

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ФАХОВИЙ БІЗНЕС-КОЛЕДЖ
Циклова комісія (кафедра) комп'ютерної інженерії та інформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему
**ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ
ДАНИХ У РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ**

Виконав: студент групи 1П-21

Спеціальності 121 Інженерія

програмного забезпечення

Анна УСТИМЕНКО

Керівник:

Майя ЛЮТА

Черкаси 2025

АНОТАЦІЯ

У даній кваліфікаційній роботі проведено всебічне дослідження блокчейн-технологій як інноваційного інструменту для підвищення достовірності та безпеки даних у різних сферах діяльності. Теоретична частина роботи присвячена аналізу архітектури блокчейн-систем, що базується на послідовному об'єднанні блоків даних, застосуванню криптографічних алгоритмів та цифрових підписів для забезпечення незмінності інформації. Особливу увагу приділено вивченню алгоритмів консенсусу, таких як Proof of Work, Proof of Stake та їх модифікацій, які забезпечують узгодження даних у розподілених мережах. У роботі також розглянуто питання масштабованості, продуктивності та енергоспоживання блокчейн-систем, що є важливими для їх ефективного використання в практичних задачах.

Практична частина роботи включає аналіз та опис основних сценаріїв застосування блокчейн-технологій у фінансовому секторі, охороні здоров'я, логістиці, державному управлінні, освіті, енергетиці та інших галузях. Особливу увагу приділено можливостям інтеграції блокчейн із сучасними інформаційними технологіями, зокрема Інтернетом речей, штучним інтелектом, хмарними та периферійними обчисленнями, що розширює функціональні можливості систем і підвищує рівень довіри до оброблюваних даних.

Для підтвердження теоретичних положень у роботі проведено моделювання роботи блокчейн-систем у спеціалізованих програмних середовищах, що дозволило оцінити ефективність запропонованих підходів та визначити напрямки подальшого вдосконалення. Отримані результати мають практичну цінність і можуть бути використані при розробці інформаційних систем, орієнтованих на забезпечення підвищеної надійності, безпеки та прозорості обробки даних у різних сферах діяльності.

Ключові слова: БЛОКЧЕЙН, ТЕХНОЛОГІЇ РОЗПОДІЛЕНИХ РЕЄСТРІВ, НАДІЙНІСТЬ ДАНИХ, КРИПТОГРАФІЧНИЙ ЗАХИСТ, МАСШТАБОВАНІСТЬ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, КОНСЕНСУСНІ АЛГОРИТМИ.

This qualification work presents a comprehensive study of blockchain technologies as an innovative tool for enhancing data reliability and security across various fields of activity. The theoretical part is dedicated to analyzing the architecture of blockchain systems based on the sequential linking of data blocks, the use of cryptographic algorithms, and digital signatures to ensure data immutability. Special attention is given to the study of consensus algorithms such as Proof of Work, Proof of Stake, and their modifications, which provide data agreement in distributed networks. The work also addresses issues of scalability, performance, and energy consumption of blockchain systems, which are critical for their effective application in practical tasks.

The practical part includes an analysis and description of key scenarios for the application of blockchain technologies in the financial sector, healthcare, logistics, public administration, education, energy, and other industries. Particular emphasis is placed on the integration of blockchain with modern information technologies, including the Internet of Things, artificial intelligence, cloud and edge computing, which expands system functionalities and increases trust in processed data.

To validate the theoretical concepts, modeling of blockchain systems was conducted in specialized software environments, allowing assessment of the effectiveness of proposed approaches and identification of directions for further improvement. The obtained results have practical value and can be utilized in the development of information systems aimed at ensuring increased reliability, security, and transparency of data processing across various domains.

Keywords: BLOCKCHAIN, DISTRIBUTED LEDGER TECHNOLOGIES, DATA RELIABILITY, CRYPTOGRAPHIC PROTECTION, SCALABILITY, ENERGY EFFICIENCY, CONSENSUS ALGORITHMS.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

| | |
|-------------------|---|
| ZK | Zero-Knowledge, нульові докази знання |
| zk-rollups | Zero-Knowledge Rollups, згортування з нульовим розкриттям даних |
| zkSync | Zero-Knowledge Synchronization, синхронізація з використанням нульових доказів |
| SSE | Server-Sent Events, події, надіслані сервером |
| PoW | Proof of Work, доказ виконаної роботи |
| PoS | Proof of Stake, доказ частки володіння |
| Layer 2 | Layer Two, технологія другого рівня масштабування |
| JWT | JSON Web Token, веб-токен у форматі JSON |
| ER | Entity-Relationship, модель «сутність–зв’язок» |
| DePIN | Decentralized Physical Infrastructure Networks, децентралізовані фізичні інфраструктурні мережі |
| DeFi | Decentralized Finance, децентралізовані фінанси |
| dApps | Decentralized Applications, децентралізовані застосунки |
| CBDC | Central Bank Digital Currency, цифрова валюта центрального банку |

ВСТУП

Актуальність обраної теми. У нинішньому цифровому просторі значна частина людської діяльності супроводжується опрацюванням та збереженням великих обсягів інформації. При цьому одним із найважливіших викликів залишається забезпечення достовірності, цілісності та прозорості цієї інформації. В умовах швидкої цифровізації та збільшення кількості кіберзагроз традиційні способи зберігання та перевірки даних часто виявляються недостатньо надійними. У цьому контексті технологія блокчейн привертає все більше уваги як інноваційний засіб, що забезпечує високий рівень довіри до збереженої інформації завдяки її децентралізованій природі, незмінності записів і прозорості транзакцій. Використання блокчейн-технологій дозволяє гарантувати правдивість даних без потреби у посередниках, що відкриває нові можливості для підвищення ефективності та безпеки в різних сферах – від фінансів і медицини до логістики та державного управління.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є інформаційні системи та технології зберігання відомостей, що використовуються в різних сферах, з наголосом на потребу в забезпеченні їхньої достовірності.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є способи й технології впровадження блокчейн-рішень для забезпечення цілісності та правдивості даних у таких галузях, як охорона здоров'я, фінанси, логістика, освіта та державне управління.

Мета дослідження. Метою проєкту є дослідження можливостей впровадження блокчейн-технологій задля забезпечення правдивості даних у різних галузях та розробка прототипу системи, що демонструє застосування блокчейну для збереження й перевірки надзвичайно важливої інформації. Особлива увага приділятиметься аналізу переваг і обмежень блокчейн-рішень, а також їхньому впливу на безпеку та прозорість інформаційних процесів.

У межах кваліфікаційної роботи обрано до розгляду та реалізації такі завдання:

ослідити принципи функціонування блокчейн-технології та її переваги для забезпечення достовірності даних;

проаналізувати приклади використання блокчейну в різних галузях та виявити ключові проблеми й переваги впровадження;

озробити прототип інформаційної системи на основі блокчейну для демонстрації механізмів перевірки достовірності даних;

цінити ефективність та доцільність впровадження блокчейн-рішень для різних сценаріїв зберігання й обміну інформацією.

Практичне завдання. Розробити прототип простої блокчейн-системи для реєстрації транзакцій або змін у базі даних, яка імітує обраний реальний кейс (наприклад: збереження записів про вакцинацію, облік навчальних досягнень або логістичних поставок). Продемонструвати, як за допомогою блокчейн-механізмів забезпечується незмінність записів і можливість перевірки їх достовірності всіма учасниками процесу. Результати реалізації відобразити у вигляді графічної схеми або діаграми функціонування, що буде подана на відповідному малюнку.

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН

Поняття та принципи роботи блокчейну

У сучасному цифровому світі все більше уваги привертає технологія блокчейн. Вона вважається однією з найперспективніших інновацій 21 століття, здатною змінити підходи до зберігання й передавання інформації, організації фінансових операцій, контролю за цифровими правами та багато іншого. Блокчейн знаходить застосування у фінансах, медицині, логістиці, освіті, енергетиці й навіть у державному управлінні.

Блокчейн – база даних, в якій інформація зберігається у вигляді послідовного ланцюжка блоків. Кожен блок містить певні дані, час їх створення і посилання на попередній блок. Це робить його стійким до змін. Змінити інформацію в одному блоці, не змінивши її у всіх наступних, неможливо. Така структура забезпечує цілісність та незмінність записів у системі.

Основні особливості блокчейну включають:

1. Відсутність єдиного центру управління – дані зберігаються на багатьох вузлах мережі, що виключає можливість централізованого контролю.
2. Прозорість – будь-хто може перевірити історію змін, оскільки дані загальнодоступні.
3. Використання криптографії – всі дані в блокчейні шифруються, що гарантує їхню безпеку та захист від підробки.

Принцип децентралізації полягає в тому, що база даних розподілена між великою кількістю учасників мережі (нодів), кожен із яких має власну копію блокчейну. Завдяки цьому система є стійкою до збоїв і несанкціонованих змін: якщо один або кілька вузлів вийдуть з ладу чи будуть скомпрометовані, решта учасників зможуть продовжити роботу.

Найважливішою властивістю блокчейну є незмінність даних. Після того, як інформація потрапляє до блоку і цей блок стає частиною ланцюга, змінити її

стає практично неможливо. Кожен блок містить унікальний криптографічний хеш-підпис, що залежить від вмісту цього блоку і хешу попереднього. Будь-яка спроба змінити вміст одного блоку змінює його хеш, що порушує цілісність усього ланцюга.

Прозорість – ще одна ключова перевага блокчейну. У публічних блокчейн-системах всі транзакції зберігаються у відкритому доступі. Кожен бажаючий може переглянути ланцюг блоків і впевнитися в автентичності даних. Це дозволяє забезпечити високий рівень довіри між незнайомими сторонами.

