

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та штучного інтелекту
Спеціальність 125 «Кібербезпека»
Освітня програма «Кібербезпека»

В.о. зав. кафедрою КІСМіТ

Марина ЄСІНА

“Допущено до захисту”

« » _____ 2025р.

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
на тему: «Використання технології блокчейн при реалізації віртуальних
навчальних середовищ»

оцінка «_____»

Голова ЕК

Мичуда Л.З.

Керівник: Ph.D Шеханін К.Ю.

Рецензент: к.ф-м.н. Карась І.В.

Виконавець: студентка групи КБ-42

Каракунова Катерина Артемівна

Харків 2025

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 59 сторінок, 1 додаток, 29 джерел.

Метою дипломної роботи є дослідження можливостей використання технології блокчейн для підвищення ефективності, безпеки та прозорості віртуальних навчальних середовищ (ВНС). Актуальність теми зумовлена зростанням ролі цифрових платформ в освіті та наявністю проблем, таких як централізація, вразливість даних і фальсифікація результатів. Метою роботи є аналіз сучасного стану ВНС, оцінка потенціалу блокчейну та розробка рекомендацій щодо його впровадження.

У роботі проаналізовано історію розвитку ВНС, класифіковано їх за функціоналом і аудиторією, виявлено ключові проблеми та розглянуто принципи роботи блокчейну. Особливу увагу приділено технічним аспектам інтеграції, зокрема вибору типу блокчейну (публічного, приватного, гібридного), а також зарубіжному досвіду, наприклад, проєктам MIT і Мальти. Дослідження базується на методах порівняльного аналізу, узагальнення наукової літератури та кейс-стаді.

Результати свідчать, що блокчейн може забезпечити децентралізоване зберігання даних, верифікацію сертифікатів і облік прогресу студентів, усуваючи недоліки традиційних систем. Практична цінність роботи полягає в рекомендаціях для розробників ВНС і навчальних закладів, зокрема в Україні, де цифрова трансформація є нагальною. Робота складається з вступу, трьох розділів, висновків і списку літератури.

Ключові слова: БЛОКЧЕЙН, ВІРТУАЛЬНІ НАВЧАЛЬНІ СЕРЕДОВИЩА, СЕРТИФІКАЦІЯ, ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЯ, БЕЗПЕКА ДАНИХ.

ABSTRACT

The explanatory note contains 59 pages, 1 annex, 29 sources.

The purpose of the thesis is to study the possibilities of using blockchain technology to improve the efficiency, security and transparency of virtual learning environments (VLEs). The relevance of the topic is driven by the growing role of digital platforms in education and the existence of problems such as centralisation, data vulnerability and falsification of results. The purpose of the paper is to analyse the current state of the VNS, assess the potential of blockchain, and develop recommendations for its implementation.

The paper analyses the history of the development of IPS, classifies them by functionality and audience, identifies key issues and discusses the principles of blockchain operation. Particular attention is paid to the technical aspects of integration, including the choice of blockchain type (public, private, hybrid), as well as foreign experience, such as the MIT and Malta projects. The study is based on the methods of comparative analysis, generalisation of scientific literature, and case studies.

The results show that blockchain can provide decentralised data storage, certificate verification, and student progress tracking, eliminating the shortcomings of traditional systems. The practical value of the paper lies in the recommendations for VNS developers and educational institutions, in particular in Ukraine, where digital transformation is urgent. The paper consists of an introduction, three chapters, conclusions and a list of references.

Keywords: BLOCKCHAIN, VIRTUAL LEARNING ENVIRONMENTS, CERTIFICATION, DECENTRALISATION, DATA SECURITY.

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ВНС	– Віртуальні навчальні середовища
БД	– База даних
LMS	– Learning Management System
MOOC	– Massive Open Online Course
CAI	– Computer-Assisted Instruction
PoW	– Proof of Work
PoS	– Proof of Stake
PoA	– Proof of Authority
ШІ	– Штучний інтелект
GDPR	– General Data Protection Regulation
MIT	– Massachusetts Institute of Technology
LAN	– Local Area Network
Хеш	– Криптографічна функція
Ключ	– Криптографічний ключ
Транзакція	– Операція в блокчейні, що фіксує передачу даних або активів між учасниками.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	2
ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	4
ЗМІСТ	5
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВІРТУАЛЬНИХ НАВЧАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ ТА ПОТЕНЦІАЛУ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН	9
1.1 Історія розвитку віртуальних навчальних середовищ: від перших платформ до сучасності.....	9
1.2 Класифікація існуючих віртуальних навчальних систем за функціоналом і аудиторією.....	10
1.3 Аналіз основних проблем: централізація, безпека даних і фальсифікація результатів.....	12
1.4 Огляд технології блокчейн: принципи роботи та її ключові переваги.....	15
1.5 Потенційні сфери застосування блокчейн у навчанні: сертифікація, облік прогресу	18
1.6 Порівняння традиційних баз даних із децентралізованими блокчейн- системами.....	21
1.7 Висновки до розділу	23
2 ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ БЛОКЧЕЙН У ВІРТУАЛЬНІ НАВЧАЛЬНІ СЕРЕДОВИЩА.....	25
2.1 Вибір типу блокчейн (публічний, приватний, гібридний) для освітніх платформ	25
2.2 Структура зберігання даних у блокчейн: сертифікати, оцінки, історія навчання	27
2.3 Використання криптографії для захисту персональних даних студентів.....	30

