці розробки є відповіддю на зростаючу потребу в екологічно стійких технологіях і демонструють прагнення галузі до зниження вуглецевого сліду.

Ще однією ключовою тенденцією є розвиток міжланцюгової взаємодії, яка дозволяє різним блокчейнам обмінюватися даними та активами. Сучасні блокчейни, такі як Bitcoin, Ethereum чи Cardano, часто функціонують ізольовано, що обмежує їхню сумісність. Для вирішення цієї проблеми створюються протоколи міжланцюгової взаємодії, такі як Polkadot і Cosmos [3]. Polkadot, наприклад, дозволяє створювати «парачейни», які підключаються до основного блокчейну (Relay Chain), забезпечуючи обмін даними та транзакціями між різними мережами. У 2025 році Polkadot підтримує понад 100 парачейнів, що демонструє масштаб цієї інновації.

В Україні міжланцюгова взаємодія розглядається як інструмент для інтеграції національних блокчейн-систем із глобальними платформами. Дослідження А. Кудя підкреслюють потенціал таких технологій для розвитку цифрових ринків і токенизації активів [18]. Ця тенденція сприяє створенню глобальної блокчейн-екосистеми, де різні мережі можуть співпрацювати без втрати безпеки чи автономії.

Масштабованість залишається одним із головних викликів блокчейну, і сучасні інновації зосереджені на підвищенні пропускної здатності мереж. Рішення другого рівня (Layer 2), такі як Lightning Network для Bitcoin і Optimistic Rollups для Ethereum, дозволяють обробляти транзакції поза основним блокчейном, зберігаючи при цьому його безпеку [24]. Наприклад, Lightning Network може обробляти тисячі транзакцій за секунду, що наближає блокчейн до рівня централізованих платіжних систем, таких як Visa.

Іншим підходом є шардинг – розподіл блокчейну на менші сегменти (шарди), кожен із яких обробляє частину транзакцій. Ethereum планує завершити впровадження шардингу до 2026 року, що може збільшити його пропускну здатність до 100 000 транзакцій за секунду [2]. Ці інновації відкривають можливості для використання блокчейну в масштабних системах, таких як глобальні фінансові мережі чи «розумні міста».

Інтеграція блокчейну з іншими технологіями, такими як штучний інтелект (ШІ) і Інтернет речей (IoT), є перспективним напрямом розвитку. Блокчейн забезпечує безпечне зберігання даних для IoT-пристроїв, що особливо важливо в «розумних містах» і автоматизованих системах. Наприклад, платформа IOTA використовує технологію Tangle (варіант блокчейну) для обробки мікротранзакцій між IoT-пристроями, такими як датчики в транспортних системах [4]. У 2023 році IOTA підтримувала понад 1 мільйон транзакцій на день у пілотних проєктах «розумних міст».

Штучний інтелект, у свою чергу, може аналізувати дані, збережені в блокчейні, для прогнозування ринкових трендів чи оптимізації бізнес-процесів. Наприклад, проєкт SingularityNET використовує блокчейн для створення децентралізованого ринку ШІ-послуг [10]. В Україні дослідження І. Дунаєва пропонують інтегрувати блокчейн і ШІ для забезпечення прозорості в публічному управлінні, зокрема в післявоєнній відбудові [20]. Ця синергія відкриває нові горизонти для автоматизації та інтелектуалізації процесів.

Токенізація активів, тобто переведення прав на фізичні чи цифрові активи в цифрові токени на блокчейні, є однією з найперспективніших тенденцій. Це дозволяє торгувати нерухомістю, мистецтвом чи інтелектуальною власністю у вигляді токенів, підвищуючи ліквідність і доступність активів. Наприклад, платформа RealT токенизує нерухомість у США, дозволяючи інвестувати в неї від 50 доларів [15]. В Україні А. Куд досліджує токенизацію як інструмент для вирішення економічної нерівності, пропонуючи використовувати її для залучення інвестицій у післявоєнну економіку [18].

Ця тенденція також підтримує розвиток невзаємозамінних токенів (NFT), які використовуються в мистецтві, іграх і маркетингу. У 2023 році ринок NFT досяг обсягу 24 мільярди доларів, хоча й зіткнувся з проблемами спекуляцій [3]. В Україні NFT розглядаються як інструмент для розвитку

креативних індустрій, хоча їхнє впровадження обмежене недостатньою правовою базою [22].

Таблиця 2.1.

Сучасні тенденції та інновації у розвитку блокчейн-технологій

Напрямок інновацій	Суть і характеристика	Конкретні приклади впровадження	Значення для майбутнього розвитку
Енергоефективні алгоритми консенсусу	Відмова від Proof-of-Work на користь більш ощадливих до енергії моделей, як-от Proof-of-Stake, DPoS, PoA. Скорочення електроспоживання на порядок.	Ethereum (перехід на PoS у 2022); EOS і Tron (DPoS); приватні мережі (PoA).	Зменшення вуглецевого сліду блокчейн-систем, підвищення екологічної відповідності, доступність запуску нових мереж для стартапів та урядових ініціатив.
Міжланцюгова взаємодія (interoperability)	Забезпечення обміну даними та активами між різними блокчейнами. Підвищення сумісності мереж, усунення ізольованості систем.	Polkadot (Relay Chain + парачейни), Cosmos (IBC-протокол); дослідження в Україні щодо національної інтеграції.	Побудова глобальної блокчейн-екосистеми, де взаємодія відбувається між незалежними мережами без посередників і втрат безпеки.
Рішення для масштабованості (Layer 2, шардинг)	Layer 2-технології дозволяють обробляти транзакції поза основним блокчейном, шардинг розподіляє навантаження по сегментах. Значне підвищення TPS.	Lightning Network (Bitcoin), Optimistic Rollups (Ethereum), Ethereum-шардинг (до 100 000 TPS після впровадження).	Переорієнтація блокчейну з малих застосунків на глобальні системи: банкінг, смарт-міста, урядові сервіси, цифрові платформи публічних реєстрів.
Інтеграція з AI та IoT	Поєднання блокчейну з Інтернетом речей (для захисту і комунікації між пристроями) та штучним інтелектом (для обробки, аналітики й автоматизації рішень).	ІОТА (Tangle і мікротранзакції в транспорті), SingularityNET (доступ до ШІ-моделей через блокчейн); українські дослідження щодо цифрової відбудови і прозорості управління.	Побудова інтелектуальних міст, автономних енергомереж, безпечних транспортних систем, автоматизація державного управління і соціальних сервісів на основі перевірених даних.

Токенізація активів та NFT	Оцифровування прав на реальні або цифрові активи у формі токенів (включаючи невзаємозамінні токени — NFT). Розширення доступу до інвестицій.	RealT (токенізація нерухомості), ринок NFT (2023 — \$24 млрд), дослідження в Україні про нерівність та інвестиції через токенізацію.	Демократизація фінансів, розширення ринку креативних індустрій, можливість мікроінвестування в об'єкти, які раніше були недоступними для широкого загалу.
----------------------------	--	--	---

Нові тенденції та інновації в блокчейн-технологіях, такі як енергоефективні алгоритми консенсусу, міжланцюгова взаємодія, рішення для масштабованості, інтеграція з ІІІ та ІоТ, а також токенізація активів, формують майбутнє цієї технології. Ці розробки вирішують ключові проблеми, такі як енергоємність і низька пропускна здатність, і відкривають нові можливості для застосування блокчейну в глобальній і українській економіці. В Україні особливу увагу приділено токенізації та «розумним містам», що має значення для післявоєнної відбудови [18, 20]. Подальший розвиток залежить від технологічних удосконалень і створення сприятливого регуляторного середовища.

2.2. Потенційні сфери застосування блокчейну в майбутньому

Технологія блокчейн, завдяки своїй децентралізованій природі, прозорості та безпеці, має потенціал для трансформації численних сфер людської діяльності. У майбутньому її застосування може вийти далеко за межі фінансів і логістики, охоплюючи нові галузі, такі як освіта, екологія, енергетика, а також концепції «розумних міст» і цифрової ідентичності. Поєднання блокчейну з іншими технологіями, такими як штучний інтелект (ІІ) і Інтернет речей (ІоТ), відкриває нові горизонти для інновацій. Цей підрозділ присвячено аналізу потенційних сфер застосування блокчейну в майбутньому, з акцентом на їхній вплив на економіку, суспільство та розвиток України.

Концепція «розумних міст» передбачає інтеграцію цифрових технологій для підвищення якості життя, ефективності інфраструктури та сталого розвитку. Блокчейн може стати основою для децентралізованого управління міськими системами, забезпечуючи прозорість і безпеку даних. Наприклад, блокчейн може використовуватися для управління IoT-пристроями, такими як датчики трафіку чи системи енергопостачання, гарантуючи захист від кібератак [4]. У Дубаї проєкт Smart Dubai планує до 2030 року перевести всі міські транзакції на блокчейн, включаючи оплату комунальних послуг і управління транспортними потоками.

В Україні, особливо в контексті післявоєнної відбудови, блокчейн може відіграти ключову роль у створенні «розумних міст». Дослідження І. Дунаєва та А. Кудя пропонують використовувати блокчейн для платформ «уряд як платформа», що забезпечить прозоре управління ресурсами та залучення інвестицій у міську інфраструктуру [16]. Наприклад, токенизація муніципальних активів може залучити кошти для відновлення зруйнованих міст, таких як Харків чи Маріуполь. Однак для реалізації цього потенціалу необхідні інвестиції в цифрову інфраструктуру та правові рамки.

Цифрова ідентичність – це система, яка дозволяє індивідуумам безпечно підтверджувати свою особу в цифровому середовищі. Блокчейн може забезпечити децентралізоване зберігання даних ідентичності, зменшуючи ризик витоку інформації та надаючи користувачам контроль над їхніми даними. Наприклад, проєкт uPort дозволяє створювати цифрові посвідчення, які верифікуються через блокчейн і можуть використовуватися для доступу до державних чи фінансових послуг [10]. У 2024 році подібні системи тестуються в Індії для спрощення доступу до соціальних програм.