Криптографічний захист лежить в основі надійності технології. Кожна транзакція підписується за допомогою приватного ключа відправника, що унеможливорює підробку операцій. Публічний ключ дозволяє будь-кому перевірити справжність транзакції без доступу до приватної інформації.

Ще одним важливим елементом є механізм досягнення консенсусу. Перш ніж новий блок буде додано до блокчейну, більшість учасників мережі повинні погодитися з його вмістом. Це запобігає шахрайству і забезпечує цілісність ланцюга. Залежно від системи, використовуються різні алгоритми досягнення консенсусу, найпоширенішими з яких є Proof of Work (доказ виконаної роботи) і Proof of Stake (доказ володіння часткою).

Таким чином, поняття блокчейну включає у себе систему, де дані організовані у вигляді захищеного ланцюга блоків, збережених на безлічі комп'ютерів у мережі. Його принципи роботи – децентралізація, незмінність, відкритість, криптографія та консенсус – створюють потужну технологічну основу для розвитку цифрової економіки та систем з високим рівнем довіри без потреби в посередниках.

Блокчейн вже довів свою ефективність у багатьох сферах, і з кожним роком відкриваються нові перспективи для його впровадження. Саме тому розуміння цієї технології та її принципів є надзвичайно актуальним для сучасного суспільства.

1.2 Основні типи блокчейнів

Блокчейн як технологія з кожним роком знаходить дедалі ширше застосування у фінансовій, логістичній, державній, медичній, освітній та багатьох інших сферах. В основі його функціонування лежить децентралізована система збереження даних, яка забезпечує високий рівень надійності, незмінності інформації та прозорості процесів. Залежно від потреб користувачів і специфіки застосування блокчейн-системи можуть бути реалізовані у трьох основних формах: публічні, приватні та консорціумні (гібридні) блокчейни. Кожен з цих типів має унікальні риси, переваги та певні обмеження.

Публічні блокчейни є найбільш відкритою формою розподілених мереж, у яких будь-який користувач має змогу долучитися до роботи – брати участь у перевірці транзакцій, додаванні нових блоків та обслуговуванні мережі. Такі системи, як правило, мають відкритий вихідний код, що дозволяє незалежним розробникам у всьому світі досліджувати та вдосконалювати протокол. Найвідомішими прикладами публічних блокчейнів є Bitcoin, Ethereum, Polkadot та Cardano. Головною перевагою цього типу є повна децентралізація – відсутність єдиного центру контролю забезпечує високий рівень стійкості до зовнішнього втручання, маніпуляцій та цензури. Завдяки великій кількості вузлів мережа стає надзвичайно захищеною від змін даних заднім числом. Крім того, прозорість транзакцій підвищує рівень довіри з боку користувачів і дозволяє перевірити будь-яку операцію у відкритому реєстрі.

Втім, поряд з перевагами, публічні блокчейни мають і низку недоліків. Зокрема, висока навантаженість мережі може призводити до затримок в обробці транзакцій та збільшення комісій. Також існує ймовірність так званої атаки 51%, за якої зловмисник отримує контроль над більшістю обчислювальних потужностей і потенційно може змінювати дані або блокувати транзакції. Крім того, у відкритому середовищі складніше дотримуватися вимог конфіденційності, що може бути критично важливим для бізнесу чи державного сектору.

На відміну від публічних, приватні блокчейни працюють у закритому середовищі, де доступ до системи мають лише уповноважені користувачі. Такі мережі зазвичай створюються та адмініструються однією організацією, яка контролює права доступу, процес оновлення протоколу, валідацію транзакцій та всі інші аспекти функціонування мережі. Приватні блокчейни широко використовуються у корпоративному середовищі – наприклад, для ведення внутрішньої фінансової звітності, обліку товарів, логістики або захищеного обміну даними між підрозділами компанії. Перевагами приватних блокчейнів є висока швидкість обробки транзакцій, можливість масштабування без впливу зовнішніх факторів, а також гнучкість у налаштуванні системи відповідно до конкретних потреб організації.

Однак повна централізація має і свої ризики. По-перше, довіра до таких систем обмежується лише внутрішнім середовищем, а зовнішні користувачі часто не мають змоги перевірити достовірність інформації або стан мережі. По-друге, керівна структура може бути вразливою до внутрішніх зловживань або помилок адміністрації. По-третє, підтримка приватного блокчейну може потребувати значних фінансових та технічних ресурсів, особливо якщо мова йде про забезпечення високого рівня безпеки.

Третій тип – консорціумні, або гібридні блокчейни – поєднує характеристики публічних і приватних моделей, створюючи компромісний варіант для співпраці кількох сторін. Управління мережею у цьому випадку здійснюється колегіально – наприклад, кількома компаніями, державними структурами або дослідницькими установами. Доступ до інформації в такій системі може бути частково відкритим, частково – обмеженим, що дозволяє адаптувати мережу під різні рівні довіри та контролю. Прикладами консорціумних блокчейнів є Hyperledger Fabric, Quorum, Corda, які часто використовуються у фінансовій галузі, у сфері охорони здоров'я чи міжнародній торгівлі.

Серед переваг консорціумних мереж можна виділити підвищений рівень безпеки завдяки колективному контролю, покращену масштабованість, а також

можливість створити справедливую систему взаємодії між різними організаціями без необхідності у повній відкритості. Водночас процес ухвалення рішень може бути складним і тривалим, оскільки потребує згоди між усіма учасниками консорціуму. До того ж рівень децентралізації в таких системах зазвичай обмежений, і вплив на мережу мають лише уповноважені структури.

Зрештою, вибір типу блокчейн-мережі повинен бути продиктований конкретними завданнями, які стоять перед проектом, рівнем довіри між учасниками, вимогами до безпеки, швидкості та прозорості. Якщо основною метою є відкритість, незалежність від централізованого управління та максимальна прозорість – доцільно обирати публічний блокчейн. Для компаній, яким важлива конфіденційність внутрішніх процесів, чіткий контроль і швидкість – найкращим рішенням стане приватна модель. Якщо ж ідеться про взаємодію між кількома сторонами, де потрібен баланс між відкритістю і безпекою, консорціумна мережа є оптимальним варіантом.

Отже, ефективне впровадження блокчейн-рішень значною мірою залежить від правильного вибору архітектури мережі. Успішні проекти – це ті, в яких технологія відповідає практичним потребам, а її структура гармонійно поєднує інноваційність, гнучкість та захист інтересів усіх учасників системи.

1.3 Криптографічні методи захисту та алгоритми безпеки

Криптографічні методи захисту є базовим елементом системи інформаційної безпеки в умовах стрімкого розвитку цифрових технологій. Зокрема, вони є ключовим компонентом технології блокчейн, яка широко використовується у фінансових операціях, обміні даними, верифікації особистості та збереженні цифрових активів.

Криптографія передбачає використання математичних і логічних методів для перетворення відкритої інформації у зашифрований вигляд, що унеможливорює її прочитання сторонніми особами без наявності спеціального ключа дешифрування. Суть таких методів полягає у тому, що навіть якщо дані

будуть перехоплені, викрадені або втраплять до рук зломисників, вони залишаться непридатними для використання без правильного ключа. Це забезпечує високий рівень конфіденційності, цілісності та автентичності інформації.

Однією з головних переваг криптографічного підходу є те, що захищається не лише доступ до даних, а саме їхній зміст. Навіть за умови фізичного доступу до пристрою, файлу або бази даних, сторонній користувач не зможе прочитати чи змінити зашифровану інформацію без відповідного ключа. Такий рівень захисту реалізується через використання спеціалізованого програмного забезпечення, криптографічних бібліотек або вбудованих програмних модулів у цифрових пристроях.

Сучасні криптографічні системи повинні відповідати цілому комплексу технічних і функціональних вимог. По-перше, алгоритм шифрування має забезпечувати повне та точне відновлення повідомлення після дешифрування – без втрат чи змін змісту. По-друге, криптоалгоритм повинен мати високу криптостійкість, тобто бути несприйнятливим до зламу шляхом повного перебору ключів або аналізу структурних слабкостей.

Крім того, криптографічна система повинна гарантувати надійний та безпечний спосіб розповсюдження ключів, навіть у випадках використання потенційно вразливих мережевих каналів зв'язку. У цьому контексті важливо, щоб незначна зміна ключа викликала кардинальні зміни в зашифрованому тексті (ефект лавини), що унеможливорює спроби підбору або здогадування ключа на основі аналізу кількох повідомлень.

Сам алгоритм шифрування має бути стійким до зворотного аналізу та не містити повторюваних елементів, які можуть бути виявлені за допомогою математичних або статистичних методів. Також структура шифрованого повідомлення повинна приховувати наявність додаткових службових бітів, що додаються під час шифрування. Важливо, щоб довжина зашифрованого повідомлення не була надмірно більшою за довжину початкового тексту – це дозволяє зберігати ефективність зберігання і передачі даних.

Універсальність алгоритму – ще одна важлива вимога. Він повинен бути придатним як для програмної, так і для апаратної реалізації, що дозволяє його впровадження у широкий спектр пристроїв – від потужних серверів і дата-центрів до мікроконтролерів у смартфонах, банківських картках та інтернет-речах. Гнучкість у зміні довжини ключа без порушення структури роботи алгоритму забезпечує масштабованість і адаптивність системи.

Усі криптографічні алгоритми ґрунтуються на використанні математичних функцій, які перетворюють відкритий (читабельний) текст на шифротекст і навпаки. Залежно від способу організації роботи ключів, криптосистеми поділяються на симетричні та асиметричні.