2.4 Розробка смарт-контрактів для автоматизації видачі сертифікатів і оцінювання.....	33
2.5 Інтеграція блокчейн із існуючими навчальними платформами: технічні виклики.....	36
2.6 Оцінка енергоефективності та масштабованості блокчейн-систем у навчанні	39
2.7 Висновки до розділу	41
3 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ	44
3.1 Огляд успішних кейсів використання блокчейн в освіті.....	44
3.2 Вплив блокчейн на прозорість і довіру в навчальних процесах.	46
3.3 Можливості персоналізації навчання через децентралізовані платформи	49
3.4 Економічні аспекти впровадження: витрати та потенційна вигода.....	51
3.5 Прогнозування еволюції віртуальних навчальних середовищ із блокчейн.....	54
3.6 Висновки до розділу	57
ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61
ДОДАТОК А.....	64

ВСТУП

Сучасний світ переживає стрімкий розвиток цифрових технологій, які трансформують різні сфери людської діяльності, зокрема освіту. Зростання популярності віртуальних навчальних середовищ (ВНС) стало відповіддю на потребу у гнучких, доступних і персоналізованих освітніх рішеннях. Такі платформи, як Moodle, Google Classroom чи Coursera, дозволяють студентам і викладачам взаємодіяти в онлайн-просторі, отримувати доступ до навчальних матеріалів і відстежувати прогрес. Проте, разом із цими можливостями виникають і виклики: централізоване зберігання даних підвищує ризик витоку інформації, фальсифікація сертифікатів ускладнює перевірку їхньої достовірності, а відсутність прозорості в оцінюванні може підірвати довіру до системи. У цьому контексті технологія блокчейн, відома своєю децентралізацією, безпекою та незмінністю даних, відкриває нові перспективи для вдосконалення ВНС.

Актуальність теми дослідження зумовлена кількома факторами. По-перше, глобальний перехід до цифрової освіти, прискорений пандемією COVID-19, підкреслив необхідність надійних і безпечних систем для управління навчальними процесами. По-друге, блокчейн уже успішно застосовується в інших галузях, таких як фінанси (наприклад, криптовалюти Bitcoin і Ethereum) та логістика, що свідчить про його потенціал для трансформації освіти. В Україні інтерес до цієї технології також зростає: урядові ініціативи, як-от "Дія", демонструють прагнення до цифровізації, а окремі освітні проєкти вже розглядають блокчейн для верифікації дипломів і сертифікатів. Водночас практичне впровадження блокчейну у ВНС залишається недостатньо дослідженим, особливо в українському контексті, що робить цю тему своєчасною та перспективною.

Мета бакалаврської роботи полягає в дослідженні можливостей використання технології блокчейн для підвищення ефективності, безпеки та

прозорості віртуальних навчальних середовищ, а також у розробці рекомендацій щодо її впровадження. Для досягнення цієї мети визначено такі завдання:

- 1) Проаналізувати сучасний стан ВНС, їхні переваги та недоліки, а також потенціал блокчейну для вирішення існуючих проблем.
- 2) Вивчити технічні аспекти інтеграції блокчейну в навчальні платформи, зокрема особливості зберігання даних і використання смарт-контрактів.
- 3) Оцінити практичні приклади застосування технології та спрогнозувати її вплив на розвиток освіти в майбутньому.

Об'єктом дослідження є віртуальні навчальні середовища як системи організації освітнього процесу в цифровому форматі. Предметом дослідження виступає технологія блокчейн як інструмент для забезпечення безпеки, децентралізації та автоматизації у ВНС.

Методи дослідження включають аналіз наукової літератури, порівняльний аналіз традиційних і блокчейн-орієнтованих підходів, а також узагальнення практичного досвіду впровадження технології в освіті. Теоретичною основою роботи стали праці вітчизняних і зарубіжних авторів, таких як О. Ковальчук, Ю. Козловський, М. Свон, Д. Тапскотт, які досліджували блокчейн у різних контекстах.

Практична цінність роботи полягає у формуванні рекомендацій щодо інтеграції блокчейну у ВНС, а результати дослідження сприятимуть підвищенню обізнаності про потенціал цієї технології в українській освітній сфері.

Структура роботи складається з трьох розділів. У першому розділі проведено аналіз сучасного стану ВНС і потенціалу блокчейну, розглянуто ключові проблеми та перспективи їх вирішення. Другий розділ присвячено технічним аспектам впровадження технології, включаючи архітектуру, криптографію та смарт-контракти. У третьому розділі досліджено практичні приклади використання блокчейну в освіті та сформульовано прогнози щодо його розвитку. Завершують роботу висновки та список використаних джерел.