В Україні цифрова ідентичність на базі блокчейну може посилити безпеку таких платформ, як «Дія», забезпечуючи захист даних громадян і спрощуючи верифікацію в умовах воєнного часу [20]. Дослідження показують, що блокчейн може допомогти уникнути шахрайства при видачі документів, таких як паспорти чи сертифікати. Основним викликом

залишається гармонізація з міжнародними стандартами та забезпечення конфіденційності даних.

Блокчейн має значний потенціал для сприяння сталому розвитку та боротьби зі зміною клімату. Технологія може використовуватися для відстеження викидів вуглецю, верифікації походження відновлюваної енергії та управління ринками вуглецевих кредитів. Наприклад, платформа Energy Web Foundation застосовує блокчейн для сертифікації зеленої енергії, дозволяючи споживачам перевіряти, що їхня електроенергія походить із відновлюваних джерел [29]. У 2023 році ця платформа охопила понад 200 енергетичних компаній у Європі.

В Україні блокчейн може підтримувати екологічні ініціативи, такі як токенизація вуглецевих кредитів для залучення інвестицій у зелені проєкти. Дослідження А. Кудя підкреслюють можливість використання блокчейну для прозорого управління природними ресурсами, що є важливим для відновлення екосистем після війни [18]. Проте обмежена інфраструктура та низька обізнаність стримують ці ініціативи.

У сфері освіти блокчейн може революціонізувати управління сертифікатами, дипломами та навчальними досягненнями. Технологія дозволяє створювати незмінні цифрові записи, які підтверджують кваліфікацію, усуваючи ризик підробки. Платформа Blockcerts, розроблена MIT, уже використовується для видачі цифрових дипломів, які можна перевірити в блокчейні [6]. У 2024 році університети в США та Європі почали активно впроваджувати такі системи, що спрощує працевлаштування випускників.

В Україні блокчейн може бути застосований для верифікації освітніх документів, що особливо актуально для біженців і переселенців, які втратили фізичні документи. Дослідження М. Машченка та ін. пропонують використовувати блокчейн для створення децентралізованих освітніх платформ, які забезпечать доступ до навчання в умовах кризи [21]. Основною

перешкодою є необхідність інтеграції з традиційними системами освіти та фінансування таких проєктів.

У майбутньому блокчейн може трансформувати соціальні мережі, надаючи користувачам контроль над їхніми даними та монетизацією контенту. Децентралізовані платформи, такі як Steemit і Lens Protocol, використовують блокчейн для створення соціальних мереж, де користувачі отримують винагороду за контент у вигляді токенів [3]. Це зменшує залежність від централізованих корпорацій, таких як Meta чи Google, і захищає дані користувачів.

В Україні креативні індустрії, зокрема музика та мистецтво, можуть скористатися блокчейном для токенизації контенту та захисту авторських прав. Дослідження І. Дунаєва вказують на потенціал блокчейну для розвитку цифрового маркетингу та підтримки українських митців на глобальних ринках [23]. Однак низька обізнаність і конкуренція з традиційними платформами залишаються викликами.

Таблиця 2.2.

Потенційні сфери застосування блокчейн-технологій у майбутньому

Сфера застосування	Основні можливості та приклади використання	Значення для України	Ключові виклики впровадження
Розумні міста (Smart Cities)	Блокчейн як інфраструктурна основа для управління IoT-пристроями, комунальними послугами, транспортом, трафіком, енергетикою. Приклад: проєкт Smart Dubai, інтеграція всіх транзакцій до 2030 року.	Може стати основою для цифрової відбудови міст після війни. Токенизація муніципального майна – нове джерело інвестицій. Підвищення прозорості управління ресурсами (Харків, Маріуполь).	Необхідність значних інвестицій у цифрову інфраструктуру, гармонізація з е-урядом, потреба в залученні приватного сектору до модернізації.
Цифрова ідентичність	Децентралізована система зберігання цифрових документів, паспортів, сертифікатів. Приклад: uPort, проєкти в Індії для доступу до соцпрограми.	Посилення кіберзахисту платформ на зразок «Дія». Верифікація громадян у військовий та післявоєнний періоди. Безпечне підтвердження особи, боротьба з шахрайством у	Необхідність уніфікації з міжнародними стандартами цифрових ідентичностей, забезпечення повної

		документах.	конфіденційності та права громадян на контроль даних.
Екологія та сталий розвиток	Відстеження викидів CO ₂ , сертифікація зеленої енергії, торгівля вуглецевими кредитами. Приклад: Energy Web Foundation — 200+ компаній у Європі.	Можливість токенизації вуглецевих квот для фінансування зелених проєктів. Прозоре управління екосистемами та природними ресурсами у післявоєнний період.	Відсутність цифрової еко-інфраструктури, низька обізнаність муніципалітетів, потреба в державному стимулюванні «зелених» блокчейн-рішень.
Освіта	Верифікація дипломів, сертифікатів, навчальних досягнень. Приклад: Blockcerts (MIT), системи в університетах США та ЄС.	Верифікація освітніх документів для біженців і переселенців. Надійне підтвердження кваліфікацій українських випускників на глобальному ринку праці.	Потреба в інтеграції з державними та університетськими системами, нестача цифрових кадрів, обмежене фінансування цифрової трансформації в освіті.
Соціальні мережі та креативна економіка	Блокчейн-платформи, які дають змогу користувачам контролювати власні дані, монетизувати контент. Приклад: Steemit, Lens Protocol, NFT-інфраструктура.	Підтримка цифрових креаторів, розвиток української музики, мистецтва і медіа на глобальних платформах через NFT. Захист авторських прав у цифровому середовищі.	Відсутність нормативної бази для NFT, конкуренція з великими централізованими платформами (Meta, YouTube), низька цифрова грамотність серед авторів.

Потенційні сфери застосування блокчейну в майбутньому охоплюють «розумні міста», цифрову ідентичність, екологію, освіту та креативні індустрії. Технологія може забезпечити прозорість, безпеку та ефективність у цих галузях, сприяючи сталому розвитку та цифровізації. В Україні блокчейн має особливе значення для післявоєнної відбудови, зокрема через токенизацію активів і створення «розумних міст» [16, 18]. Реалізація цього потенціалу залежить від подолання інфраструктурних, правових і фінансових бар'єрів, а також від інтеграції з іншими технологіями, такими як ШІ та IoT.

2.3. Вплив блокчейну на економіку та суспільство

Технологія блокчейн, завдяки своїм унікальним характеристикам, таким як децентралізація, прозорість і безпека, має потенціал для кардинальних змін у економічних і соціальних системах. Її вплив проявляється у підвищенні ефективності бізнес-процесів, зниженні витрат, забезпеченні прозорості та створенні нових моделей взаємодії в суспільстві. Водночас блокчейн породжує виклики, пов'язані з регулюванням, нерівністю доступу до технологій і соціальними трансформаціями. Цей підрозділ присвячено аналізу впливу блокчейну на економіку та суспільство, з акцентом на глобальні тенденції та перспективи для України.

Економічний вплив блокчейну. Зниження транзакційних витрат і підвищення ефективності. Блокчейн усуває потребу в посередниках, таких як банки, нотаріуси чи платіжні системи, що значно знижує витрати на транзакції. Наприклад, у фінансовому секторі платформи, такі як RippleNet, скорочують витрати на міжнародні перекази з 7–10% до менше ніж 1% [7]. У ланцюгах поставок блокчейн, як у проєкті IBM Food Trust, оптимізує процеси відстеження, зменшуючи адміністративні витрати на 30% [28]. В Україні токенизація активів, досліджувана А. Кудом, може спростити інвестиційні процеси, залучаючи капітал у післявоєнну економіку [18].

Розвиток нових економічних моделей. Блокчейн сприяє появі децентралізованих фінансів (DeFi) і токенизації активів, що створюють нові ринки. DeFi-платформи, такі як Uniswap, дозволяють користувачам отримувати доступ до фінансових послуг без традиційних банків, а загальна заблокована вартість у DeFi у 2025 році перевищує 100 мільярдів доларів [3]. Токенизація активів, таких як нерухомість чи мистецтво, підвищує їхню ліквідність, дозволяючи дрібним інвесторам брати участь у ринках, які раніше були доступні лише великим гравцям. В Україні ці моделі можуть підтримати відновлення економіки через залучення мікроінвестицій [15].

Прозорість і боротьба з корупцією. Блокчейн забезпечує незмінність даних, що робить його ефективним інструментом для боротьби з корупцією та шахрайством. У державному секторі, наприклад, українська система «ProZorro.Продажі» використовує блокчейн для забезпечення прозорості аукціонів, що знизило корупційні ризики на 20% у 2023 році [14]. На глобальному рівні Всесвітня продовольча програма ООН застосовує блокчейн для розподілу гуманітарної допомоги, забезпечуючи, щоб кошти доходили до отримувачів без втрат [25]. Ці приклади демонструють економічний ефект від підвищення довіри до систем.

Створення нових робочих місць. Розвиток блокчейн-індустрії стимулює попит на фахівців у сфері криптографії, розробки смарт-контрактів і аналізу даних. За оцінками, у 2024 році глобальний ринок блокчейн-послуг створив понад 2 мільйони робочих місць, зокрема у сфері DeFi та NFT [10]. В Україні зростання інтересу до блокчейну, зокрема через дослідження Центру досліджень блокчейн-рішень, сприяє розвитку IT-сектору, який уже становить 8% ВВП країни [21]. Однак брак спеціалізованої освіти може обмежити цей потенціал.

Соціальний вплив блокчейну. Демократизація доступу до ресурсів. Блокчейн сприяє інклюзивності, надаючи доступ до фінансових і соціальних послуг людям, які не мають банківських рахунків. Наприклад, DeFi-платформи дозволяють жителям країн, що розвиваються, отримувати кредити чи інвестувати, використовуючи лише смартфон [3]. У 2023 році близько 1,7 мільярда людей без банківських рахунків отримали доступ до фінансових послуг через блокчейн. В Україні це може допомогти внутрішньо переміщеним особам і біженцям відновити економічну активність через цифрові гарантії та токенизовані активи [18].