Симетричне шифрування використовує один і той самий секретний ключ для шифрування та дешифрування інформації. Такий підхід відзначається високою швидкістю та ефективністю, що робить його зручним для великих обсягів даних. Водночас він вимагає надійного каналу для передачі ключа, оскільки компрометація ключа означає втрату безпеки всього процесу обміну інформацією.

Асиметричне шифрування, навпаки, використовує пару ключів – відкритий і закритий. Відкритий ключ може бути поширений публічно, тоді як закритий тримається в таємниці власником. Повідомлення, зашифроване відкритим ключем, може розшифрувати лише власник відповідного закритого ключа. Цей метод дозволяє організувати безпечний обмін даними без необхідності передавати секретні ключі, що істотно підвищує рівень захисту комунікації.

Завдяки криптографії, блокчейн-технології здатні гарантувати незмінність записів, а також унеможливити підробку транзакцій або несанкціонований доступ до даних. Кожен блок містить криптографічний підпис, що пов'язує його з попереднім блоком, створюючи цілісний, незмінний ланцюг записів. Це дозволяє будувати цифрові платформи з високим рівнем довіри, прозорості й безпеки.

Таким чином, криптографічні методи відіграють ключову роль у створенні сучасної цифрової інфраструктури, де конфіденційність, надійність та безпека обміну інформацією є критично важливими факторами.

Недоліки та особливості розвитку блокчейну

Однією з найбільш привабливих рис блокчейну є його децентралізований характер, що означає відсутність єдиного центру керування та зберігання даних. У традиційних централізованих системах уся інформація зазвичай зберігається на одному або кількох серверах, контрольованих однією організацією. Це створює ризик втрати або пошкодження даних у випадку збою, атаки або помилки. Натомість у блокчейні дані розміщені одночасно на тисячах, а іноді й мільйонах пристроїв у всьому світі, які є повноправними учасниками мережі. Кожен такий пристрій має копію всього реєстру, що дозволяє системі функціонувати навіть при виході з ладу значної кількості вузлів. Завдяки цьому блокчейн надзвичайно стійкий до збоїв, атак і спроб несанкціонованого втручання.

Ця децентралізація сприяє створенню більш надійної і довговічної інфраструктури для зберігання даних. Практично неможливо зламати або знищити всю мережу, оскільки для цього потрібно одночасно атакувати абсолютну більшість її учасників, що технічно та фінансово дуже складно. Така структура дозволяє створити систему, якій не потрібно довіряти – достатньо перевірити алгоритми її роботи. Крім того, усі підтверджені записи у блокчейні мають властивість незмінності: після додавання інформації в блок вона стає частиною ланцюга, змінити який без помітного втручання неможливо. Це гарантує достовірність історичних даних, що особливо важливо для фінансових операцій, реєстрації прав власності, медичних записів, протоколів голосування, логістичних ланцюгів і багатьох інших критичних сфер.

Наприклад, у корпоративному середовищі блокчейн може виступати потужним інструментом протидії шахрайству. Кожна транзакція або дія

працівника реєструється та може бути перевірена незалежними сторонами. Таким чином знижується імовірність підробок, подвійних витрат або інших форм зловживання. Це не лише підвищує прозорість, а й зміцнює довіру між контрагентами.

Ще однією ключовою перевагою блокчейну є відсутність потреби у посередниках. У традиційних фінансових системах для проведення операцій потрібна участь банків, нотаріусів, платіжних платформ, юристів або інших третіх сторін, які підтверджують дійсність транзакцій. Така модель створює додаткові витрати, уповільнює процеси й несе ризики зловживання владою. Натомість блокчейн дозволяє взаємодіяти безпосередньо між учасниками – за допомогою криптографії та алгоритмів консенсусу, які автоматично підтверджують правомірність кожної операції. Це значно пришвидшує обіг активів, знижує комісії, підвищує безпеку й робить систему більш ефективною.

Наприклад, у міжнародних платежах блокчейн уже зараз дозволяє переводити гроші між країнами за кілька хвилин замість кількох днів, як у випадку з банками. Також його використовують для випуску токенизованих активів, де право власності на реальні речі (наприклад, нерухомість або витвори мистецтва) підтверджується за допомогою запису у блокчейні. Це забезпечує прозорість і простежуваність володіння, а також відкриває нові можливості для інвестування та обміну.

Однак блокчейн не позбавлений недоліків. Однією з найбільш відомих загроз є атака 51%, коли одна сторона – наприклад, велика група майнерів – отримує контроль над більш ніж половиною обчислювальної потужності мережі. Це дає їй змогу змінювати або блокувати нові транзакції, що суперечить принципу децентралізації. Хоча у великих системах, як-от Bitcoin чи Ethereum, така атака малоімовірна через масштабність мережі, у менших проєктах або нових блокчейнах така вразливість цілком реальна. Це змушує розробників шукати нові способи досягнення консенсусу, менш залежні від «сирої» потужності.

Ще однією серйозною проблемою є складність у виправленні вже записаних даних. З одного боку, незмінність – це гарантія захищеності, але з іншого – вона створює труднощі, коли потрібно виправити помилку, оновити дані або змінити правила функціонування системи. Для цього часто доводиться вдаватися до хард-форків – радикальних оновлень, які можуть розділити спільноту користувачів і створити нові блокчейни з різною історією транзакцій. Це вже неодноразово ставалося в історії, зокрема з Bitcoin та Ethereum.

Крім того, варто згадати про людський фактор – зокрема, втрату доступу через втрату приватного ключа. У блокчейн-системах саме ключі забезпечують право власності: без них неможливо довести, що активи належать саме вам. Якщо користувач загубить приватний ключ, його кошти або дані стають назавжди недоступними. Це серйозна проблема, адже не існує "забуто пароль" або служби підтримки, яка б допомогла відновити доступ. Відомі випадки, коли користувачі втрачали біткоїни на мільйони доларів лише через втрату ключів.

Не менш важливою є проблема енергоефективності. У блокчейнах, які використовують алгоритм Proof of Work (наприклад, Bitcoin), майнери змушені витратити величезні обсяги електроенергії на розв'язання складних математичних задач. Лише один з них отримує нагороду, тоді як решта витрачених ресурсів не використовуються. Це призводить до масштабного енергоспоживання, яке вже сьогодні перевищує річне споживання деяких невеликих країн. Така ситуація викликає стурбованість серед екологів і стимулює перехід до альтернативних рішень, таких як Proof of Stake – алгоритм, що потребує набагато менше енергії.

Ще однією технічною проблемою є поступове розростання блокчейн-реєстрів. Кожен новий блок додається до попередніх, утворюючи дедалі довший ланцюг, який потрібно зберігати повністю для перевірки транзакцій. Наприклад, ланцюг Bitcoin уже зараз займає понад 200 гігабайт і постійно зростає. Для користувачів, які хочуть підтримувати повноцінну ноду, це означає постійні витрати на дисковий простір і обчислювальні ресурси. Це створює бар'єри для

участі в мережі та підсилює централізацію серед технічно підготовлених користувачів.

Незважаючи на всі ці виклики, блокчейн продовжує активно розвиватися та відкриває нові горизонти для суспільства. Його впроваджують не лише у фінансовій сфері, а також у логістиці, охороні здоров'я, освіті, публічному управлінні, ідентифікації особи, інтелектуальній власності, голосуванні та багатьох інших сферах. Держави розглядають блокчейн як платформу для створення електронних реєстрів, бізнес – як інструмент для оптимізації процесів і побудови довіри, а громадські організації – як механізм для відкритості й підзвітності. Усе це свідчить про те, що, незважаючи на складності, блокчейн здатен стати фундаментом нової цифрової епохи – прозорої, безпечної й децентралізованої.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГІЙ У РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ

2.1 Блокчейн у фінансовій сфері

У сучасному фінансовому секторі блокчейн-технології відіграють дедалі важливішу роль, стаючи основою для впровадження новітніх інновацій і радикального перегляду звичних підходів до фінансової діяльності. Вони відкривають широкі можливості для підвищення ефективності бізнес-процесів, забезпечення прозорості фінансових операцій, зниження витрат та рівня ризиків. Однією з ключових переваг цієї технології є її децентралізований характер, що дозволяє вести облік і проводити транзакції без необхідності у центральному посереднику, як-от банк або розрахунковий центр. У результаті значно зменшується ймовірність людських помилок або зловживань, а також знижується вартість обслуговування фінансових операцій.

Блокчейн сприяє появі таких інструментів, як смарт-контракти, які автоматично виконують умови угод без втручання третьої сторони, що пришвидшує і спрощує фінансову взаємодію. Завдяки цьому компанії можуть автоматизувати значну частину своєї діяльності, включно з нарахуванням платежів, перевіркою виконання умов контракту чи управління активами. Розвиток децентралізованих фінансів, відомих як DeFi, також відкриває шлях до створення нових платформ, які дозволяють користувачам брати участь у кредитуванні, інвестуванні чи обміні активів без посередників. Ще одним важливим напрямом є токенизація активів, яка дозволяє перетворити матеріальні або нематеріальні ресурси на цифрові токени, спрощуючи процес обліку, передачі права власності та залучення інвестицій.

Усе більше традиційних банків, інвестиційних фондів і фінансових компаній інтегрують блокчейн у свої бізнес-моделі. Такі технології використовуються для пришвидшення міжбанківських розрахунків,

забезпечення точності обліку, поліпшення управління ризиками та запровадження нових підходів до взаємодії з клієнтами. Наприклад, деякі банки вже впровадили власні блокчейн-платформи для міжнародних переказів, які дозволяють здійснювати операції за лічені хвилини замість кількох днів.