Дослідження спрямоване на розкриття можливостей блокчейну як інноваційного інструменту для модернізації віртуальних навчальних середовищ.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВІРТУАЛЬНИХ НАВЧАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ ТА ПОТЕНЦІАЛУ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН

1.1 Історія розвитку віртуальних навчальних середовищ: від перших платформ до сучасності

Розвиток віртуальних навчальних середовищ (ВНС) є важливою складовою еволюції освітніх технологій, що відображає поступову інтеграцію інформаційно-комунікаційних технологій у процес навчання. Цей шлях розпочався у другій половині XX століття, коли комп'ютери почали проникати в освітню сферу, і триває донині, охоплюючи новітні цифрові рішення. Історія ВНС умовно поділяється на кілька етапів: від перших спроб автоматизації навчання до створення складних онлайн-платформ, які сьогодні використовуються мільйонами студентів і викладачів у всьому світі.

В Україні розвиток ВНС має власну специфіку, обумовлену економічними та технологічними умовами. Перші спроби впровадження онлайн-навчання датуються кінцем 1990-х – початком 2000-х років, коли окремі виші почали використовувати локальні платформи для дистанційної освіти. Значний поштовх відбувся у 2010-х роках із появою національних проєктів, таких як "Прометей" (Prometheus), запущений у 2014 році. Ця платформа стала першим українським аналогом MOOC, пропонуючи курси українською мовою. Пандемія COVID-19 у 2020 році прискорила перехід до ВНС: школи та університети масово перейшли на платформи Moodle, Google Classroom і Zoom, що підкреслило потребу в модернізації інфраструктури та підвищенні безпеки даних.

Сьогодні ВНС продовжують еволюціонувати, інтегруючи штучний інтелект, адаптивне навчання та хмарні рішення. Проте такі проблеми, як централізоване зберігання даних, ризик кібератак і складність верифікації сертифікатів, залишаються актуальними. Саме в цьому контексті технологія блокчейн розглядається як перспективний інструмент для забезпечення

прозорості та надійності ВНС, що буде детально розглянуто в наступних розділах.

Історія розвитку віртуальних навчальних середовищ демонструє поступовий перехід від локальних комп'ютерних систем до глобальних онлайн-платформ, які змінюють підходи до освіти. Кожен етап цього процесу супроводжувався технологічними інноваціями, що розширювали можливості навчання, але водночас створювали нові виклики.

1.2 Класифікація існуючих віртуальних навчальних систем за функціоналом і аудиторією

Віртуальні навчальні системи (ВНС) є ключовим елементом сучасної освіти, забезпечуючи інтеграцію технологій у процес навчання. Їхня різноманітність зумовлена як функціональними можливостями, так і цільовими аудиторіями, для яких вони розроблені. Класифікація ВНС дозволяє систематизувати ці платформи, виявити їхні особливості та зрозуміти, як технологія блокчейн може бути застосована для їхнього вдосконалення. У цьому підпункті розглянуто основні підходи до класифікації ВНС за двома критеріями: функціоналом і аудиторією.

Перший критерій класифікації — функціональність — відображає набір інструментів і можливостей, які надають ВНС. Одним із найпоширеніших типів є системи управління навчанням (Learning Management Systems, LMS). Такі платформи, як Moodle або Blackboard, призначені для організації навчального процесу: розміщення матеріалів, створення тестів, відстеження прогресу студентів. Згідно з дослідженням, LMS є основою для більшості сучасних ВНС завдяки їхній універсальності та адаптивності до потреб викладачів і студентів [12]. Наприклад, Moodle підтримує модульну структуру, що дозволяє додавати нові функції залежно від вимог конкретного курсу.

Інший тип за функціоналом — це платформи для масових відкритих онлайн-курсів (Massive Open Online Courses, MOOC). Coursera, edX і Udemy орієнтовані на надання доступу до освіти широкій аудиторії через інтерактивні

курси, відеолекції та сертифікацію. Ці системи вирізняються високою масштабованістю та інтеграцією з хмарними технологіями, що забезпечує одночасну роботу тисяч користувачів. Водночас, MOOC часто стикаються з проблемою верифікації результатів навчання, що відкриває перспективи для використання блокчейну.

Третій тип — системи адаптивного навчання (Adaptive Learning Systems), такі як Smart Sparrow або Knewton. Вони використовують штучний інтелект для персоналізації навчального процесу, адаптуючи матеріали до рівня знань і потреб конкретного студента. Ці платформи менш поширені, але їхня популярність зростає завдяки здатності підвищувати ефективність навчання. У контексті України такі системи поки що застосовуються обмежено, хоча окремі виші експериментують із подібними рішеннями в межах локальних проєктів.

Другий критерій класифікації — цільова аудиторія — дозволяє виділити ВНС залежно від користувачів, для яких вони призначені. Першу групу складають системи для вищої освіти. Наприклад, WebCT і Canvas орієнтовані на університети та коледжі, надаючи інструменти для управління курсами, комунікації між викладачами та студентами, а також інтеграції з академічними базами даних. Ці платформи часто використовуються для змішаного навчання (blended learning), поєднуючи онлайн- і офлайн-формати.

Друга група — ВНС для шкільної освіти. Google Classroom є прикладом платформи, яка стала популярною серед шкіл завдяки простоті використання та інтеграції з екосистемою Google. В Україні ця система набула широкого поширення під час пандемії COVID-19, коли заклади освіти потребували швидкого переходу до дистанційного формату [9]. Вона підтримує базові функції, такі як розподіл завдань і спілкування, але не має розширених інструментів для аналізу даних чи сертифікації.