Зміна моделей довіри. Блокчейн замінює традиційні інститути довіри, такі як банки чи уряди, технологічними рішеннями. Смарт-контракти, які автоматично виконуються за заданими умовами, знижують залежність від людського фактора [7]. У державному управлінні, наприклад, Естонія

використовує блокчейн для електронного голосування, що підвищує довіру громадян до виборчих процесів [25]. В Україні дослідження І. Дунаєва пропонують застосовувати блокчейн для прозорості в публічному управлінні, що може відновити довіру до державних інститутів після війни [20].

Соціальні виклики та нерівність. Незважаючи на переваги, блокчейн може посилювати цифрову нерівність. Доступ до технології вимагає технічних знань, стабільного інтернету та обладнання, що може бути недоступним для малозабезпечених груп. У 2024 році лише 15% населення країн, що розвиваються, використовували блокчейн-сервіси через брак інфраструктури [10]. В Україні ця проблема актуальна для сільських регіонів, де цифровізація залишається обмеженою [22]. Крім того, спекуляції на ринках криптовалют і NFT можуть призводити до фінансових втрат для невідповідно вчених користувачів.

Етичні та регуляторні аспекти. Блокчейн створює етичні дилеми, пов'язані з конфіденційністю та відповідальністю. Публічні блокчейни, такі як Bitcoin, забезпечують прозорість, але можуть порушувати приватність, оскільки транзакції є відкритими [5]. У той же час анонімність у деяких мережах може використовуватися для незаконної діяльності, як це було в ранні роки Bitcoin [11]. В Україні відсутність чіткого законодавства щодо криптовалют ускладнює захист прав користувачів і боротьбу з відмиванням грошей [19]. Ці виклики потребують гармонізації з міжнародними стандартами, такими як GDPR.

В Україні блокчейн має особливе значення в контексті післявоєнної відбудови. Технологія може підтримати прозоре управління коштами для відновлення інфраструктури, залучення інвестицій через токенізацію та створення «розумних міст» [16]. Наприклад, проекти, запропоновані Центром досліджень блокчейн-рішень, передбачають використання блокчейну для децентралізованого управління міськими ресурсами, що підвищить ефективність і зменшить корупцію [19]. Крім того, блокчейн може

сприяти розвитку креативних індустрій, дозволяючи українським митцям монетизувати контент через NFT [23].

Однак для реалізації цього потенціалу необхідно подолати низку бар'єрів, зокрема брак правової бази, обмежену цифрову інфраструктуру та низький рівень обізнаності населення. Дослідження М. Машченка та ін. підкреслюють необхідність освітніх програм для підготовки фахівців і популяризації блокчейну серед громадян [21]. Успішне впровадження технології може зробити Україну лідером у цифровій економіці Східної Європи.

Таблиця 2.3.

Економічний і соціальний вплив блокчейн-технологій

Сфера впливу	Ключові прояви та приклади	Значення для України	Проблеми та виклики
Економіка: зниження витрат та оптимізація	Усунення посередників у фінансах і логістиці (наприклад, RippleNet, IBM Food Trust); автоматизація процесів, прозорість ланцюгів постачання.	Токенізація активів як інструмент залучення інвестицій у відбудову; зменшення витрат у публічних закупівлях через системи на блокчейні (ProZorro.Продажі).	Відсутність масштабної діджиталізації, нестача технічних стандартів інтеграції з існуючими інфраструктурами.
Нові економічні моделі	Розвиток DeFi, DAO, токенизації активів. Приклад: платформи Uniswap, RealT, загальна TVL у DeFi > 100 млрд дол.	Створення мікроінвестиційних платформ; альтернативні моделі краудфандингу; підтримка малого інвестора через токенизовану нерухомість або сервіси.	Високий бар'єр входу для неосвічених користувачів, ризики спекуляцій, недостатнє регулювання в сфері DeFi.
Прозорість і антикорупція	Незмінність записів. Державні та міжнародні кейси (ProZorro.Продажі, WFP-Blockchain для гуманітарної допомоги).	Можливість прозорого відстеження використання допомоги, дотацій, державних коштів у проєктах післявоєнної відбудови.	Впровадження гальмується через політичні бар'єри, брак довіри до цифрових реєстрів, необхідність юридичного визнання блокчейн-доказів.
Зайнятість і ринок праці	Створення нових робочих місць у сфері блокчейн-розробки, криптографії, smart	Підтримка IT-сектору, розвиток нових спеціальностей. Можливість підвищення	Дефіцит фахівців, нестача освітніх програм, брак адаптованих

	contract auditing. У 2024 р. — понад 2 млн вакансій глобально.	частки цифрової економіки у ВВП країни.	навчальних курсів у державних закладах освіти.
Фінансова інклюзія	Доступ до фінансових інструментів без банків. Наприклад, DeFi-сервіси через смартфон; цифрові гаманці для країн, що розвиваються.	Використання для допомоги ВПО та біженцям; запуск цифрових гаманців із токенованою гуманітарною допомогою або пенсіями.	Необхідність розширення інтернет-доступу в сільській місцевості; ризики шахрайства без належної верифікації.
Моделі довіри в суспільстві	Смарт-контракти, децентралізоване управління, е-голосування (приклад — Естонія).	Побудова нових підходів до довіри в держуправлінні. Підвищення прозорості місцевої влади, автоматизація соціальних послуг через смарт-контракти.	Юридична неврегульованість смарт-контрактів, брак технічного забезпечення на регіональному рівні.
Цифрова нерівність	Обмежений доступ до блокчейн-сервісів у країнах, що розвиваються; лише 15% користувачів у цих регіонах мали доступ до технології у 2024 р.	Регіональний дисбаланс між містом і селом; обмежена цифрова компетентність у населення похилого віку; ризик виключення вразливих груп із цифрової трансформації.	Відсутність програм цифрового включення; недоступність обладнання та інтернету; нерівномірний розвиток інфраструктури.
Етичні та правові аспекти	Протиріччя між відкритістю блокчейну та потребами приватності; анонімність сприяє і законним, і незаконним транзакціям.	Виклики у сфері AML, KYC, визнання криптодоказів у судах. Потреба в адаптації законодавства до децентралізованих систем.	Відсутність цілісної нормативної бази, необхідність гармонізації з міжнародними рамками (GDPR, FATF).

Блокчейн чинить значний вплив на економіку та суспільство, знижуючи транзакційні витрати, створюючи нові економічні моделі, підвищуючи прозорість і демократизуючи доступ до ресурсів. В Україні технологія має потенціал для підтримки післявоєнної відбудови, боротьби з корупцією та розвитку цифрової економіки [14, 18]. Однак соціальні виклики, такі як цифрова нерівність і етичні дилеми, а також потреба в регулюванні, потребують уваги [19, 22]. Подальший вплив блокчейну

залежить від технологічних інновацій, освіти та створення сприятливого правового середовища.

2.4. Прогноз розвитку технології на найближчі 5-10 років

Упродовж наступного десятиліття технологія блокчейн трансформується з вузькоспеціалізованого фінансового інструменту у повноцінну інфраструктуру цифрової економіки, інтегровану в глобальні суспільні, економічні та адміністративні процеси. На початку періоду (2025–2027 рр.) основний фокус буде спрямовано на подолання залишкових технологічних бар'єрів, таких як масштабованість, енергоефективність та інтероперабельність. Уже до 2027 року очікується, що більшість публічних блокчейн-платформ масово впровадять Layer 2-рішення, шардінг і нові механізми консенсусу, що дозволить досягти продуктивності понад 50 000 транзакцій на секунду без компромісів у безпеці. Це створить умови для залучення нових категорій користувачів та інституцій, зокрема урядів, міжнародних організацій і транснаціональних корпорацій.

У міру зростання зрілості ринку блокчейну, з 2028 до 2032 років прогнозується стрімкий ріст ринків токенизованих активів. За цей період обсяг токенизованих матеріальних та інтелектуальних активів може зрости більш ніж у 25 разів, досягнувши понад 10 трлн доларів. Це охоплюватиме нерухомість, енергетичні сертифікати, боргові інструменти, облігації, цифрові права на твори мистецтва й інтелектуальну власність. Особливо високий потенціал спостерігатиметься у сферах, де традиційні моделі фінансування залишаються забюрократизованими або недоступними для середнього інвестора. Технологія також дедалі частіше використовуватиметься у децентралізованому управлінні публічними активами (DAO), що відкриє новий рівень прозорості у взаємодії громадян із державою.

Таблиця 2.4.

Прогнозні напрями розвитку блокчейн-технологій (2025–2035 рр.)

Період	Ключові події та очікувані зміни	Глобальні наслідки	Роль для України
2025–2027	Впровадження Layer 2, шардінгу, PoS-переходів. Стандартизація протоколів міжланцюгової взаємодії.	Зростання TPS, зниження вартості транзакцій, початок масового інституційного впровадження.	Побудова основи для цифрового врядування, початок токенизації комунальних і освітніх систем.
2028–2030	Масове впровадження токенизації активів, запуск національних платформ цифрової ідентичності на базі блокчейну.	Ліквідність нових ринків, інклюзія малих інвесторів, розквіт цифрової власності.	Інтеграція блокчейну з е-реєстрами, захист прав внутрішньо переміщених осіб, запуск програм NFT-грантів для творчого сектору.
2031–2033	Формування світового ринку вуглецевих токенів, поява багатофункціональних DAO у містах.	Розквіт "зеленої економіки", трансформація моделей державного управління.	Запуск DAO на рівні громад, перехід до відкритої енергетичної статистики з блокчейн-аудитом.
2034–2035	Консолідація блокчейну як базового шару для критичних державних і економічних сервісів. Масове впровадження блокчейн-ID.	Понад 75% критичних систем світу функціонують із використанням блокчейну.	Повноцінна цифрова держава нового покоління, інституційна інтеграція України в європейську блокчейн-інфраструктуру.