Водночас блокчейн може бути поєднаний з іншими передовими технологіями, такими як штучний інтелект, хмарні обчислення та Інтернет речей. Це відкриває нові горизонти для автоматизації аналітики, прогнозування ринкових коливань, вдосконалення управління активами та прийняття фінансових рішень у реальному часі. Така інтеграція дозволяє компаніям швидше реагувати на потреби клієнтів і знижувати витрати на утримання складних інфраструктур.

Проте разом із перспективами існує низка викликів. Відсутність єдиного міжнародного підходу до регулювання блокчейну ускладнює його масове впровадження. Питання безпеки і захисту особистих даних залишаються актуальними, особливо у контексті зберігання та використання приватних ключів, без яких користувач втрачає доступ до власних активів. Технічні обмеження також впливають на темпи впровадження: масштабованість, пропускна здатність мережі та інтеграція з уже існуючими системами потребують додаткових інвестицій і технічної експертизи.

Успішний розвиток блокчейн-технологій у фінансовому секторі можливий за умови стратегічного підходу, що включає активне впровадження пілотних проєктів, створення сприятливого регуляторного середовища, налагодження партнерства між державними і приватними структурами, а також підвищення рівня обізнаності серед фахівців. Необхідно формувати нову фінансову культуру, де довіра базуватиметься не лише на інститутах, а й на технічній надійності та прозорості систем.

Таким чином, блокчейн має всі шанси стати фундаментом майбутньої фінансової системи, яка буде більш відкритою, надійною, ефективною та доступною. Його вплив на фінансову інфраструктуру тільки посилюється, і в

найближчі роки ця технологія, ймовірно, стане однією з ключових у процесах трансформації глобальних фінансів.

2.2 Використання блокчейну в логістиці

Блокчейн у сфері логістики є інноваційною технологією, що має потенціал кардинально змінити способи управління ланцюгами постачання. По суті, блокчейн – це розподілений цифровий реєстр, який зберігає інформацію у вигляді ланцюга даних, де кожен новий запис додається у вигляді блоку. Ці блоки криптографічно пов'язані між собою, що забезпечує високий рівень безпеки та унеможливорює несанкціоноване редагування або підробку інформації після її запису.

У логістичному контексті це означає, що кожна дія, переміщення товару чи транзакція в межах ланцюга постачання фіксується автоматично, з точною позначкою часу, зазначенням місцезнаходження і відповідними деталями. Коли нова подія відбувається в системі, створюється новий блок, який повинен пройти перевірку на достовірність з боку кількох учасників мережі. Лише після цього він додається до загального ланцюга і стає частиною спільного реєстру, до якого мають доступ усі авторизовані учасники. Такий підхід гарантує незмінність і достовірність даних, адже інформація синхронізується в режимі реального часу між усіма сторонами.

Запровадження блокчейну в логістичному секторі відкриває низку суттєвих переваг. Однією з них є радикальне підвищення прозорості – кожен учасник процесу, від виробника до кінцевого споживача, може в будь-який момент переглянути всю історію переміщення товару. Це зменшує ймовірність суперечок, підвищує рівень довіри між партнерами та спрощує перевірки відповідності.

Іншою важливою перевагою є точна відстежуваність: продукти можна простежити буквально з моменту їх створення до доставки кінцевому споживачеві. Це має велике значення у таких галузях, як харчова промисловість

або фармацевтика, де походження та умови транспортування продукту безпосередньо впливають на його безпеку та якість. Блокчейн також сприяє автоматизації процесів: завдяки використанню смарт-контрактів можна налаштувати автоматичне виконання певних дій, як-от здійснення оплати чи генерація сповіщень, коли вантаж прибуває до визначеної точки. Це знижує потребу в людському втручанні, мінімізує помилки та пришвидшує логістичні операції.

Крім того, блокчейн значно підвищує безпеку даних. Через свою децентралізовану природу та криптографічний захист, інформацію, що міститься в блокчейні, практично неможливо змінити чи зламати. Це зменшує ризик шахрайства, кібератак і втрат даних. Усе це разом сприяє формуванню вищого рівня довіри між усіма учасниками ланцюга постачання. В умовах, коли кожен має доступ до тієї ж, незмінної інформації, зникає потреба в посередниках або централізованих системах перевірки. Така прозорість і надійність створюють основу для стабільної, злагодженої співпраці, що, у свою чергу, може призвести до значного зниження операційних витрат. Автоматизація, скорочення паперової роботи, зменшення кількості перевірок і розслідувань – усе це дозволяє компаніям економити ресурси та зосереджуватися на стратегічних завданнях.

На практиці технологія блокчейн уже демонструє свою ефективність у логістиці в різних сферах. Одним із найпоширеніших застосувань є відстеження та автентифікація продукції. За допомогою блокчейну можна створити цифровий паспорт товару, який буде містити всю історію його переміщення, підтверджуючи справжність і дозволяючи виявляти підробки. Це особливо актуально для коштовностей, брендovих товарів або ліків. У галузі контролю якості блокчейн може використовуватися для моніторингу відповідності умовам зберігання чи перевезення. Наприклад, у харчовій індустрії – для відстеження температурного режиму на кожному етапі транспортування. Інтеграція смарт-контрактів дає змогу створювати умови, за яких виконання певних логістичних етапів автоматично активує подальші дії, наприклад, переказ коштів або надсилання підтвердження доставки.

Також блокчейн може бути надзвичайно корисним у митному та прикордонному контролі, забезпечуючи прозорий і незмінний запис про рух товарів. Це не лише зменшує обсяг паперової документації, а й дозволяє прискорити процедури перевірки та очистки. У сфері управління запасами блокчейн дає змогу в режимі реального часу відстежувати рівень залишків і переміщення товарів між складами, що покращує планування та зменшує ймовірність надлишків або дефіциту. Крім того, технологія блокує шлях до неправдивих заяв щодо сталості: з її допомогою компанії можуть підтверджувати, що їхні продукти виготовлені з дотриманням етичних стандартів, використовують сировину з відповідальним походженням або відповідають нормам чесної праці.

Отже, блокчейн у логістиці вже сьогодні демонструє свій потужний потенціал і здатен стати фундаментом нової, прозорої, автоматизованої та ефективної логістичної інфраструктури. Завдяки своїм унікальним властивостям ця технологія не лише покращує якість управління ланцюгами постачання, а й формує нові стандарти довіри, співпраці та сталого розвитку в глобальному масштабі.

2.3 Блокчейн у медицині

Використання блокчейн-технологій в охороні здоров'я відкриває нові горизонти для підвищення якості медичних послуг, безпеки даних і загальної ефективності системи. Сучасні блокчейни, спочатку створені для обліку фінансових операцій у криптовалютах, сьогодні демонструють свій потенціал у зовсім інших сферах, зокрема у медичній. Основною перевагою є їхня здатність зберігати дані в незмінному, надійному форматі. Завдяки криптографічним методам захисту й розподіленій структурі, дані в блокчейні майже неможливо підробити або знищити. Це робить їх ідеальним середовищем для збереження чутливої медичної інформації, як-от електронні картки пацієнтів, історія хвороб, результати аналізів або рецепти.

Децентралізований характер блокчейн-мереж дозволяє підтримувати постійну синхронізацію даних між усіма учасниками. У випадку оновлення запису, наприклад, додавання нового медичного обстеження, ця інформація одночасно оновлюється в кожній копії системи. Такі зміни підтверджуються іншими учасниками мережі, що гарантує достовірність інформації й виключає можливість помилкових або зловмисних правок. Особливо важливо, що це знижує залежність від централізованих серверів, які часто стають мішенню для кібератак. Для лікарень та клінік це може бути критично важливо, адже атаки з боку хакерів або збої в роботі систем можуть паралізувати роботу цілого закладу.

У медичній сфері важливо забезпечити не лише безпеку, але й сумісність систем. Різноманіття програмного забезпечення та форматів записів, що використовується у різних медичних установах, часто створює бар'єри в обміні інформацією. Блокчейн дозволяє створити єдину, доступну й безпечну платформу, до якої можуть підключатися лікарні, приватні клініки, лабораторії та аптеки, отримуючи доступ до релевантних даних пацієнта – за умов наявності відповідного дозволу. Це спрощує координацію лікування, зменшує кількість помилок, а також скорочує витрати на дублювання процедур, які вже були проведені в іншому медичному закладі.

Ще однією вагомою перевагою є прозорість і контроль з боку самого пацієнта. Людина отримує можливість бачити, хто і коли звертався до її медичних даних, які зміни вносились, і має змогу підтверджувати або оскаржувати ці дії. Це не лише зміцнює довіру до медичної системи, а й дозволяє ефективніше боротися з фальсифікаціями чи помилками в документації.

Блокчейн також здатен істотно покращити функціонування ланцюгів постачання у фармацевтиці. Системи на його основі дають змогу детально відстежити шлях лікарського засобу – від виробника до аптеки. Це допомагає боротися з підробками, забезпечує контроль умов зберігання та транспортування, а також підвищує відповідальність усіх учасників ланцюга постачання. Завдяки цьому пацієнти можуть бути впевнені в якості ліків, які їм призначають.

Ще одна важлива сфера застосування – це боротьба зі страховими махінаціями. За допомогою незмінних записів можна перевірити, чи дійсно була надана послуга, за яку виставлений рахунок. Це значно ускладнює підробку документів, фальшиві претензії та інші зловживання, що щороку коштують системі мільярди доларів.

Не менш перспективним є використання блокчейну для підбору учасників клінічних випробувань. Надані пацієнтом дані, які захищено й збережено в мережі, можуть бути використані для визначення відповідності критеріям дослідження. Це допоможе пацієнтам швидше знаходити потрібні випробування, а фармацевтичним компаніям – ефективніше проводити дослідження нових препаратів. При цьому зберігається високий рівень конфіденційності та достовірності інформації.