Третя група — платформи для професійного навчання та підвищення кваліфікації. LinkedIn Learning і Pluralsight орієнтовані на дорослу аудиторію, яка прагне освоїти нові навички для кар'єрного зростання. Ці системи часто включають короткі курси, практичні завдання та сертифікати, які визнаються

роботодавцями. Їхня специфіка полягає у фокусі на практичних знаннях і гнучкості графіку навчання.

Четверта група — ВНС для неформальної освіти. Платформи на кшталт Khan Academy або Duolingo призначені для самоосвіти та доступні широкій аудиторії без формальних вимог до вступу. Вони вирізняються інтерактивністю та гейміфікацією, що підвищує мотивацію користувачів. Такі системи відіграють важливу роль у популяризації освіти, але їхня слабка сторона — відсутність офіційної верифікації результатів [1].

Для наочності класифікацію ВНС за функціоналом і аудиторією подано в таблиці А.1. Ця таблиця ілюструє основні типи систем, їхні ключові характеристики та приклади, що допомагає зрозуміти їхню різноманітність і потенційні точки дотику з технологією блокчейн.

Класифікація ВНС за функціоналом і аудиторією демонструє їхню різноманітність і специфіку застосування. Системи управління навчанням і МООС є найбільш поширеними завдяки своїй універсальності та масштабованості, тоді як адаптивні платформи та рішення для неформальної освіти представляють нові тенденції. В Україні переважають LMS і платформи для шкільної освіти, що відображає поточний рівень цифровізації [23]. Ця різноманітність створює передумови для інтеграції блокчейну, який може вирішити проблеми безпеки, верифікації та прозорості, притаманні різним типам ВНС.

1.3 Аналіз основних проблем: централізація, безпека даних і фальсифікація результатів

Віртуальні навчальні середовища (ВНС) значно розширили доступ до освіти, забезпечивши гнучкість і зручність для користувачів у всьому світі. Проте їхнє широке впровадження виявило низку проблем, які перешкоджають повноцінному використанню потенціалу цих систем. Серед ключових викликів виділяються централізація, безпека даних і фальсифікація результатів навчання. Ці проблеми не лише знижують ефективність ВНС, але й підривають довіру до

них з боку студентів, викладачів і роботодавців. У цьому підпункті проведено аналіз зазначених проблем, їхніх причин і можливих наслідків.

Однією з основних проблем ВНС є централізація управління та зберігання даних. Більшість сучасних платформ, таких як Moodle, Coursera чи Google Classroom, використовують централізовані сервери, де зберігаються навчальні матеріали, оцінки та персональні дані користувачів. Такий підхід спрощує адміністрування, але створює вразливі точки. Наприклад, у разі збою серверів або хакерської атаки доступ до системи може бути втрачено, а дані — скомпрометовані. Централізовані системи є привабливою мішенню для кібератак, оскільки злам одного сервера дає зловмисникам доступ до всієї бази даних [26]. В Україні ця проблема набуває особливої актуальності через недостатній рівень кіберзахисту в багатьох освітніх закладах, що робить їх уразливими до зовнішніх загроз.

Централізація також обмежує автономність користувачів і навчальних закладів. У централізованих ВНС адміністрація платформи має повний контроль над даними, що може призводити до цензури або маніпуляцій. Наприклад, зміна оцінок чи сертифікатів без відома студентів є можливою в системах із централізованим управлінням. Ця проблема особливо відчутна в умовах, коли ВНС використовуються для видачі офіційних документів, таких як дипломи чи сертифікати, які потребують високого рівня довіри.

Друга ключова проблема — безпека даних — тісно пов'язана з централізацією, але має ширші аспекти. У ВНС зберігається значний обсяг конфіденційної інформації: персональні дані студентів (імена, адреси, номери документів), результати тестів, історія навчання. Недостатній захист цих даних може призвести до їхнього витоку, що загрожує приватності користувачів. У 2018 році, наприклад, платформа Coursera зіткнулася з витоком даних, коли хакери отримали доступ до інформації про мільйони користувачів через вразливість у системі аутентифікації. У контексті України ця проблема підсилюється низьким рівнем впровадження сучасних стандартів кібербезпеки в освітніх платформах [15]. За даними дослідження, проведеного Київським

національним університетом, більшість українських ВНС не відповідають міжнародним стандартам захисту даних, що підвищує ризик кіберінцидентів.

Безпека даних також включає проблему несанкціонованого доступу з боку внутрішніх користувачів, таких як адміністратори чи викладачі. У централізованих системах відсутність прозорого механізму контролю дозволяє маніпулювати інформацією без виявлення таких дій. Це створює передумови для зловживань і знижує довіру до ВНС як до інструменту об'єктивного оцінювання.