У середині 2030-х років очікується стійке зростання "зелених" блокчейн-рішень — тобто таких, які споживають мінімальні енергетичні ресурси та відповідають стандартам сталого розвитку. Широкомасштабний перехід до Proof-of-Stake та PoA-архітектур супроводжуватиметься політичними зобов'язаннями щодо вуглецевої нейтральності цифрових інфраструктур. Водночас блокчейн стане критичною частиною глобального ринку вуглецевих кредитів, забезпечуючи прозорість обліку викидів і підтвердження походження енергії з відновлюваних джерел. Це відкриє новий спектр для інвестицій у «зелену економіку», особливо в країнах, що проходять етап післявоєнної реконструкції або технічної модернізації, таких як Україна.

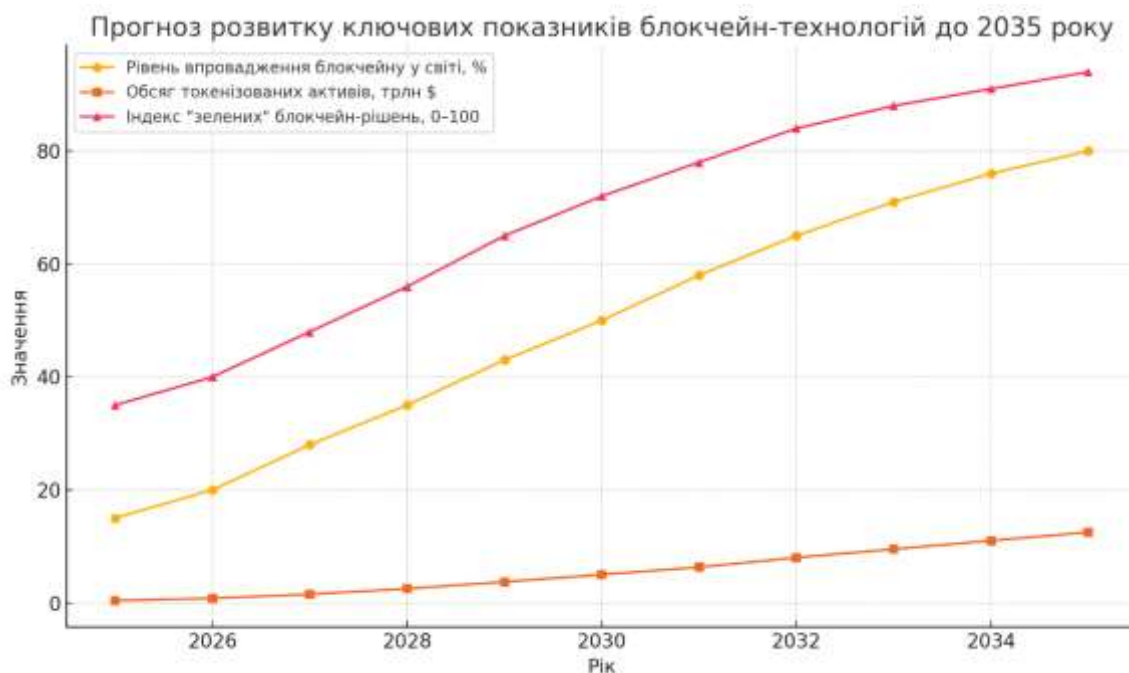


Рис. 2.1. Прогноз розвитку ключових показників блокчейн-технологій до 2035 року

Загалом очікується, що до 2035 року рівень впровадження блокчейну у світі перевищить 75% у критично важливих секторах (банківська сфера, логістика, державне управління, енергетика, охорона здоров'я), а кількість щоденних транзакцій у глобальних блокчейн-мережах сягне сотень мільйонів. В Україні ці процеси синхронізуватимуться із цифровою відбудовою країни, побудовою електронної держави нового покоління та модернізацією фінансової екосистеми через токенизацію державних і муніципальних облігацій.

2.5. Висновки до розділу 2

Другий розділ бакалаврської роботи присвячено аналізу перспектив розвитку технології блокчейн, що дозволило визначити ключові тенденції, потенційні сфери застосування, економічний і соціальний вплив, а також прогноз розвитку на найближчі 5–10 років. Проведене дослідження

підкреслює трансформаційний потенціал блокчейну та його значення для глобального і українського контексту.

Аналіз нових тенденцій та інновацій показав, що блокчейн активно розвивається завдяки енергоефективним алгоритмам консенсусу, таким як Proof-of-Stake, міжланцюговій взаємодії та інтеграції з технологіями ШІ та IoT. Рішення для масштабованості, такі як шардинг і Layer 2, а також токенизація активів відкривають нові можливості для економічної інклюзивності та автоматизації [2, 3, 18]. В Україні ці інновації можуть підтримати цифрову економіку та післявоєнну відбудову, зокрема через токенизацію активів і «розумні міста» [16].

Щодо потенційних сфер застосування, блокчейн має перспективи в «розумних містах», цифровій ідентичності, екології, освіті та креативних індустріях. У цих галузях технологія може забезпечити прозорість, безпеку та ефективність, що особливо актуально для України в контексті відновлення інфраструктури та боротьби з корупцією [4, 20]. Наприклад, токенизація муніципальних активів і цифрова ідентичність можуть прискорити економічне відновлення [18].

Вплив блокчейну на економіку та суспільство проявляється у зниженні транзакційних витрат, розвитку нових економічних моделей, таких як DeFi, і підвищенні прозорості в державному управлінні [7, 14]. У той же час, соціальні виклики, такі як цифрова нерівність і етичні дилеми, потребують уваги, особливо в Україні, де обмежена інфраструктура може посилювати розрив між регіонами [19, 22]. Освітні ініціативи та регуляторні реформи будуть ключовими для максимізації позитивного впливу.

Прогноз розвитку на найближчі 5–10 років передбачає, що блокчейн стане основою цифрової інфраструктури завдяки підвищенню масштабованості, міжланцюговій взаємодії та інтеграції з ШІ й IoT [24]. В Україні технологія може відіграти центральну роль у післявоєнній відбудові, залучаючи інвестиції через токенизацію та підтримуючи прозоре управління

[16, 21]. Однак успіх залежатиме від подолання правових, технічних і соціальних бар'єрів.

Блокчейн має значний потенціал для трансформації економіки та суспільства, але його розвиток потребує комплексного підходу, включаючи інновації, регулювання та освіту.

РОЗДІЛ 3.

ВИКЛИКИ ТА СТРАТЕГІЇ ЗАСТОСУВАННЯ БЛОКЧЕЙНУ

3.1. Технічні обмеження та шляхи їх подолання

Технологія блокчейн, попри свій трансформаційний потенціал, стикається з низкою технічних обмежень, які гальмують її масове впровадження. Ці обмеження включають низьку масштабованість, високу енергоємність, проблеми безпеки смарт-контрактів і складність міжланцюгової взаємодії. Подолання цих викликів є критично важливим для реалізації можливостей блокчейну в економіці, управлінні та інших сферах. Цей підрозділ присвячено аналізу основних технічних обмежень блокчейн-систем і стратегій їх вирішення, з урахуванням глобальних і українських перспектив.

Одним із головних технічних обмежень блокчейну є його обмежена пропускна здатність. Наприклад, Bitcoin обробляє лише 7 транзакцій за секунду (TPS), а Ethereum – до 30 TPS, тоді як централізовані системи, такі як Visa, досягають тисяч TPS [24]. Це робить блокчейн менш ефективним для масштабних систем, таких як глобальні платіжні мережі чи управління «розумними містами». Низька масштабованість зумовлена розміром блоків і часом їх генерації, а також необхідністю синхронізації даних між усіма вузлами мережі.

Для вирішення цієї проблеми розробляються рішення другого рівня (Layer 2), такі як Lightning Network для Bitcoin і Optimistic Rollups для Ethereum, які обробляють транзакції поза основним блокчейном, зберігаючи його безпеку [24]. Наприклад, Lightning Network уже дозволяє проводити тисячі TPS у мікроплатежах. Інший підхід – шардинг, який розподіляє блокчейн на менші сегменти (шарди), кожен із яких обробляє частину транзакцій. Ethereum планує завершити впровадження шардингу до 2027 року, що може збільшити його продуктивність до 100 000 TPS [2]. В Україні

ці рішення можуть бути застосовані для масштабування таких систем, як «ProZorro.Продажі», щоб обробляти більший обсяг аукціонів [14].

Енергоємність є ще одним значним обмеженням, особливо для блокчейнів, що використовують алгоритм Proof-of-Work (PoW). Мережа Bitcoin у 2023 році споживала близько 100 терават-годин електроенергії на рік, що порівнянно з енергоспоживанням невеликої країни [11]. Це викликає екологічні занепокоєння та підвищує витрати на підтримку мережі, що обмежує її доступність.

Основним шляхом подолання цього виклику є перехід до енергоефективних алгоритмів консенсусу, таких як Proof-of-Stake (PoS). У 2022 році Ethereum успішно перейшов на PoS, скоротивши енергоспоживання на 99,95% [2]. Інші алгоритми, такі як Delegated Proof-of-Stake (DPoS) і Proof-of-Authority (PoA), також зменшують енергоспоживання, зберігаючи безпеку. Наприклад, блокчейн EOS, який використовує DPoS, споживає в тисячі разів менше енергії, ніж Bitcoin [7]. В Україні, де енергетична інфраструктура зазнала значних пошкоджень через війну, впровадження PoS-блокчейнів може бути пріоритетом для економії ресурсів і підтримки цифрових ініціатив, таких як токенизація активів [18].

Смарт-контракти, які автоматизують процеси в блокчейні, є вразливими до помилок у коді та хакерських атак. У 2022 році через вразливості в смарт-контрактах DeFi-платформ було викрадено активи на суму понад 3 мільярди доларів [10]. Ці інциденти підривають довіру до технології та створюють фінансові ризики для користувачів.

Для підвищення безпеки смарт-контрактів застосовуються формальна верифікація та аудит коду. Формальна верифікація використовує математичні методи для перевірки коректності коду, що знижує ризик помилок. Наприклад, платформа Cardano застосовує формальну верифікацію для своїх смарт-контрактів, що підвищує їхню надійність [3]. Аудит коду спеціалізованими компаніями, такими як Certik, також стає стандартом у галузі. В Україні дослідження М. Машченка та ін. пропонують створювати

національні центри аудиту смарт-контрактів для підтримки місцевих блокчейн-проектів, що може підвищити безпеку та довіру до технології [21]. Крім того, розробка інструментів штучного інтелекту для автоматичного виявлення вразливостей може прискорити цей процес.