Втім, попри значний потенціал, впровадження блокчейн-технологій не позбавлене викликів. Однією з головних проблем є відповідність вимогам регуляторів щодо захисту персональних даних. У США, наприклад, це закон HIPAA, який накладає суворі обмеження на зберігання та передачу медичних записів. Блокчейн-системи повинні враховувати ці вимоги, забезпечуючи конфіденційність при збереженні прозорості та доступу.

Іншою складністю є високі початкові витрати на створення та інтеграцію таких систем у вже існуючу медичну інфраструктуру. Крім того, блокчейн, за своєю природою, повільніший у роботі, ніж традиційні централізовані бази даних, особливо при обробці великих обсягів інформації. Це може стати перешкодою, зокрема при роботі з великими медичними зображеннями чи великими архівами.

Також значним бар'єром залишається недостатня обізнаність медичних працівників у сфері блокчейну. Багато фахівців просто не розуміють, як ці технології працюють і яку користь можуть принести. Це гальмує впровадження, оскільки без підтримки й розуміння на місцях жодна система не працюватиме ефективно. Необхідне постійне навчання та інформування персоналу.

Нарешті, актуальною проблемою є відсутність уніфікованих стандартів щодо форматів даних. У медичній сфері використовується безліч несумісних систем, і їх інтеграція в єдиний блокчейн без втрати важливих деталей є складним завданням. Лише розробка загальних технічних протоколів та форматів обміну інформацією дозволить ефективно об'єднати медичні установи в єдину цифрову мережу.

У підсумку, блокчейн має потенціал змінити охорону здоров'я, зробивши її прозорішою, безпечнішою та ефективнішою. Водночас повноцінне впровадження цих технологій потребує спільних зусиль від урядових органів, приватного сектору, медичних працівників і самих пацієнтів. Лише разом можна подолати технічні, правові та освітні бар'єри і використати всі можливості, які відкриває блокчейн у сфері охорони здоров'я.

2.4 Застосування блокчейну у державному секторі

Застосування блокчейн-технологій у державному секторі є одним із найперспективніших напрямів цифрової трансформації публічного управління. Йдеться не лише про технологічне нововведення, а й про глибокі системні зміни, які можуть докорінно змінити взаємини між державою та громадянами. Блокчейн дозволяє створити інфраструктуру, в якій довіра до системи базується не на авторитеті чи контролі зверху, а на математично підтвердженій незмінності даних та відкритому доступі до них.

Однією з найважливіших сфер, де блокчейн має значний потенціал, є організація електронного голосування. Традиційна виборча система часто піддається сумнівам через можливі фальсифікації, помилки при підрахунках голосів чи неналежне зберігання бюлетенів. Застосування блокчейну дає змогу створити систему, у якій кожен голос буде зафіксований як унікальна транзакція, що не може бути змінена або видалена. Виборці матимуть змогу самостійно перевірити, що їхній голос врахований, без ризику розкриття особистості. Це

забезпечує максимальний рівень прозорості, а також зменшує вартість організації виборів, адже значна частина процесів автоматизується.

Ще однією критично важливою сферою є державні реєстри, зокрема земельні кадастри, реєстри нерухомого майна, реєстрація бізнесу чи транспортних засобів. У багатьох країнах саме ці сфери найбільш вразливі до корупційних ризиків та підробки документів. Перехід до блокчейн-реєстрів означає, що інформація про право власності зберігається не в централізованій базі, яку можна зламати або змінити через адміністративний доступ, а в розподіленій мережі, де жоден окремий учасник не може самостійно змінити записи. Це радикально підвищує безпеку, надійність та довіру до таких реєстрів.

У сфері цифрової ідентифікації громадян блокчейн дозволяє створити єдину безпечну систему зберігання особистих даних. Сьогодні дані громадян часто розпорочені між різними установами, що створює ризики витоку, дублювання чи зловживань. Використання блокчейн-платформ дає можливість громадянам контролювати, кому й коли надається доступ до їхньої інформації. Це сприяє посиленню захисту персональних даних та підвищенню автономії користувачів у цифровому середовищі.

Окрема увага заслуговує впровадження блокчейну у сфері публічних закупівель. Це одна з найвразливіших до корупції ділянок у державному управлінні. Завдяки блокчейн-технологіям можливо створити систему, в якій інформація про кожен етап закупівель – від оголошення тендеру до вибору переможця та реалізації контракту – зберігається прозоро й у незмінному вигляді. Це дозволяє не лише автоматизувати моніторинг процесів, а й забезпечити громадський контроль і попередити зловживання.

Не менш важливим є застосування блокчейну в податковій і митній сферах. Смарт-контракти можуть автоматично виконувати обчислення, перевірку й навіть сплату податків, зменшуючи бюрократію та людський фактор. Крім того, на митниці можливе застосування блокчейн-рішень для контролю за переміщенням товарів, що дозволить боротися з контрабандою та зловживаннями, одночасно прискорюючи обробку вантажів.

Попри численні переваги, слід враховувати й суттєві виклики, які супроводжують впровадження блокчейну в державному секторі. Передусім це технічна складність розгортання таких систем: інтеграція з існуючими базами даних, забезпечення масштабованості, підготовка кваліфікованих кадрів. Крім того, чинне законодавство часто не враховує особливостей децентралізованих систем, що потребує глибокої правової адаптації. Не менш важливою є проблема цифрової грамотності – як серед чиновників, так і серед громадян, адже без належного розуміння принципів роботи блокчейну його потенціал може бути нереалізованим або навіть знецінений.

Таким чином, блокчейн має потенціал стати потужним інструментом трансформації державного управління, створивши новий рівень прозорості, відповідальності й безпеки. Проте його ефективне впровадження вимагає комплексного підходу, поєднання технологічного, правового та освітнього компонентів.

2.5 Блокчейн у сфері освіти та науки

Блокчейн-технології у сфері освіти та науки відкривають новий рівень цифровізації, прозорості та безпеки в обігу академічної інформації. У світі, де підrobка дипломів, непрозорість наукових рецензій і складнощі з визнанням закордонної освіти залишаються актуальними проблемами, блокчейн може запропонувати надійні рішення, які забезпечують достовірність і спрощують доступ до перевіреної інформації.

Одним із найбільш перспективних напрямів є зберігання дипломів і сертифікатів у блокчейні. Завдяки незмінності записів у децентралізованому реєстрі, будь-який документ про освіту – диплом бакалавра, сертифікат про проходження курсу чи кваліфікаційна робота – стає захищеним від підrobки. Такий документ можна легко перевірити онлайн: достатньо мати посилання на відповідний блок у реєстрі. Це значно спрощує роботу рекрутерів, закладів освіти, а також самих випускників, яким більше не потрібно збирати копії та

довідки – усі їхні досягнення зберігаються в цифровому форматі та є доступними для перевірки в один клік.

Ще один напрям використання – створення цифрових портфоліо студентів. Це інтерактивні бази даних, у яких фіксуються не лише оцінки, а й усі навчальні активності: проекти, дослідження, участь у конференціях, практиках, додаткових курсах тощо. Усе це може бути записано у блокчейн і мати чітку хронологію. Така система дозволяє студентам формувати унікальний цифровий профіль, який можна використовувати при вступі до магістратури, пошуку роботи чи участі в академічних програмах за кордоном. Для роботодавців це – швидкий доступ до перевіреної та повної інформації про кандидата.

У науковій сфері блокчейн сприяє забезпеченню академічної доброчесності. Оскільки плагіат і фальсифікація результатів залишаються серйозними проблемами, фіксація кожної наукової роботи в блокчейні створює своєрідний цифровий "відбиток", який унеможливорює подальше копіювання або привласнення чужих ідей. Таким чином, авторство наукової праці захищається автоматично, а публікація отримує достовірне джерело походження.

Крім того, блокчейн може використовуватись у процесі відкритого рецензування наукових робіт. Зазвичай рецензії на дослідження проходять закрито, що іноді викликає недовіру або упередженість у спільноті. Застосування блокчейну дозволяє зберігати рецензії прозоро й незмінно, забезпечуючи відкритий доступ до оцінок і коментарів. Це стимулює розвиток конструктивної критики, підвищує якість публікацій і сприяє чесній конкуренції між науковцями.

Ще одним важливим аспектом є обмін інформацією між навчальними закладами різних країн чи регіонів. Завдяки єдиному цифровому стандарту з використанням блокчейну, процеси визнання дипломів, переведення студентів або обміну академічними записами можуть стати набагато швидшими й безпечнішими. Не потрібно витратити місяці на пересилку офіційних документів поштою чи очікування на бюрократичні підтвердження – все вже зафіксовано у цифровій системі, яка доступна в режимі реального часу.

Використання блокчейну в освіті та науці має низку значних переваг. Це насамперед прозорість і довіра до джерел інформації, незмінність даних, що гарантує їхню достовірність, а також автоматизація перевірок і процесів верифікації за допомогою смарт-контрактів. Усе це дає змогу зменшити адміністративне навантаження на заклади освіти та наукові установи, одночасно підвищуючи якість і швидкість обслуговування студентів і науковців.

Однак впровадження цієї технології не обходиться без викликів. Однією з ключових проблем є висока вартість запуску та підтримки блокчейн-систем – не всі навчальні заклади, особливо в країнах із обмеженим фінансуванням, можуть дозволити собі такі інновації. Також дуже важливим є питання захисту персональних даних: академічна інформація містить багато чутливої інформації, тому потрібно продумати надійні механізми доступу, шифрування та анонімізації. Ще один виклик – стандартизація форматів даних, адже щоб забезпечити ефективний обмін між закладами, необхідно узгодити структури й правила внесення інформації, що потребує координації на національному та міжнародному рівнях.