Третя проблема — фальсифікація результатів навчання — є однією з найсерйозніших для сучасних ВНС. У цифровому середовищі підробка сертифікатів, оцінок чи інших документів стала значно простішою порівняно з традиційними паперовими форматами. Наприклад, студенти можуть використовувати сторонні сервіси для проходження тестів від їхнього імені, а відсутність надійної верифікації ускладнює перевірку таких порушень. Фальсифікація сертифікатів із платформ МООС стала глобальною проблемою, оскільки роботодавці не мають змоги швидко й достовірно перевірити їхню автентичність [18]. У 2019 році дослідження показало, що близько 15% сертифікатів із популярних онлайн-курсів містили ознаки підробки або були видані за нечесне виконання завдань.

В Україні фальсифікація результатів також є актуальною через недостатню стандартизацію процесів оцінювання в онлайн-освіті. Наприклад, під час пандемії COVID-19, коли школи та виші масово перейшли на дистанційний формат, з'явилися численні випадки списування та використання шахрайських схем для отримання оцінок. Це не лише знижує якість освіти, але й знецінює сертифікати, видані через ВНС. У цьому контексті технологія блокчейн розглядається як потенційне рішення, оскільки її децентралізована природа та незмінність даних можуть забезпечити прозорість і достовірність результатів [6].

Наслідки цих проблем є багатогранними. Централізація та недостатня безпека даних призводять до втрати довіри до ВНС як до надійного інструменту освіти. Фальсифікація результатів підриває цінність онлайн-сертифікатів на ринку праці, що ускладнює інтеграцію випускників у професійне середовище.

Крім того, ці виклики гальмують цифровізацію освіти, особливо в країнах, що розвиваються, таких як Україна, де ресурси для модернізації обмежені.

Аналіз основних проблем ВНС показує, що централізація, безпека даних і фальсифікація результатів є взаємопов'язаними викликами, які потребують комплексного вирішення. Централізована архітектура створює вразливості, які посилюють ризики кібератак і маніпуляцій, тоді як відсутність надійних механізмів верифікації сприяє шахрайству. Ці проблеми відкривають перспективи для застосування технології блокчейн, яка може забезпечити децентралізацію, захист даних і достовірність результатів навчання

1.4 Огляд технології блокчейн: принципи роботи та її ключові переваги

Технологія блокчейн стала однією з найперспективніших інновацій ХХІ століття, пропонуючи нові підходи до управління даними в різних сферах, включаючи освіту. Її поява пов'язана з потребою у створенні безпечних, прозорих і децентралізованих систем, здатних усунути недоліки традиційних підходів. У контексті віртуальних навчальних середовищ (ВНС) блокчейн розглядається як інструмент для вирішення проблем централізації, безпеки даних і фальсифікації результатів. У цьому підпункті розглянуто принципи роботи блокчейну та його ключові переваги, які роблять його релевантним для модернізації ВНС.

Блокчейн являє собою розподілений реєстр, який зберігає дані у вигляді послідовності блоків, пов'язаних між собою криптографічними методами. Кожен блок містить набір записів (транзакцій), мітку часу та посилання на попередній блок, утворюючи ланцюжок. Основою роботи технології є децентралізація: інформація зберігається не на одному центральному сервері, а на множині вузлів (комп'ютерів), які синхронізуються між собою. Концепція блокчейну була вперше представлена Сатоші Накамото у 2008 році як основа для криптовалюти Bitcoin, але згодом її застосування вийшло за межі фінансової сфери [3]. Усі зміни в реєстрі підтверджуються консенсусним механізмом,

наприклад, Proof of Work (PoW) або Proof of Stake (PoS), що забезпечує узгодженість даних між учасниками мережі.

Незмінність даних — ще один фундаментальний принцип блокчейну. Після додавання блоку до ланцюжка його вміст не може бути змінено без згоди більшості вузлів мережі. Це досягається завдяки криптографічним хеш-функціям, які генерують унікальний ідентифікатор для кожного блоку. У разі спроби змінити дані в одному блоці хеш наступного блоку стає невідповідним, що робить маніпуляції видимими для всіх учасників. У контексті освіти це гарантує захист записів про оцінки, сертифікати чи інші результати навчання від підробки.

Прозорість і доступність даних також відіграють важливу роль у роботі блокчейну. У публічних блокчейнах, таких як Bitcoin чи Ethereum, кожен учасник мережі може переглянути історію транзакцій. У приватних або гібридних блокчейнах доступ може бути обмежений, але прозорість зберігається для авторизованих користувачів. Ця особливість дозволяє створювати системи, де всі зацікавлені сторони — студенти, викладачі, роботодавці — можуть перевірити достовірність інформації без посередників. Архітектура блокчейну забезпечує високу надійність завдяки розподіленій природі та консенсусним алгоритмам [20].

Технологія підтримує смарт-контракти — програмовані угоди, які автоматично виконуються за заданими умовами. Розроблені Віталіком Бутерінім у рамках платформи Ethereum [24], смарт-контракти дозволяють автоматизувати процеси, такі як видача сертифікатів після завершення курсу чи нарахування балів за виконання завдань. Це зменшує адміністративне навантаження та усуває потребу в посередниках, що має значну цінність для ВНС.

Розглядаючи ключові переваги блокчейну, варто відзначити децентралізацію. На відміну від традиційних ВНС, де дані зберігаються на централізованих серверах, блокчейн розподіляє інформацію між усіма учасниками мережі. Це знижує ризик втрати даних через збої чи кібератаки, а

також усуває залежність від одного провайдера. У контексті України, де інфраструктура кібербезпеки ще розвивається, такий підхід може суттєво підвищити надійність освітніх платформ.