Міжланцюгова взаємодія (interoperability) є викликом через ізолюваність різних блокчейн-мереж, таких як Bitcoin, Ethereum чи Polkadot. Відсутність стандартів для обміну даними та активами між мережами обмежує створення єдиної екосистеми, що гальмує розвиток таких сфер, як глобальні фінанси чи «розумні міста» [3].

Для подолання цього бар'єру розробляються протоколи міжланцюгової взаємодії, такі як Polkadot і Cosmos, які дозволяють мережам обмінюватися інформацією через «мости» (bridges). Polkadot, наприклад, уже підтримує понад 100 парачейнів, і до 2030 року такі системи можуть об'єднати тисячі блокчейнів [3]. У глобальному масштабі ініціативи, такі як Interledger Protocol, спрямовані на створення універсальних стандартів для міжланцюгових транзакцій. В Україні міжланцюгова взаємодія може допомогти інтегрувати національні блокчейн-системи, такі як платформи для токенизації активів, із глобальними ринками, що підкреслюють А. Куд у своїх дослідженнях [18]. Однак безпека мостів залишається проблемою, оскільки вони часто стають мішенню для атак.

Інтеграція блокчейну з традиційними інформаційними системами є складним завданням через різницю в архітектурі та стандартах. Наприклад, підприємства, які використовують застарілі бази даних, стикаються з труднощами при впровадженні блокчейну через потребу в модернізації інфраструктури [28]. В Україні ця проблема особливо актуальна для малого та середнього бізнесу, який має обмежені ресурси для цифровізації [22].

Таблиця 3.1.

Технічні обмеження блокчейн-систем і шляхи їх подолання

Технічне обмеження	Суть проблеми	Технологічні рішення	Актуальність для України
Низька масштабованість	Обмежена пропускна здатність мереж: Bitcoin — 7 TPS, Ethereum — до 30 TPS, порівняно з централізованими системами (Visa — 24 000+ TPS).	Layer 2-рішення (Lightning Network, Rollups), шардинг, оптимізація розміру блоків, асинхронна обробка транзакцій.	Необхідна для масштабування «ProZorro.Продажі», систем охорони здоров'я та освіти з великою кількістю щоденних транзакцій.
Висока енергоємність	PoW-блокчейни (особливо Bitcoin) споживають велику кількість електроенергії (до 100 ТВт·год/рік), що екологічно та економічно не вигідно.	Перехід до PoS, DPoS, PoA; оптимізація алгоритмів консенсусу; впровадження «зелених» блокчейн-ініціатив.	Особливо актуально через пошкодження енергетичної інфраструктури під час війни; PoS дозволяє економити ресурси та забезпечити стабільність цифрових платформ.
Вразливість смарт-контрактів	Помилки у коді або хакерські атаки призводять до втрат (у 2022 — понад \$3 млрд). Проблема ускладнюється через відкритість і незмінність контрактів після публікації.	Формальна верифікація, аудит коду (Certik, Quantstamp), автоматизовані інструменти виявлення вразливостей на базі ШІ.	Пропонується створення національних центрів аудиту смарт-контрактів. Потрібен державний контроль для підвищення довіри до українських блокчейн-проектів.
Складність міжланцюгової взаємодії	Блокчейни працюють у ізоляції (Bitcoin ≠ Ethereum ≠ Polkadot), що ускладнює обмін активами, створення єдиних систем.	Polkadot, Cosmos, Interledger, блокчейн-мости; створення стандартів сумісності (IBC, bridge-технології).	Інтеграція українських рішень (токенізація, ідентичність) з глобальними платформами. Потрібна підтримка ініціатив щодо участі у Polkadot, Cosmos, EU blockchain ecosystem.
Складність інтеграції з існуючими системами	Відмінності в архітектурі та стандартах між блокчейном і традиційними IT-системами ускладнюють	Гібридні рішення (Hyperledger Fabric), API-шлюзи, модульні блокчейн-платформи, що адаптуються до ERP, CRM та реєстрових	Потрібні держпрограми підтримки МСБ у цифровізації, сервіси спрощеної інтеграції блокчейну в облік, звітність, закупівлі.

	впровадження в бізнес-процеси та державні сервіси.	систем.	
--	--	---------	--

Для вирішення цього виклику розробляються гібридні рішення, які поєднують блокчейн із традиційними системами. Наприклад, Hyperledger Fabric дозволяє створювати приватні блокчейни, сумісні з корпоративними базами даних, що полегшує інтеграцію [7]. У глобальному масштабі компанії, такі як IBM, пропонують модульні блокчейн-платформи, які адаптуються до існуючих систем. В Україні, де цифрова трансформація є пріоритетом, дослідження І. Дунаєва пропонують створювати державні програми підтримки для інтеграції блокчейну в бізнес-процеси, що може прискорити його впровадження [16].

Технічні обмеження блокчейну, такі як низька масштабованість, висока енергоємність, вразливість смарт-контрактів, складність міжланцюгової взаємодії та інтеграції з існуючими системами, створюють значні бар'єри для його масового впровадження. Проте інновації, такі як Layer 2, шардинг, PoS, формальна верифікація та протоколи міжланцюгової взаємодії, пропонують ефективні рішення [2, 3, 24]. В Україні ці технології можуть підтримати розвиток цифрової економіки та післявоєнну відбудову, зокрема через масштабування таких систем, як «ProZorro.Продажі», і токенизацію активів [14, 18]. Успіх залежить від інвестицій у дослідження, розвитку інфраструктури та підготовки фахівців.

3.2. Правові та регуляторні аспекти використання блокчейну

Технологія блокчейн, попри свій потенціал для трансформації економіки та суспільства, стикається зі значними правовими та регуляторними викликами. Відсутність єдиних міжнародних стандартів, неоднозначність у класифікації цифрових активів, проблеми захисту даних і боротьби з незаконною діяльністю ускладнюють її впровадження. Ці аспекти

є особливо актуальними в Україні, де правова база для блокчейну лише формується. Цей підрозділ присвячено аналізу ключових правових і регуляторних викликів, пов'язаних із використанням блокчейну, та стратегій їх подолання, з урахуванням глобального та українського контексту.

Одним із головних правових викликів є відсутність глобальних стандартів для регулювання блокчейну та цифрових активів. Різні країни застосовують різні підходи: у США криптовалюти класифікуються як цінні папери або товари залежно від контексту, в ЄС регулювання базується на Директиві MiCA (Markets in Crypto-Assets), тоді як у Китаї операції з криптовалютами значною мірою заборонені [3]. Ця фрагментація ускладнює діяльність компаній, які працюють на міжнародних ринках, і створює правову невизначеність для блокчейн-проектів.

Для вирішення цього питання міжнародні організації, такі як Фінансова група з розробки заходів боротьби з відмиванням грошей (FATF), розробляють рекомендації щодо регулювання цифрових активів. Наприклад, FATF вимагає від країн запровадження процедур KYC (Знай свого клієнта) для криптобірж [10]. У перспективі до 2030 року очікується створення глобальних стандартів, подібних до GDPR, для гармонізації регулювання блокчейну. В Україні, де законодавство про криптовалюти перебуває на етапі розробки, гармонізація з міжнародними стандартами може прискорити інтеграцію національних блокчейн-ініціатив у глобальну економіку, як зазначає А. Куд у своїх дослідженнях [18].

Неоднозначність у правовій класифікації цифрових активів, таких як криптовалюти, токени та NFT, створює регуляторні труднощі. У деяких країнах, наприклад у США, токени можуть вважатися цінними паперами, що підпадають під регулювання SEC, тоді як в інших, як у Швейцарії, вони класифікуються як утилітарні активи [7]. Ця невизначеність ускладнює оподаткування, ліцензування та захист прав інвесторів. В Україні, де токенизація активів розглядається як інструмент для залучення інвестицій, відсутність чіткої класифікації стримує розвиток ринку [15].

Для подолання цього виклику необхідне чітке визначення правового статусу цифрових активів. У 2022 році Україна ухвалила Закон «Про віртуальні активи», який визначає криптовалюти як нематеріальні активи, але його імплементація залишається неповною через брак підзаконних актів [19]. Дослідження І. Дунаєва пропонують розробити детальну класифікацію токенів (платіжні, утилітарні, цінні папери) і запровадити гнучкий режим оподаткування, що сприятиме розвитку блокчейн-ринку [20]. На глобальному рівні ЄС уже запровадив MiCA, яка може стати зразком для України.

Блокчейн, особливо публічні мережі, такі як Bitcoin, забезпечує прозорість, але може суперечити вимогам щодо захисту даних, наприклад, GDPR у ЄС. Оскільки транзакції в блокчейні є незмінними та відкритими, видалення персональних даних, як того вимагає «право на забуття», технічно неможливе [5]. Це створює правові ризики для компаній, які використовують блокчейн для обробки персональних даних, наприклад, у системах цифрової ідентичності.

Для вирішення цього питання розробляються приватні та гібридні блокчейни, які дозволяють обмежувати доступ до даних. Наприклад, Hyperledger Fabric підтримує приватні канали, де дані доступні лише авторизованим учасникам [7]. Крім того, технології, такі як zero-knowledge proofs, дозволяють підтверджувати транзакції без розкриття деталей, що відповідає вимогам GDPR. В Україні, де система «Дія» активно розвивається, дослідження М. Машченка та ін. пропонують інтегрувати такі технології для забезпечення конфіденційності в системах цифрової ідентичності [21]. Це може підвищити довіру громадян до державних блокчейн-ініціатив.

Анонімність у деяких блокчейн-мережах, таких як Monero чи ранні версії Bitcoin, створює ризики використання технології для відмивання грошей, фінансування тероризму чи інших незаконних операцій. У 2023 році близько 2% криптовалютних транзакцій були пов'язані з незаконною діяльністю, що підриває довіру до технології [11]. Регулятори вимагають

посилення процедур AML (Протидія відмиванню грошей) і KYC, але це може суперечити принципу децентралізації.