Таким чином, блокчейн має величезний потенціал у розвитку системи освіти й науки, перетворюючи традиційні підходи на сучасні, прозорі й ефективні моделі. Його впровадження не лише покращить технічні аспекти адміністрування, а й сприятиме зміцненню академічної доброчесності, розвитку глобальної співпраці та створенню справді цифрового освітнього середовища. Якщо бажаєш, можу підготувати короткий приклад для презентації або створити яскравий постер, який візуалізує усі ключові аспекти цього процесу.

РОЗДІЛ 3

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ БЛОКЧЕЙН-РІШЕНЬ ДЛЯ ГАРАНТІЇ ДОСТОВІРНОСТІ ДАНИХ

3.1 Сучасні тенденції розвитку блокчейн-технологій

Блокчейн-технології в сучасному світі стрімко розвиваються та набувають дедалі ширшого застосування. Вони вже давно вийшли за межі використання лише в сфері криптовалют і поступово перетворюються на ключовий елемент цифрової трансформації економіки, державного управління, медицини, освіти та інших галузей. Мова йде не тільки про смарт-контракти чи цифрові гроші, а й про створення цілісної екосистеми, яка забезпечує прозорість, надійність, децентралізоване прийняття рішень і високий рівень довіри між усіма учасниками цифрових процесів. Тенденції розвитку блокчейн-технологій охоплюють як технічні інновації – наприклад, масштабованість, енергоефективні алгоритми консенсусу чи інтеграцію зі штучним інтелектом, – так і соціальні та правові аспекти: зміни у державному регулюванні, захист персональних даних, розвиток міжнародного співробітництва.

На рисунку 3.1 зображено ключові напрями застосування блокчейн-технологій у сучасному світі.

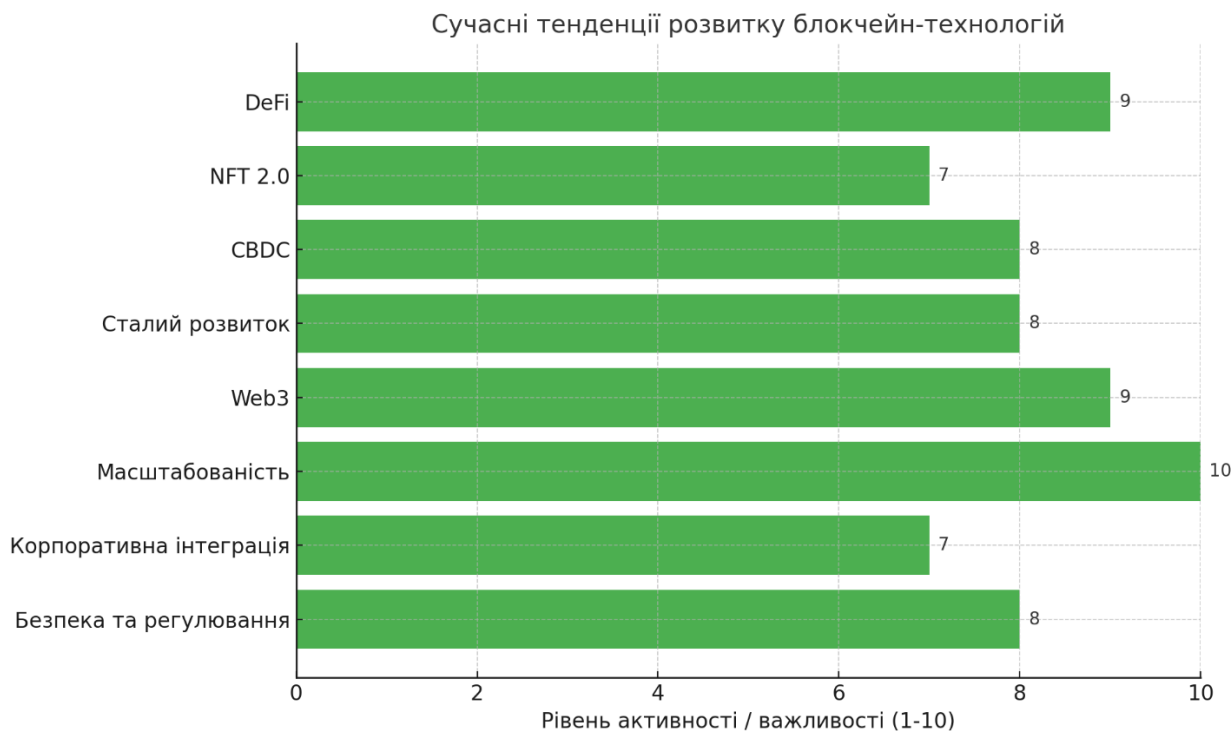


Рисунок 3.1 – Сучасні тенденції розвитку блокчейн-технологій

Однією з найвизначальніших тенденцій є розгортання багатоланцюгових (multi-chain) та міжланцюгових (cross-chain) архітектур. На відміну від початкових етапів, коли кожен блокчейн існував як окрема екосистема, сьогодні відчувається потужна потреба в забезпеченні взаємодії між різними мережами. Платформи на зразок Polkadot та Cosmos створюють можливість для різнорідних блокчейнів обмінюватися інформацією та цінностями без необхідності централізованого посередника. Протоколи інтероперабельності, як-от LayerZero або Wormhole, дозволяють реалізовувати складні сценарії взаємодії між децентралізованими застосунками (dApps), об'єднуючи користувацький досвід у єдину екосистему. Це відкриває перспективи для створення справді масштабованих, гнучких та взаємопов'язаних цифрових світів.

Не менш значущим є розвиток масштабованих рішень, особливо у вигляді технологій другого рівня (Layer 2). Історично проблема масштабування блокчейн-мереж – тобто здатність обробляти велику кількість транзакцій при збереженні децентралізованості та безпеки – залишалася критичною. Layer 2-рішення, серед яких слід відзначити Optimism, Arbitrum, zkSync та інші,

переносять обробку транзакцій за межі основного ланцюга, зберігаючи при цьому його безпекові гарантії. Це дозволяє суттєво зменшити комісії, скоротити час обробки операцій і забезпечити плавну роботу блокчейн-додатків навіть за умов масового користування. Без таких технологій було б практично неможливо реалізувати масштабні блокчейн-проекти у фінансовій сфері, торгівлі, інтернеті речей або цифровому мистецтві.

Особливу роль у розвитку технологій відіграють Zero-Knowledge докази – математично обґрунтовані способи доведення істинності певної інформації без розкриття її змісту. В умовах зростаючих ризиків порушення конфіденційності персональних і фінансових даних, застосування ZK-доказів стає основою для побудови приватних блокчейнів, захищених платформ для верифікації особи, а також конфіденційних фінансових протоколів. Zero-Knowledge технології також використовуються для створення більш ефективних рішень масштабування, як от zk-rollups, що поєднують високу продуктивність із максимальною приватністю.

Іншим потужним трендом є токенизація активів із реального світу – тобто переведення реальних матеріальних чи фінансових цінностей у цифрову форму у вигляді токенів на блокчейні. Це дає змогу демократизувати інвестування, зменшити бар'єри для участі у глобальних фінансових ринках, спростити облік і передачу прав власності. Наприклад, токенизовану нерухомість можна купувати частками, торгувати нею на децентралізованих платформах і використовувати як забезпечення в DeFi-протоколах. Такі активи стають більш ліквідними, прозорими та доступними, що має потенціал суттєво змінити традиційні фінансові моделі.

Одним із найбільш революційних процесів, що відбувається нині, є поява цифрових валют центральних банків – CBDC. Вони репрезентують собою офіційні державні валюти в цифровій формі, створені і керовані центральними банками, але функціонуючі на основі блокчейн-архітектури або її аналогів. Такі валюти вже проходять тестування або пілотне впровадження в ряді країн, зокрема в Євросоюзі, Китаї, Індії, Нігерії та багатьох інших. Їхнє використання

дозволяє забезпечити прозорість грошових потоків, знизити витрати на обслуговування фінансової інфраструктури, підвищити доступність цифрових фінансових послуг для широких верств населення. Водночас CBDC залишаються під контролем держави, що дозволяє інтегрувати інноваційні підходи у вже існуючі правові та економічні системи.

Окремо варто виділити напрям DePIN – децентралізованих фізичних інфраструктурних мереж, який є новим етапом інтеграції цифрового та фізичного світів. Блокчейн використовується тут як основа для координації й мотивації учасників, що надають свої ресурси для роботи мережі – наприклад, точок доступу до інтернету, обчислювальних потужностей, енергетичних пристроїв. Такі проєкти, як Helium Network або Render Network, створюють нові ринки інфраструктурних послуг, де власники обладнання отримують винагороду у криптовалюти, а користувачі – доступ до дешевших, ефективніших і більш децентралізованих сервісів.

Інтеграція штучного інтелекту з блокчейн-технологіями – ще один багатообіцяючий напрям. Блокчейн може гарантувати незмінність і надійність даних, які використовуються у тренуванні та роботі AI-моделей, а також забезпечити прозорість ухвалення рішень. Водночас смарт-контракти можуть використовуватися для автоматичного управління навчанням або взаємодією моделей у децентралізованих середовищах. Така синергія технологій відкриває шлях до створення автономних, прозорих і підзвітних інтелектуальних систем, що можуть застосовуватися в медицині, освіті, управлінні та кібербезпеці.