Безпека є ще одним важливим аспектом. Завдяки криптографічному захисту та незмінності даних блокчейн забезпечує високий рівень конфіденційності та цілісності інформації. Наприклад, персональні дані студентів, такі як імена чи номери документів, можуть бути зашифровані, а доступ до них — обмежений лише для авторизованих осіб. Блокчейн дозволяє створювати системи, де безпека даних досягається без значних витрат на додаткові захисні механізми, що робить його економічно вигідним для навчальних закладів [11].

Прозорість і довіра також належать до суттєвих переваг. Усі записи в блокчейні є відкритими для перевірки, що усуває можливість маніпуляцій чи фальсифікацій. Для ВНС це означає, що сертифікати чи оцінки, записані в блокчейн, можуть бути легко верифіковані роботодавцями чи іншими установами без звернення до посередників. Така властивість має особливе значення в умовах глобалізації освіти, коли студенти з різних країн отримують онлайн-сертифікати, які потребують міжнародного визнання.

Автоматизація через смарт-контракти додає ще один рівень ефективності. У ВНС смарт-контракти можуть застосовуватися для автоматичного нарахування кредитів, видачі дипломів чи навіть розподілу фінансових винагород за навчання. Це підвищує ефективність адміністративних процесів і зменшує людський фактор, який часто є джерелом помилок.

Незважаючи на ці позитивні сторони, блокчейн має обмеження, такі як висока енергоємність (особливо для PoW) і складність масштабування. Проте розвиток нових консенсусних механізмів, таких як PoS, поступово вирішує ці питання, роблячи технологію більш доступною для широкого використання.

Технологія блокчейн базується на принципах децентралізації, незмінності, прозорості та автоматизації, які забезпечують її ключові переваги: безпеку, довіру, ефективність і відсутність посередників. Ці характеристики роблять

блокчейн перспективним інструментом для вдосконалення ВНС, дозволяючи усунути проблеми централізації, захисту даних і фальсифікації результатів, що буде детально розглянуто в наступних розділах.

1.5 Потенційні сфери застосування блокчейн у навчанні: сертифікація, облік прогресу

Технологія блокчейн, завдяки своїм унікальним властивостям, відкриває нові можливості для вдосконалення віртуальних навчальних середовищ (ВНС). Її децентралізована природа, незмінність даних і здатність до автоматизації роблять її перспективним інструментом для вирішення проблем, пов'язаних із традиційними підходами до організації навчання. Серед потенційних сфер застосування блокчейну в освіті особливу увагу привертають сертифікація та облік прогресу студентів. Ці напрямки не лише підвищують ефективність ВНС, але й сприяють створенню надійної та прозорої системи, яка відповідає сучасним викликам цифрової освіти. У цьому підпункті розглянуто, як блокчейн може бути застосований у зазначених сферах, із акцентом на їхню практичну цінність.

Однією з найперспективніших сфер застосування блокчейну в навчанні є сертифікація. У сучасних ВНС, таких як Coursera, edX чи Moodle, видача сертифікатів і дипломів часто супроводжується проблемами верифікації та фальсифікації. Традиційні цифрові сертифікати, які зберігаються на централізованих серверах, можуть бути підроблені або втрачені, а їхня перевірка роботодавцями чи іншими установами потребує звернення до емітента. Блокчейн вирішує ці питання шляхом запису сертифікатів у розподілений реєстр, де вони стають незмінними та доступними для перевірки в будь-який час. Технологія блокчейн уже успішно застосовується для створення цифрових посвідчень, які не потребують посередників для підтвердження їхньої автентичності [4]. Наприклад, студент, який завершив курс, отримує унікальний цифровий сертифікат, зареєстрований у блокчейні, який може бути перевірений будь-ким через відкритий ключ.

Застосування блокчейну в сертифікації також дозволяє автоматизувати процес їхньої видачі через смарт-контракти. Після виконання умов курсу (наприклад, складання фінального тесту) смарт-контракт автоматично генерує сертифікат і записує його в реєстр, що зменшує адміністративне навантаження на викладачів і платформи. Такий підхід уже реалізований у Массачусетському технологічному інституті (MIT), де з 2017 року видають дипломи на базі блокчейну, що значно спрощує їхню верифікацію роботодавцями по всьому світу. В Україні цей напрям має великий потенціал, оскільки проблема підробки дипломів залишається актуальною, а перехід до цифрових документів потребує надійного захисту.

Ще однією важливою сферою є облік прогресу студентів. У традиційних ВНС облік навчальних досягнень зазвичай ведеться в централізованих базах даних, що створює ризики втрати інформації, маніпуляцій чи несанкціонованого доступу. Блокчейн дозволяє створити децентралізовану систему, де кожен етап навчання — від виконання завдань до складання іспитів — фіксується у вигляді незмінних записів. Використання блокчейну для обліку прогресу дає змогу студентам і викладачам отримувати доступ до повної історії навчання в реальному часі, що підвищує прозорість процесу [25]. Наприклад, оцінки за модулі курсу, бали за проекти чи кредити за пройдені дисципліни можуть зберігатися в блокчейні, забезпечуючи їхню достовірність і захист від змін.