Для подолання цього виклику країни запроваджують обов'язкову реєстрацію криптобірж і моніторинг транзакцій. Наприклад, у США біржі, такі як Coinbase, зобов'язані надавати дані про транзакції до IRS [10]. В Україні Закон «Про віртуальні активи» передбачає ліцензування постачальників криптовалютних послуг, але його ефективність залежить від створення відповідної інфраструктури [19]. Дослідження А. Кудяков пропонують використовувати аналітичні інструменти на базі ШІ для моніторингу транзакцій у реальному часі, що може збалансувати безпеку та децентралізацію [18].

Смарт-контракти, які автоматизують виконання угод, не мають чіткого правового статусу в більшості юрисдикцій. Питання відповідальності за помилки в коді, скасування угод чи виконання контрактів у спірних ситуаціях залишаються невирішеними. Наприклад, у 2016 році через вразливість у смарт-контракті проєкту DAO було викрадено активи на 50 мільйонів доларів, що викликало правові суперечки [3].

Для вирішення цього питання необхідне визнання смарт-контрактів як юридично зобов'язуючих документів. У Сінгапурі та Швейцарії вже створено правові рамки, які визнають смарт-контракти за певних умов [7]. В Україні дослідження І. Дунаєва пропонують розробити стандарти для смарт-контрактів, включаючи обов'язковий аудит коду, щоб забезпечити їхню юридичну силу [16]. Це може підтримати використання смарт-контрактів у державному секторі, наприклад, у системі «ProZorro.Продажі» [14].

Правові та регуляторні аспекти використання блокчейну, такі як відсутність єдиних стандартів, неоднозначність класифікації активів, захист даних, боротьба з незаконною діяльністю та регулювання смарт-контрактів, створюють значні виклики для його впровадження. Стратегії подолання включають гармонізацію з міжнародними стандартами, розробку чіткої правової бази, використання технологій для захисту конфіденційності та

посилення моніторингу [5, 10]. В Україні ці заходи можуть прискорити розвиток цифрової економіки та підтримати післявоєнну відбудову, зокрема через токенизацію активів і прозоре управління [18, 19]. Успіх залежить від співпраці між урядом, бізнесом і міжнародними організаціями.

3.3. Етичні та соціальні виклики впровадження технології

Технологія блокчейн, попри свій потенціал для підвищення прозорості, безпеки та ефективності, породжує низку етичних і соціальних викликів. Ці виклики стосуються цифрової нерівності, конфіденційності даних, можливого сприяння незаконній діяльності, а також впливу на ринок праці та суспільну довіру. Особливо актуальними ці питання є для України, де блокчейн розглядається як інструмент для післявоєнної відбудови та цифровізації. Цей підрозділ присвячено аналізу етичних і соціальних викликів впровадження блокчейну та пропозиціям щодо їх вирішення.

Цифрова нерівність і доступність. Одним із ключових соціальних викликів є цифрова нерівність, яка може посилюватися через впровадження блокчейну. Використання технології вимагає доступу до стабільного інтернету, сучасних пристроїв і технічних знань, що недоступно для багатьох, особливо в країнах, що розвиваються, або в сільських регіонах. У 2024 році лише 15% населення країн із низьким рівнем доходу використовували блокчейн-сервіси через брак інфраструктури [10]. В Україні, де цифровізація в сільській місцевості відстає, це може створити розрив між міськими та сільськими громадами, обмежуючи доступ до таких сервісів, як DeFi чи цифрова ідентичність [22].

Для вирішення цього виклику необхідні державні програми з розвитку цифрової інфраструктури та освіти. Дослідження М. Машченка та ін. пропонують створювати освітні ініціативи для підвищення цифрової грамотності, зокрема в регіонах, постраждалих від війни [21]. Наприклад, програми навчання блокчейн-технологіям для молоді та підприємців можуть

сприяти інклюзивності. На глобальному рівні ініціативи, такі як проекти Всесвітнього банку, спрямовані на розширення доступу до інтернету, можуть підтримати ці зусилля. В Україні подібні програми можуть бути частиною стратегії післявоєнної відбудови, щоб забезпечити рівний доступ до технологій.

Прозорість публічних блокчейнів, таких як Bitcoin, забезпечує довіру, але створює етичні проблеми, пов'язані з конфіденційністю. Усі транзакції в таких мережах є відкритими, що може призвести до розкриття персональних даних, якщо гаманці пов'язані з реальними особами [5]. Це суперечить принципам захисту даних, таким як GDPR, і викликає занепокоєння щодо приватності. Наприклад, аналіз транзакцій у блокчейні може дозволити відстежити фінансову активність особи без її згоди, що порушує етичні норми.

Для вирішення цього питання розробляються технології, які поєднують прозорість із захистом даних. Zero-knowledge proofs, які використовуються в блокчейні Zcash, дозволяють підтверджувати транзакції без розкриття деталей [3]. У приватних блокчейнах, таких як Hyperledger Fabric, доступ до даних обмежується авторизованими учасниками, що відповідає вимогам конфіденційності [7]. В Україні, де система «Дія» обробляє чутливі дані, дослідження І. Дунаєва пропонують інтегрувати подібні технології для забезпечення балансу між прозорістю та приватністю [20]. Етичний підхід також передбачає інформування користувачів про те, як їхні дані використовуються в блокчейн-системах.

Анонімність у деяких блокчейн-мережах може бути використана для незаконної діяльності, такої як відмивання грошей, торгівля наркотиками чи фінансування тероризму. У ранні роки Bitcoin асоціювався з ринками даркнету, такими як Silk Road, і, хоча в 2023 році лише 2% криптовалютних транзакцій були пов'язані з незаконною діяльністю, цей стереотип зберігається [11]. Це викликає етичні занепокоєння щодо відповідальності розробників і операторів блокчейн-платформ за запобігання зловживанням.

Для вирішення цього виклику необхідне поєднання регуляторних і технологічних заходів. Впровадження процедур KYC і AML на криптобіржах, як це вимагає FATF, знижує анонімність для незаконних операцій [10]. В Україні Закон «Про віртуальні активи» передбачає моніторинг транзакцій, але його ефективність залежить від технічної реалізації [19]. Дослідження А. Кудя пропонують використовувати аналітику на базі ШІ для виявлення підозрілих транзакцій, що може зменшити ризики без порушення принципів децентралізації [18]. Етично важливо забезпечити, щоб такі заходи не обмежували права добросовісних користувачів.

Впровадження блокчейну може призвести до автоматизації багатьох процесів, що вплине на ринок праці. Смарт-контракти та децентралізовані платформи, такі як DeFi, усувають потребу в посередниках, таких як банківські клерки чи нотаріуси, що може спричинити скорочення робочих місць у традиційних секторах [3]. Водночас блокчейн створює попит на нові професії, такі як розробники смарт-контрактів і аналітики даних. У 2024 році глобальний ринок блокчейн-послуг створив понад 2 мільйони робочих місць, але ці можливості зосереджені в розвинених країнах [10].

В Україні, де IT-сектор є важливим драйвером економіки, блокчейн може стимулювати створення робочих місць, але вимагає підготовки фахівців. Дослідження М. Машченка та ін. підкреслюють необхідність освітніх програм для навчання молоді блокчейн-технологіям, щоб уникнути безробіття в традиційних секторах [21]. Етичний підхід передбачає підтримку працівників, які втрачають роботу через автоматизацію, через перекваліфікацію та соціальні програми. Наприклад, державні ініціативи можуть фінансувати курси з розробки блокчейн-додатків для переселенців і ветеранів.

Блокчейн часто асоціюється з криптовалютними спекуляціями та шахрайськими схемами, такими як піраміди в DeFi чи NFT-проектах, що підриває довіру суспільства. У 2022 році через шахрайство в криптопроектах було втрачено понад 3 мільярди доларів, що посилює негативне сприйняття

технології [10]. В Україні низька обізнаність про блокчейн, особливо серед старшого покоління, ускладнює його впровадження в державні та соціальні ініціативи [22].

Для підвищення довіри необхідні просвітницькі кампанії та прозоре впровадження технології. Дослідження І. Дунаєва пропонують створювати публічні кампанії для пояснення переваг блокчейну, наприклад, у державному управлінні чи «розумних містах» [16]. Успішні приклади, такі як «ProZorro.Продажі», можуть слугувати моделлю для демонстрації етичного використання технології [14]. На глобальному рівні компанії, такі як IBM, публікують звіти про етичне використання блокчейну, що може бути прикладом для України.

Етичні та соціальні виклики впровадження блокчейну, такі як цифрова нерівність, проблеми конфіденційності, сприяння незаконній діяльності, вплив на ринок праці та низька суспільна довіра, створюють значні перешкоди для його масового використання. Стратегії вирішення включають розвиток цифрової інфраструктури, використання технологій для захисту даних, посилення регулювання, освітні програми та просвітницькі кампанії [10, 21]. В Україні ці заходи можуть підтримати післявоєнну відбудову, підвищуючи прозорість і інклюзивність [16, 18]. Успіх залежить від співпраці між урядом, бізнесом і суспільством для забезпечення етичного використання технології.

3.4. Стратегії інтеграції блокчейну в різні галузі

Технологія блокчейн має потенціал для трансформації численних галузей завдяки своїм характеристикам децентралізації, прозорості та безпеки. Однак її успішне впровадження вимагає продуманих стратегій, які враховують технічні, правові, етичні та соціальні аспекти. Цей підрозділ присвячено аналізу стратегій інтеграції блокчейну в ключові галузі, такі як

фінанси, логістика, охорона здоров'я, державне управління та креативні індустрії, з акцентом на глобальні підходи та перспективи для України.

У фінансовому секторі блокчейн уже застосовується для криптовалют, DeFi і міжнародних платежів, але його ширша інтеграція потребує стратегічного підходу. Однією з ключових стратегій є створення гібридних систем, які поєднують блокчейн із традиційними фінансовими платформами. Наприклад, банки, такі як JPMorgan, використовують приватний блокчейн Quorum для обробки міжбанківських транзакцій, зберігаючи сумісність із існуючими системами [7]. Цей підхід дозволяє поступово впроваджувати технологію, мінімізуючи ризики.