І, нарешті, сучасна блокчейн-індустрія активно реагує на глобальні виклики сталого розвитку. Однією з основних критик блокчейн-технологій у минулому була їхня енергоємність – зокрема, через алгоритми Proof of Work, які споживали великі обсяги електроенергії. Реакція на це – перехід до більш енергоефективних моделей, як-от Proof of Stake (на який перейшов Ethereum), використання інноваційних підходів (Chia з алгоритмом "proof of space and time") або створення блокчейнів, які з самого початку орієнтовані на екологічність

(наприклад, Algorand). Це свідчить про зрілість індустрії та її здатність адаптуватися до етичних і екологічних вимог часу.

Таким чином, блокчейн сьогодні – це не просто технологія з обмеженим застосуванням, а потужна інфраструктура для побудови нової цифрової епохи. Сучасні тенденції демонструють її поступовий перехід із експериментальної стадії до реального масштабного впровадження, що охоплює практично всі сфери економічного та суспільного життя. Трансформаційний потенціал блокчейну вже зараз змінює уявлення про власність, довіру, регулювання, конфіденційність і організацію суспільних відносин у цифрову добу.

3.2 Потенційні проблеми та ризики впровадження блокчейну

Попри стрімкий розвиток блокчейн-технологій і численні переваги, що з ними пов'язані, їх широке впровадження супроводжується низкою серйозних викликів, які можуть як уповільнити темпи адаптації, так і спричинити суттєві ризики в разі безсистемного або необережного використання. На практиці технологія стикається з бар'єрами як технічного, так і юридичного, соціального та економічного характеру, які не можна ігнорувати при плануванні її інтеграції в державні чи приватні інституції.

Однією з найгостріших проблем є правова невизначеність, яка досі зберігається в багатьох країнах світу. Відсутність чітко визначеного законодавства щодо статусу криптовалют, токенизованих активів, смарт-контрактів, а також нечіткі податкові правила створюють ситуацію правової пастки. Компанії, що бажають працювати у сфері блокчейну, часто не можуть спрогнозувати реакцію регулятора, ризикують потрапити під юридичні санкції або зіткнутися з раптовими обмеженнями. Більш того, існує реальна загроза надмірного регулювання або навіть прямої заборони з боку державних органів, що може знищити стартапи на ранніх етапах розвитку або призвести до втрати довіри інвесторів.

З технічного боку ключовою проблемою залишається масштабованість. Попри всі вдосконалення, базові блокчейн-мережі, особливо ті, що працюють на основі Proof of Work, мають суттєві обмеження щодо швидкості обробки транзакцій. У моменти пікового навантаження це призводить до затримок, зростання комісій та низької ефективності. Такі характеристики роблять неможливим використання блокчейну у сферах, де потрібна висока пропускна здатність – наприклад, у платіжних системах, торгівлі, логістиці. Хоча технології другого рівня та шардинг пропонують рішення, вони ще перебувають на стадії активного розвитку та не позбавлені власних недоліків.

Проблема безпеки смарт-контрактів також не втрачає актуальності. Незважаючи на криптографічну захищеність блокчейну як такого, смарт-контракти часто містять програмні помилки або вразливості, які можуть бути використані хакерами. Реальні приклади атак на DeFi-платформи, що призводили до крадіжки сотень мільйонів доларів, демонструють крихкість без належного аудиту та тестування. Відсутність усталених стандартів безпеки та сертифікації коду лише посилює цю загрозу.

Ще одним суттєвим недоліком є незворотність транзакцій. У разі помилки користувача, технічного збою або шахрайських дій виправити ситуацію практично неможливо. На відміну від традиційної банківської системи, де можливе оскарження або скасування операції, блокчейн не передбачає такої функціональності. Це підвищує відповідальність користувачів, але водночас робить систему менш гнучкою та менш дружньою до широкої аудиторії.

Екологічний аспект також викликає багато дискусій, особливо щодо мереж, які працюють на основі алгоритмів консенсусу Proof of Work. Високі енергетичні витрати таких систем призводять до значного вуглецевого сліду, що стало предметом критики з боку екологічних організацій та суспільства загалом. У ряді країн високі тарифи на електроенергію взагалі роблять локальне майнінг-впровадження економічно недоцільним або неможливим.

Крім цього, блокчейн-технології важко інтегрувати з традиційними ІТ-інфраструктурами компаній. Існуючі бізнес-процеси та системи управління (як-

от ERP, CRM, бухгалтерський облік) часто не сумісні з децентралізованою логікою блокчейну. Це вимагає значних витрат на адаптацію, перебудову або повну модернізацію IT-архітектури, що, у свою чергу, підвищує бар'єр входу для бізнесу.

Ще однією важливою проблемою є низький рівень обізнаності користувачів. Блокчейн, попри свою популярність у медіа, залишається складною для розуміння технологією. Багато людей не розуміють базових принципів функціонування гаманців, ключів, хешування, що призводить до типових помилок – втрати доступу до активів, неправильного введення адрес, довірливості до фішингових сайтів. Без належної освітньої роботи та інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів масове впровадження блокчейну залишатиметься під загрозою.

Окрема увага має бути приділена внутрішній централізації в нібито децентралізованих системах. На практиці частина блокчейн-проектів потерпає від концентрації влади у вузького кола розробників або інвесторів, що мають доступ до великої кількості токенів. У мережах на основі майнінгу домінують великі пули, які фактично контролюють значну частку хешрейту. Це знижує рівень децентралізації та створює ризики маніпуляцій, втрати довіри та перетворення блокчейну на чергову централізовану інфраструктуру – хоча й з іншими інструментами.

Усі ці проблеми і ризики мають бути глибоко проаналізовані до початку широкого впровадження блокчейн-технологій, особливо в таких критичних сферах, як державне управління, охорона здоров'я, банківська система або системи особистої ідентифікації. Вони вимагають не лише технологічних рішень, а й розвитку нових нормативних підходів, освітніх програм, етичних стандартів і міжнародного співробітництва. Без цього блокчейн ризикує залишитися інноваційною, але маргіналізованою технологією, потенціал якої так і не буде повністю реалізовано.

3.3 Перспективи розвитку блокчейн-технологій

Незважаючи на низку актуальних викликів, блокчейн-технології залишаються одним із найперспективніших напрямів розвитку цифрової економіки й мають потенціал стати фундаментом нової інформаційної інфраструктури у багатьох галузях. У найближчі 5–10 років очікується не просто зростання інтересу до блокчейну, а справжня трансформація способів взаємодії між людьми, організаціями, державами та технологіями. Однією з найбільш очевидних сфер, де блокчейн уже зараз формує нову реальність, є фінансовий сектор. Децентралізовані фінанси (DeFi) дають змогу створювати альтернативу традиційним банкам, забезпечуючи користувачам прямий доступ до інструментів кредитування, обміну, страхування та інвестування без участі посередників. Усе більше держав визнають потенціал таких систем, але водночас шукають шляхів до контролю і регуляції – саме тому розвиваються CBDC, тобто цифрові валюти центральних банків. Це дозволяє поєднати прозорість і ефективність блокчейну з регуляторними можливостями державних фінансових установ.

Ще однією важливою перспективою є застосування блокчейн-технологій у сфері державного управління. Ця технологія має потенціал перетворити підходи до публічного адміністрування, зробити їх прозорішими, справедливішими й менш вразливими до корупції. Наприклад, електронне голосування, засноване на блокчейні, може забезпечити найвищий рівень захисту виборчих процесів, де неможливо змінити результат без цифрового сліду. Аналогічно, державні реєстри нерухомості, бізнесу або земельних ділянок можуть стати повністю публічними, незмінними і доступними для перевірки в будь-який час. Це особливо важливо для країн, де проблема корупції й маніпуляцій із державною інформацією залишається актуальною. Смарт-контракти можуть бути використані як механізми автоматичного виконання державних зобов'язань, а аудит блокчейн-транзакцій дає змогу забезпечити повну підзвітність та запобігти шахрайству на рівні державних закупівель.

Освітній сектор також демонструє зацікавленість у можливостях, які пропонує блокчейн. Дипломи, сертифікати, результати тестувань можуть бути записані у блокчейн у вигляді незмінних записів, які легко перевірити, але неможливо підробити. Це відкриває двері до глобального визнання освітніх досягнень, усуває проблему фальшивих дипломів і полегшує міжнародну академічну мобільність. У свою чергу, це може стати каталізатором для створення глобальних баз академічних досягнень і спростити наймання на основі верифікованих компетенцій.

Логістика та ланцюги постачання – ще одна галузь, у якій блокчейн має надзвичайно високий потенціал. За допомогою децентралізованих реєстрів можливо фіксувати рух товарів на кожному етапі – від виробника до кінцевого споживача. Це створює умови для повної прозорості, сприяє зниженню рівня контрафактної продукції, дозволяє простежити походження товарів і перевірити добросовісність постачальників. Така система особливо важлива для харчової, фармацевтичної промисловості, а також для галузей, пов'язаних із постачанням критично важливих компонентів або обладнання.

Сфера охорони здоров'я також стоїть на порозі серйозних змін завдяки блокчейну. Однією з найважливіших проблем сучасної медицини є збереження приватності даних пацієнтів та одночасне забезпечення ефективного доступу до них для медичних фахівців. Блокчейн здатен забезпечити безпечне, децентралізоване зберігання історій хвороб, результатів аналізів, призначень. Пацієнт отримає можливість самостійно контролювати, хто і коли має доступ до його медичної інформації, а страхові компанії зможуть автоматизувати перевірку даних і виплату компенсацій через смарт-контракти. Це зменшує бюрократію, пришвидшує обслуговування і водночас забезпечує високий рівень конфіденційності.