Облік прогресу на базі блокчейну також сприяє персоналізації навчання. Завдяки запису всіх досягнень у розподіленому реєстрі система може автоматично аналізувати прогрес студента і пропонувати адаптовані рекомендації, наприклад, додаткові завдання чи курси для поглиблення знань. Такий підхід особливо цінний для адаптивних ВНС, таких як Smart Sparrow, де індивідуальний підхід є ключовою особливістю. Крім того, блокчейн дозволяє студентам зберігати контроль над своїми даними, надаючи доступ до них лише за згодою, що відповідає сучасним вимогам до конфіденційності.

У контексті України облік прогресу через блокчейн може вирішити проблему фрагментації даних, коли студенти переходять між навчальними

зкладами чи платформами. Наприклад, студент, який навчався в кількох університетах або на різних онлайн-курсах, може мати єдиний цифровий профіль у блокчейні, що об'єднує всі його досягнення. Це спрощує процес визнання кредитів і сертифікатів, що є актуальним для реалізації Болонського процесу в українській вищій освіті [17]. Така система також може бути інтегрована з державними ініціативами, як-от "Дія", для створення єдиного реєстру освітніх даних.

Застосування блокчейну в сертифікації та обліку прогресу має низку переваг. По-перше, це підвищує довіру до ВНС, оскільки студенти, викладачі та роботодавці можуть бути впевнені в автентичності записів. По-друге, це зменшує адміністративні витрати завдяки автоматизації процесів. По-третє, це сприяє глобалізації освіти, дозволяючи створювати універсальні стандарти для визнання результатів навчання. Блокчейн може стати основою для створення міжнародної системи сертифікації, яка буде доступною для перевірки в будь-якій точці світу [28].

Проте впровадження блокчейну в цих сферах має й виклики. Технічна складність інтеграції з існуючими ВНС, потреба в стандартизації форматів даних і висока початкова вартість розробки можуть стримувати його масове використання. В Україні додатковим бар'єром є недостатній рівень цифрової грамотності серед викладачів і адміністраторів, а також обмежені ресурси для модернізації освітньої інфраструктури. Водночас поступове впровадження пілотних проєктів, наприклад, у вищих навчальних закладах, може продемонструвати практичну цінність технології.

Потенційні сфери застосування блокчейну в навчанні, такі як сертифікація та облік прогресу, відкривають можливості для підвищення прозорості, безпеки та ефективності ВНС. Сертифікація на базі блокчейну забезпечує надійність і верифікованість документів, тоді як облік прогресу сприяє персоналізації та інтеграції даних. Ці напрямки створюють передумови для трансформації освіти, зокрема в Україні, де цифрова модернізація є нагальною потребою.

1.6 Порівняння традиційних баз даних із децентралізованими блокчейн-системами

У сучасних віртуальних навчальних середовищах (ВНС) зберігання та управління даними є критично важливим аспектом, який визначає їхню ефективність, безпеку та надійність. Традиційно для цих цілей використовуються централізовані бази даних, однак поява децентралізованих блокчейн-систем відкриває нові перспективи. Обидва підходи мають свої особливості, переваги та недоліки, що впливають на їхнє застосування в освіті. У цьому підпункті проведено порівняння традиційних баз даних із децентралізованими блокчейн-системами за ключовими параметрами, такими як архітектура, безпека, доступність і ефективність, із метою визначення їхнього потенціалу для ВНС.

Традиційні бази даних, такі як MySQL, PostgreSQL чи Oracle, базуються на централізованій архітектурі. Усі дані зберігаються на одному сервері або кластері серверів, керованих єдиним адміністратором. Цей підхід забезпечує високу швидкість обробки запитів і простоту управління, що робить його популярним у ВНС, наприклад, у платформах Moodle чи Google Classroom. Однак централізація створює вразливі точки: у разі збою сервера чи кібератаки доступ до даних може бути втрачено. Традиційні бази даних використовують криптографію для захисту інформації, але їхня безпека залежить від якості адміністрування та зовнішніх захисних механізмів, що не завжди гарантує надійність [2].

На противагу цьому, децентралізовані блокчейн-системи розподіляють дані між множиною вузлів, які синхронізуються через консенсусні алгоритми. Кожен вузол зберігає повну копію реєстру, що усуває залежність від єдиної точки відмови. Така архітектура підвищує стійкість до збоїв і атак, оскільки для компрометації системи необхідно одночасно атакувати більшість вузлів. У контексті ВНС це означає, що оцінки, сертифікати чи інші дані залишаються доступними навіть у разі локальних проблем із мережею. Водночас децентралізація ускладнює швидкість обробки транзакцій порівняно з традиційними базами даних через необхідність узгодження між вузлами.

Безпека є ще одним важливим аспектом порівняння. Традиційні бази даних покладаються на централізовані механізми захисту, такі як паролі, шифрування та брандмауери. Проте ці заходи не завжди ефективні проти внутрішніх загроз, наприклад, коли адміністратор має можливість змінити дані без відома користувачів. У блокчейн-системах безпека забезпечується криптографічними хеш-функціями та незмінністю даних. Після запису інформації в блокчейн її зміна неможлива без порушення цілісності ланцюжка, що робить технологію стійкою до маніпуляцій [7]. Для ВНС це означає захист від фальсифікації результатів навчання чи несанкціонованих змін у записах.