Інша стратегія – розвиток цифрових валют центральних банків (CBDC), які використовують блокчейн для забезпечення прозорості та безпеки. Китайський цифровий юань, запущений у 2022 році, є прикладом такої ініціативи [10]. В Україні Національний банк досліджує можливість створення цифрової гривні, що може прискорити фінансову інклюзію, особливо для переселенців [18]. Для успіху необхідно запровадити чіткі регуляторні рамки, як пропонує А. Куд, включаючи стандарти KYC і AML для блокчейн-транзакцій [18]. Крім того, освіта для фінансових установ і клієнтів щодо переваг блокчейну допоможе подолати недовіру.

У логістиці блокчейн підвищує прозорість і відстежуваність, але його інтеграція вимагає стандартизації та співпраці між учасниками. Стратегія полягає у створенні консорціумних блокчейнів, де компанії спільно використовують платформу для обміну даними. Проєкт TradeLens, розроблений Maersk та IBM, об'єднує порти, перевізників і митні служби на базі Hyperledger, скорочуючи час обробки документів із тижнів до годин [28]. У 2023 році TradeLens обробляв 30% глобальних контейнерних перевезень.

В Україні, де логістика зазнала значних втрат через війну, блокчейн може підтримати відновлення ланцюгів поставок. Дослідження М. Машченка та ін. пропонують створювати національні платформи на базі блокчейну для відстеження гуманітарної допомоги та сільськогосподарської продукції [21].

Для цього необхідно розробити стандарти даних і провести пілотні проєкти за участю уряду та бізнесу. Інтеграція з IoT, як у проєкті IOTA, може автоматизувати відстеження, але вимагає інвестицій у цифрову інфраструктуру [4].

У сфері охорони здоров'я блокчейн може забезпечити безпечне зберігання медичних даних і відстеження ліків, але його впровадження ускладнене регуляторними та етичними вимогами. Стратегія передбачає використання приватних блокчейнів для захисту конфіденційних даних. Наприклад, платформа MedRec, розроблена MIT, дозволяє пацієнтам контролювати доступ до їхніх медичних карт через блокчейн [4]. Це відповідає вимогам GDPR і підвищує довіру.

В Україні блокчейн може застосовуватися для боротьби з фальсифікацією ліків і управління закупівлями медичних товарів. Дослідження Центру досліджень блокчейн-рішень пропонують пілотні проєкти для відстеження ліків від виробника до аптеки, що знизить корупційні ризики [21]. Для цього необхідно гармонізувати законодавство з міжнародними стандартами, такими як GDPR, і провести навчання для медичних працівників. Співпраця з міжнародними організаціями, такими як ВООЗ, може прискорити впровадження.

У державному управлінні блокчейн підвищує прозорість і знижує корупцію, але потребує політичної волі та інфраструктури. Стратегія полягає у поступовій інтеграції через пілотні проєкти, які демонструють ефективність. Наприклад, Естонія використовує блокчейн для електронного голосування та земельних реєстрів, що підвищило довіру громадян [25]. В Україні система «ProZorro.Продажі» уже застосовує блокчейн для аукціонів, і її успіх може бути масштабованим на інші сфери, такі як розподіл гуманітарної допомоги [14].

Дослідження І. Дунаєва пропонують створювати платформи «уряд як платформа» на базі блокчейну для післявоєнної відбудови, що забезпечить прозоре управління ресурсами [16]. Для цього необхідно розробити правову

базу, яка визнає смарт-контракти юридично зобов'язуючими, і провести просвітницькі кампанії для громадян. Міжнародна підтримка, наприклад, від ЄС, може забезпечити фінансування та експертизу для таких ініціатив.

У креативних індустріях блокчейн підтримує токенизацію контенту та захист авторських прав, але його впровадження стримується конкуренцією з традиційними платформами. Стратегія передбачає створення децентралізованих платформ, які дозволяють митцям монетизувати контент напряму. Наприклад, платформа Audius використовує блокчейн для виплат музикантам без посередників, залучаючи понад 7 мільйонів користувачів у 2023 році [3].

В Україні, де креативні індустрії мають значний потенціал, блокчейн може підтримати митців через NFT і токенизацію. Дослідження І. Дунаєва пропонують створювати національні платформи для просування українського контенту на глобальних ринках [23]. Для цього необхідно запровадити правові рамки для NFT, провести освітні програми для митців і підтримати стартапи в цій сфері. Співпраця з міжнародними платформами, такими як OpenSea, може підвищити конкурентоспроможність.

Незалежно від галузі, успішна інтеграція блокчейну вимагає кількох універсальних стратегій. По-перше, співпраця між урядом, бізнесом і академічними установами є ключовою. Наприклад, Центр досліджень блокчейн-рішень в Україні може координувати пілотні проєкти та дослідження [21]. По-друге, освіта та підвищення цифрової грамотності допоможуть подолати недовіру та брак фахівців. По-третє, пілотні проєкти дозволяють тестувати технологію в контрольованих умовах, як це було з «ProZorro.Продажі» [14]. Нарешті, гармонізація законодавства з міжнародними стандартами, такими як MiCA, забезпечить правову стабільність [19].

Таблиця 3.2.

Стратегії інтеграції блокчейну в основні галузі економіки та управління

Галузь	Основні стратегії інтеграції	Приклади світової практики	Перспективи для України
Фінанси	Гібридні системи (поєднання блокчейну з існуючими платформами); впровадження CBDC; освітні програми для банків і клієнтів; стандартизація KYC/AML.	JPMorgan (Quorum); цифровий юань; CBDC у ЄС і Нігерії.	Цифрова гривня; впровадження токенизованих облігацій; платформи для мікроінвестування в нерухомість.
Логістика	Консорціумні блокчейни; стандартизація даних між суб'єктами; пілотні проекти з відстеження; інтеграція з IoT; державно-приватне партнерство.	TradeLens (Maersk+IBM), VeChain, IOTA (інтернет речей).	Платформи для обліку гуманітарної допомоги, зернових та паливних поставок; автоматизація логістики з GPS/IoT-модулями.
Охорона здоров'я	Приватні блокчейни для захисту даних; інтеграція з медичними базами; аудит та сертифікація систем з дотриманням міжнародних стандартів (GDPR, ISO).	MedRec (MIT), Estonia eHealth, PharmaLedger (відстеження ліків).	Відстеження постачання ліків та вакцин; прозорі закупівлі медичних товарів; захист медичних даних пацієнтів у публічному секторі.
Державне управління	Пілотні проекти на рівні муніципалітетів; платформи «уряд як платформа»; блокчейн-реєстри; правове визнання смарт-контрактів; міжнародне фінансування цифрових ініціатив.	Естонія (е-голосування, земельні реєстри), Грузія (кадастр), ProZorro.Продажі (Україна).	Масштабування ProZorro; створення DAO для громад; впровадження блокчейн-платформ в управлінні відбудовою інфраструктури.
Креативні індустрії	Підтримка NFT та децентралізованих платформ для розміщення контенту; правове регулювання цифрових прав; грантові програми та маркетплейси для митців.	Audius (музика), OpenSea (NFT), Lens Protocol (соціальні мережі).	Розвиток національної NFT-платформи для митців; підтримка цифрових творчих стартапів; захист авторських прав у цифровому просторі.
Універсальні стратегії	Публічно-приватне партнерство; пілотні проекти в контрольованому середовищі; створення Центру компетенцій з блокчейну; освітні та адвокаційні програми; гармонізація з європейськими нормами (MiCA, GDPR).	Центри блокчейн-досліджень у Швейцарії, Сінгапурі, ЄС; Sandbox-підходи у Великій Британії та США.	Центр досліджень блокчейн-рішень; навчання держслужбовців і бізнесу; узгодження законодавства з європейським; підтримка від Світового банку, USAID, Horizon Europe.

Стратегії інтеграції блокчейну в різні галузі включають створення гібридних систем, консорціумних блокчейнів, пілотних проєктів, розвиток правової бази та підвищення цифрової грамотності. У фінансах, логістиці, охороні здоров'я, державному управлінні та креативних індустріях ці підходи можуть максимізувати переваги технології [7, 28]. В Україні блокчейн має особливе значення для післявоєнної відбудови, підтримки прозорості та розвитку цифрової економіки [16, 18]. Успіх залежить від співпраці всіх зацікавлених сторін, інвестицій у інфраструктуру та гармонізації регуляторного середовища.

3.5. Висновки до розділу 3

Третій розділ бакалаврської роботи присвячено аналізу викликів, пов'язаних із впровадженням технології блокчейн, та стратегій їх подолання. Дослідження охопило технічні, правові, етичні, соціальні аспекти, а також підходи до інтеграції блокчейну в різні галузі. Проведений аналіз дозволяє сформулювати ключові висновки щодо бар'єрів і шляхів їх вирішення, з особливим акцентом на перспективи для України.

Технічні обмеження, такі як низька масштабованість, висока енергоємність, вразливість смарт-контрактів, складність міжланцюгової взаємодії та інтеграції з існуючими системами, є значними перешкодами для масового впровадження блокчейну. Рішення, такі як Layer 2, шардинг, Proof-of-Stake, формальна верифікація та протоколи міжланцюгової взаємодії, демонструють потенціал для подолання цих проблем [2, 3, 24]. В Україні ці інновації можуть підтримати масштабування таких проєктів, як «ProZorro.Продажі», і розвиток цифрової економіки через токенизацію активів [14, 18].

Правові та регуляторні виклики, включаючи відсутність єдиних стандартів, неоднозначність класифікації цифрових активів, захист даних, боротьбу з незаконною діяльністю та регулювання смарт-контрактів,

створюють невизначеність для блокчейн-ініціатив. Стратегії вирішення передбачають гармонізацію з міжнародними стандартами, такими як MiCA, розробку чіткої правової бази та використання технологій для захисту конфіденційності [5, 10]. В Україні Закон «Про віртуальні активи» і пропозиції щодо стандартизації смарт-контрактів можуть прискорити розвиток технології, особливо для післявоєнної відбудови [19, 20].