Водночас розвиток блокчейну тісно пов'язаний із трансформацією самого інтернету – появою концепції Web3. У цій парадигмі користувачі не є просто споживачами контенту, а стають активними учасниками цифрової екосистеми, власниками своїх даних, цифрових активів та ідентичностей. У Web3 сервіси

будуються на децентралізованих протоколах, де жодна окрема компанія не контролює доступ чи політику роботи платформи. Це дозволяє створювати спільноти нового типу – DAO (децентралізовані автономні організації), які приймають рішення колективно, через голосування на блокчейні.

Окремо варто згадати перспективу широкої токенизації активів, яка відкриває нові горизонти для інвестування. Практично будь-який ресурс – від нерухомості до творів мистецтва – може бути представлений у вигляді токена, що полегшує обіг, підвищує ліквідність і знижує бар'єри для входу на ринки. Мікроінвестування стає можливим навіть для невеликих учасників ринку, а доступ до глобальних ринків більше не вимагає наявності банківського рахунку або посередників. Це посилює фінансову інклюзію, особливо в регіонах із низьким рівнем доступу до банківських послуг.

Україна, попри складні геополітичні умови, демонструє високий рівень готовності до впровадження блокчейн-рішень. У країні активно формуються правові засади для функціонування ринку віртуальних активів, держава проводить експерименти з цифровими сервісами на базі блокчейну, а під час війни криптовалюти та децентралізовані платформи використовуються як альтернативні засоби фінансування гуманітарних і військових ініціатив. У цьому контексті Україна може стати прикладом для інших країн, які шукають способи адаптації технологій до кризових умов.

Таким чином, попри наявні ризики, блокчейн має усі шанси стати стрижнем цифрової трансформації XXI століття. Але для реалізації цього потенціалу необхідно не тільки вдосконалювати технології, а й формувати довіру суспільства, забезпечити правову підтримку, підвищити цифрову грамотність і знайти баланс між децентралізацією та ефективним управлінням. Лише в такому разі блокчейн з експериментальної технології стане повноцінною складовою нової економічної та соціальної реальності.

ВИСНОВКИ

Блокчейн-технологія на сьогодні є однією з найінноваційніших і найперспективніших цифрових розробок, яка змінює підходи до зберігання, передачі та верифікації даних. Її ключові характеристики – децентралізованість, прозорість, незмінність інформації та криптографічна безпека – роблять її надзвичайно цінною у тих сферах, де критично важливі довіра, достовірність і захист інформації.

Сфера застосування блокчейну постійно розширюється: від фінансів, логістики та охорони здоров'я до державного управління, освіти, науки й навіть культури. У цих галузях технологія дозволяє автоматизувати процеси, зменшити витрати, запобігти шахрайству та підвищити загальну ефективність систем.

Втім, впровадження блокчейну супроводжується не лише перевагами. Воно потребує вирішення цілої низки викликів: технічних (масштабованість, інтеграція, енергоспоживання), правових (регуляторна невизначеність, захист персональних даних) та соціальних (цифрова грамотність, сприйняття нових моделей взаємодії). Подолання цих бар'єрів вимагає міждисциплінарного підходу, співпраці між державою, бізнесом і науковою спільнотою.

Разом із тим розвиток новітніх рішень – таких як міжланцюгова взаємодія, технології другого рівня (Layer 2), токенизація реальних активів, використання доказів з нульовим розголошенням (ZK-знання) та перехід до енергоефективних механізмів консенсусу – формує новий етап еволюції блокчейну. Ці тенденції значно посилюють його потенціал для широкого застосування в масштабах як окремих країн, так і глобальної цифрової інфраструктури.

У майбутньому блокчейн може стати фундаментом цифрової трансформації суспільства, забезпечуючи більш надійні, відкриті й стійкі інформаційні системи. Україна, яка активно впроваджує інновації у сфері електронного врядування, відкритих реєстрів та цифрової економіки, має реальний шанс бути серед лідерів у впровадженні цієї технології.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Academy B. What Is Blockchain and How Does It Work? | Binance Academy. Binance Academy. URL: <https://academy.binance.com/uk-UA/articles/what-is-blockchain-and-how-does-it-work>
2. Biznecat. Blockchain-технологія. Biznecat. URL: <https://biznecat.com/crypto/362-blockchain-tekhnologiya.html>
3. Drukarnia.com.ua. Блокчейн: основи та види. Drukarnia.com.ua. URL: https://drukarnia.com.ua/articles/blokchein-osnovi-ta-vidi-u_D5o
3. BeInCrypto. Пояснення Blockchain. BeInCrypto. URL: <https://ua.beincrypto.com/learn/poyasnennya-blockchain/>
4. Mingaleva Z.O., Ohorodnik O.V., Ostapenko S.P. Блокчейн як інноваційна технологія: сутність, проблеми та перспективи застосування. Zhytomyr State Technological University. URL: <http://eprints.zu.edu.ua/13902/1/Mingaleva3.pdf>
5. Academy B. Positives and Negatives of Blockchain. Binance Academy. Binance Academy. URL: <https://academy.binance.com/uk-UA/articles/positives-and-negatives-of-blockchain>
6. Ukrfintech. Перспективи розвитку блокчейн-технологій у фінансовому секторі. Ukrfintech. URL: <https://ukrfintech.com.ua/perspektivi-rozvitku-blokchejn-technologij-u-finansovomu-sektori/>
7. Cryptoznannya. Технології блокчейн у світі фінансів: переваги та виклики. Cryptoznannya. URL: <https://cryptoznannya.com.ua/technologii-blokchejn-u-sviti-finansiv-perevagi-ta-vikliki/>
8. WhiteBIT. Blockchain in Logistics. WhiteBIT Blog. URL: <https://blog.whitebit.com/uk/blockchain-in-logistics/>
9. Blogger. Blockchain in Logistics. Blogger. URL: <https://blockchaininlogistics.blogspot.com/>
10. Speka. Блокчейн у медицині: як він працює, реальні кейси, виклики та майбутнє. Speka. URL: <https://speka.media/blokchein-u-medicini-yak-vin-pracyuje-realni-keisi-vikliki-ta-maibutnje-9dex1o>

11. Merehead. Як запровадити блокчейн в медичній сфері. Merehead. URL: <https://merehead.com/ua/blog/implement-blockchain-in-health-industry/>

12. Klona.ua. Застосування блокчейну у державному секторі. Klona.ua. URL: <https://klona.ua/uk/blog/blog-uk/zastosuvannya-blokchejnu-u-derzhavnomu-sektori>

13. PSM7. Блокчейн у державному управлінні України: як ліки від корупції, рейдерства і бюрократії — думка експертів. PSM7. URL: <https://psm7.com/uk/analytics/blokchejn-u-derzhavnomu-upravlinni-ukra%D1%97ni-yak-liki-vid-korupci%D1%97-rejderstva-i-byurokrati%D1%97-dumka-ekspertiv.html>

14. Cryptosfera. Блокчейн у освіті: нові методи навчання. Cryptosfera. URL: <https://cryptosfera.com.ua/blokchejn-u-osviti-novi-metodi-navchannya/>

15. WhiteBIT. Blockchain in Education. WhiteBIT Blog. URL: <https://blog.whitebit.com/uk/blockchain-in-education/>

16. Julien Florkin. Технологія блокчейна. Julien Florkin. URL: <https://julienflorkin.com/uk/technology/blockchain/%D0%A2%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%8F-%D0%B1%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D1%87%D0%B5%D0%B9%D0%BD%D0%B0/>

17. Cryptosfera. Тенденції розвитку блокчейн-технологій у 2024 році. Cryptosfera. URL: <https://cryptosfera.com.ua/tendentsii-rozvitku-blokchejn-texnologij-u-2024-rotsi/>

18. H-X Technology. What is Blockchain Security? Examples, Issues, and Solutions. H-X Technology. URL: <https://www.h-x.technology/ua/blog-ua/what-is-blockchain-security-examples-issues-and-solutions-ua>

19. E-U University. Блокчейн у фінансових технологіях: перспективи та виклики. E-U University. URL: <https://irback.e-u.edu.ua/server/api/core/bitstreams/0292e97d-d2c6-4510-943e-9e5296bddb92/content>

Додаток А – Використання блокчейну у різних галузях

| Сфера | Переваги | Інновації | Інтеграція | Можливості | Виклики | Рекомендації / Висновки |
|---------------------------|--|---|-------------------------------------|--|---|---|
| Фінанси | Прозорість, безпека, швидкість | DeFi, смарт- контракти, токенізація | Банки впроваджують блокчейн | Автоматизація, ШІ, нові продукти | Регулювання, безпека, технічні бар'єри | Впровадження, освіта, партнерство |
| Логістика | Відстеження, прозорість, безпека | Смарт- контракти, ідентифікація | У логістичних компаніях | Довіра, цифровізація | Масштабування, стандарти, регулювання | Пілоты, державна підтримка, навчання |
| Медицина | Захист даних, незмінність, економія | Е-картки, обмін, відстеження ліків | Приватні блокчейни в лікарнях | Доступ до даних, боротьба з фальсифікацією | Вартість, знання, стандарти | Освіта, пілоты, стандарти |
| Держсектор | Прозорість, безпечні голоси, контроль | Е- голосування, реєстри, закупівлі | Перші впровадження | Боротьба з корупцією, ефективність | Технічність, правова база, кадри | Потенціал трансформації |
| Освіта і наука | Прозорість, автоматизація, зручність | Дипломи, портфоліо, рецензування | Впровадження в освіті | Довіра, глобальний обмін | Вартість, захист даних, стандарти | Довіра, інтеграція, розвиток |