Етичні та соціальні виклики, такі як цифрова нерівність, проблеми конфіденційності, сприяння незаконній діяльності, вплив на ринок праці та низька суспільна довіра, ускладнюють впровадження блокчейну. Для їх подолання необхідні освітні програми, просвітницькі кампанії, технології захисту даних і підтримка перекваліфікації працівників [10, 21]. В Україні ці заходи можуть сприяти інклюзивності та підвищенню довіри до технології, особливо в контексті таких проєктів, як «розумні міста» та цифрова ідентичність [16, 22].

Стратегії інтеграції блокчейну в різні галузі, включаючи фінанси, логістику, охорону здоров'я, державне управління та креативні індустрії, передбачають створення гібридних систем, консорціумних блокчейнів, пілотних проєктів і співпрацю між урядом, бізнесом і академічними установами. В Україні ці підходи можуть максимізувати переваги технології для прозорого управління, залучення інвестицій і розвитку креативного сектору [7, 23, 28]. Успішні приклади, такі як «ProZorro.Продажі», демонструють потенціал для масштабування [14].

Впровадження блокчейну стикається з комплексними викликами, але цілеспрямовані стратегії, що поєднують технологічні інновації, регуляторні реформи, освіту та співпрацю, можуть забезпечити його успішну інтеграцію. В Україні блокчейн має унікальні перспективи для післявоєнної відбудови, підвищення прозорості та розвитку цифрової економіки, якщо будуть створені сприятливі умови для його використання [16, 18].

ВИСНОВКИ

Бакалаврська робота, присвячена перспективам розвитку та застосування технології блокчейн у майбутньому, дозволила комплексно проаналізувати сучасний стан технології, її потенціал і виклики, пов'язані з впровадженням. Проведене дослідження підкреслило трансформаційну роль блокчейну в економіці, суспільстві та державному управлінні, а також його особливе значення для України в контексті післявоєнної відбудови.

Аналіз сучасного стану показав, що блокчейн еволюціонував від концепції криптографічного захисту даних до універсального інструменту, який застосовується у фінансах, логістиці, охороні здоров'я та державному секторі. Його принципи децентралізації, прозорості й безпеки забезпечують переваги, такі як зниження витрат і підвищення довіри, але супроводжуються недоліками, зокрема низькою масштабованістю та високою енергоємністю. В Україні успішне використання блокчейну в проєктах, таких як «ProZorro.Продажі», демонструє його потенціал для боротьби з корупцією та підвищення ефективності.

Перспективи розвитку блокчейну пов'язані з інноваціями, які вирішують технічні обмеження та розширюють сфери застосування. Енергоефективні алгоритми, міжланцюгова взаємодія, інтеграція зі штучним інтелектом і IoT, а також токенизація активів формують майбутнє технології. У найближчі 5–10 років блокчейн може стати основою цифрової інфраструктури, подібно до Інтернету, підтримуючи «розумні міста», цифрову ідентичність і екологічні ініціативи. Для України ці тенденції відкривають можливості для залучення інвестицій і модернізації економіки, особливо через токенизацію та децентралізоване управління.

Впровадження блокчейну супроводжується технічними, правовими, етичними та соціальними викликами. Низька пропускна здатність і вразливість смарт-контрактів вимагають технологічних рішень, таких як шардинг і формальна верифікація. Правова невизначеність і відсутність

стандартів потребують гармонізації законодавства з міжнародними нормами. Цифрова нерівність, проблеми конфіденційності та ризик незаконної діяльності підкреслюють необхідність освіти, просвітницьких кампаній і посилення регулювання. В Україні ці виклики ускладнені обмеженою інфраструктурою, але можуть бути вирішені через співпрацю уряду, бізнесу та міжнародних партнерів.

Стратегії інтеграції блокчейну передбачають створення гібридних систем, пілотних проєктів і консорціумних платформ, які адаптують технологію до потреб різних галузей. У фінансах і логістиці блокчейн оптимізує процеси, в охороні здоров'я захищає дані, у державному управлінні знижує корупцію, а в креативних індустріях підтримує монетизацію контенту. Для України ці стратегії мають особливе значення для відновлення економіки, залучення мікроінвестицій і розвитку «розумних міст».

Блокчейн є потужною технологією, здатною трансформувати економічні та соціальні системи, але його успіх залежить від подолання наявних бар'єрів. В Україні технологія може стати каталізатором цифровізації та післявоєнної відбудови, якщо будуть забезпечені інвестиції в інфраструктуру, правові реформи та освіта. Результати роботи можуть бути використані для розробки стратегій впровадження блокчейну в різних секторах, сприяючи прозорості, ефективності та сталому розвитку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Tripathi G., Bhatia S., та ін. A comprehensive review of blockchain technology: Underlying principles and historical background with future challenges // Decision Analytics Journal. 2023. 9(Suppl C).
2. Zheng Z., Xie S., Dai H., Chen X., Wang H. An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future trends // 2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress).
3. Tapscott D., Tapscott A. Blockchain Revolution: How the Technology Behind Bitcoin Is Changing Money, Business, and the World / D. Tapscott, A. Tapscott. New York : Portfolio/Penguin, 2016.
4. Casey M. J., Vigna P. The Truth Machine: The Blockchain and the Future of Everything / M. J. Casey, P. Vigna. New York : St. Martin's Press, 2018.
5. Drescher D. Blockchain Basics: A Non-Technical Introduction in 25 Steps / D. Drescher. Berkeley, CA : Apress, 2017.
6. Bashir I. Mastering Blockchain: Distributed Ledger Technology, Decentralization, and Smart Contracts Explained / I. Bashir. Birmingham, UK : Packt Publishing, 2017.
7. Kress J. Blockchain for Business: How It Works and Why It Matters / J. Kress. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2019.
8. Laurence T. Blockchain for Business: A Practical Guide to Understanding and Implementing Blockchain Technology / T. Laurence. Upper Saddle River, NJ : FT Press, 2015.
9. Williams J. K. Understanding Blockchain: A Layman's Guide to Bitcoin, Blockchain, and Cryptocurrencies / J. K. Williams. Independently published, 2018.
10. Shukla S. K., Shukla R. K. Blockchain Technology: Principles and Applications / S. K. Shukla, R. K. Shukla. Boca Raton, FL : CRC Press, 2019.

11. Antonopoulos A. M. Decentralized Applications: Harnessing Bitcoin's Blockchain Technology / A. M. Antonopoulos. Sebastopol, CA : O'Reilly Media, 2017.
12. Antonopoulos A. M. The Internet of Money, Vol. 1: A Collection of Talks on Bitcoin / A. M. Antonopoulos. San Francisco, CA : Merkle Bloom, 2016.
13. Champagne P. The Book of Satoshi: The Collected Writings of Bitcoin Creator Satoshi Nakamoto / P. Champagne. Charleston, SC : CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014.
14. Kud A. Understanding the Future Market Infrastructure Development Through the Use of Tokenized Assets / A. Kud. Kyiv : Research Center of Blockchain Solutions, 2023.
15. Kud A. Legal and Technological Conditions for Legal Circulation of Tokenized Assets in Modern Private and State-Owned Public Information Platforms / A. Kud. Kyiv : Research Center of Blockchain Solutions, 2023.
16. Dunayev I., Gavkalova N., Kud A. Designing a platform-based model of civic participation within the smart-city concept for post-war Ukrainian cities / I. Dunayev, N. Gavkalova, A. Kud. Kyiv : Research Center of Blockchain Solutions, 2023.
17. Dunayev I., Kovalenko M. Нові траєкторії регулювання інформаційних платформ і платформної економіки заради суспільного блага / I. Dunayev, M. Kovalenko. Kyiv : Research Center of Blockchain Solutions, 2023.
18. Kud A. Глобальна проблема наростання економічної нерівності та токенизація активів як перспектива її вирішення / A. Kud. Kyiv : Research Center of Blockchain Solutions, 2023.
19. Dunayev I., Byelova L., Kud A., Rodchenko V. Implementing the “government as a platform” concept: the assessment method and an optimal human-centered structure to address technological challenges / I. Dunayev, L. Byelova, A. Kud, V. Rodchenko. Kyiv : Research Center of Blockchain Solutions, 2023.

20. Dunayev I. Прозорість штучного інтелекту в публічному управлінні: необхідна умова і досвід правового закріплення / I. Dunayev. Kyiv : Research Center of Blockchain Solutions, 2023.
21. Mashchenko M., Klimenko O., Lisna I., Cherkashyna T., Kud A. Модернізація електронної комерції за допомогою цифрових активів в умовах інформаційної економіки / M. Mashchenko, O. Klimenko, I. Lisna, T. Cherkashyna, A. Kud. Kyiv : Research Center of Blockchain Solutions, 2023.
22. Kud A. Transformation of economic relations and ways of their implementation under development of digital technologies / A. Kud. Kyiv : Research Center of Blockchain Solutions, 2022.
23. Dunayev I. Explication of the role of digital technologies in marketing management of a modern company / I. Dunayev. Kyiv : Research Center of Blockchain Solutions, 2022.
24. Yli-Huomo J., Ko D., Choi S., Park S., Smolander K. Where is current research on blockchain technology? — A systematic review // PloS one. 2016.
25. Swan M. Blockchain: Blueprint for a New Economy / M. Swan. Sebastopol, CA : O'Reilly Media, 2015.
26. Narayanan A., Bonneau J., Felten E., Miller A., Goldfeder S. Bitcoin and Cryptocurrency Technologies: A Comprehensive Introduction / A. Narayanan, J. Bonneau, E. Felten, A. Miller, S. Goldfeder. Princeton, NJ : Princeton University Press, 2016.
27. Crosby M., Pattanayak P., Verma S., Kalyanaraman V. Blockchain technology: Beyond bitcoin // Applied Innovation. 2016.
28. Saberi S., Kouhizadeh M., Sarkis J., Shen L. Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management // International Journal of Production Research. 2019.
29. Min H. Blockchain technology for enhancing supply chain resilience // Business Horizons. 2019.