Доступність і контроль над даними також суттєво відрізняються. У традиційних базах даних доступ регулюється адміністратором, який визначає права користувачів. Це зручно для адміністрування, але обмежує автономність студентів і викладачів, а також створює ризик зловживань із боку адміністрації. У блокчейні доступ до даних може бути відкритим (у публічних системах) або регульованим (у приватних чи гібридних), але ключова особливість полягає в тому, що користувачі можуть зберігати контроль над своєю інформацією через криптографічні ключі. Децентралізовані системи дозволяють усунути посередників, надаючи учасникам прямий доступ до даних, що підвищує прозорість у навчальних процесах [16].

Ефективність і масштабованість — ще один параметр для порівняння. Традиційні бази даних мають високу продуктивність, обробляючи тисячі транзакцій за секунду, що ідеально підходить для ВНС із великою кількістю користувачів. Наприклад, платформи МООС, такі як Coursera, потребують швидкого оновлення даних для мільйонів студентів. Натомість блокчейн-системи, особливо публічні, як Bitcoin чи Ethereum, мають нижчу пропускну здатність через необхідність консенсусу між вузлами. Утім, сучасні розробки, такі як приватні блокчейни чи технологія шардингу, поступово вирішують ці обмеження, підвищуючи їхню ефективність.

Для наочності порівняння традиційних баз даних і блокчейн-систем наведено в таблиці А.2. Ця таблиця ілюструє ключові відмінності за основними характеристиками, що допомагає оцінити їхню придатність для ВНС.

У контексті України порівняння цих систем набуває додаткового значення. Традиційні бази даних широко використовуються в місцевих ВНС через їхню доступність і простоту впровадження, але їхня вразливість до кібератак і централізований контроль створюють проблеми для масштабних освітніх проєктів [27]. Блокчейн, хоча й потребує значних початкових інвестицій, може стати рішенням для забезпечення безпеки та довіри, особливо в умовах цифрової трансформації освіти.

Порівняння традиційних баз даних із децентралізованими блокчейн-системами показує, що перші переважають за швидкістю та простотою управління, тоді як другі виграють у безпеці, прозорості та стійкості. Для ВНС блокчейн пропонує унікальні можливості, такі як захист даних і верифікація результатів, але його впровадження потребує адаптації до вимог продуктивності та масштабованості.

1.7 Висновки до розділу

Перший розділ роботи присвячено аналізу сучасного стану віртуальних навчальних середовищ (ВНС) і оцінці потенціалу технології блокчейн для їхнього вдосконалення. Проведене дослідження дозволило систематизувати ключові аспекти розвитку ВНС, виявити їхні основні проблеми та визначити, як блокчейн може сприяти їхньому вирішенню, спираючись на зарубіжний досвід і теоретичні основи.

Історичний аналіз показав, що ВНС еволюціонували від перших комп'ютерних систем, таких як PLATO, до сучасних платформ типу Coursera і Moodle, що забезпечують глобальний доступ до освіти. Цей процес супроводжувався зростанням функціональності та аудиторії, однак виявив проблеми, пов'язані з централізацією та безпекою. Класифікація ВНС за функціоналом і аудиторією підкреслила їхню різноманітність — від систем

управління навчанням до платформ неформальної освіти, — що створює різні вимоги до технологічних рішень.

Аналіз проблем ВНС виявив три ключові виклики: централізація, безпека даних і фальсифікація результатів. Централізовані системи, які домінують у сучасних ВНС, є вразливими до кібератак і маніпуляцій, що знижує довіру до них. В Україні ці проблеми посилюються недостатнім рівнем кіберзахисту, що робить актуальним пошук альтернативних підходів [15]. Блокчейн, завдяки своїй децентралізованій природі, пропонує рішення, забезпечуючи незмінність і прозорість даних.

Огляд технології блокчейн показав, що її принципи — децентралізація, криптографічна безпека та смарт-контракти — створюють основу для підвищення ефективності ВНС. Потенційні сфери застосування, такі як сертифікація та облік прогресу, дозволяють усунути фальсифікацію документів і підвищити персоналізацію навчання. Порівняння з традиційними базами даних продемонструвало переваги блокчейну в безпеці та стійкості, хоча його продуктивність і масштабованість потребують подальшого вдосконалення.

Зарубіжний досвід, зокрема проєкти MIT, Open University і Мальти, ілюструє практичну цінність блокчейну в освіті. Ці кейси показують, що технологія може бути застосована для верифікації сертифікатів, обліку мікрокредитів і створення національних реєстрів. Такі ініціативи підвищують довіру до онлайн-освіти, що є важливим для її глобального визнання [28]. Для України ці приклади слугують орієнтиром, хоча їхня адаптація потребує врахування місцевих умов, таких як обмежені ресурси та рівень цифрової інфраструктури.

Аналіз сучасного стану ВНС і потенціалу блокчейну свідчить про доцільність його інтеграції для вирішення проблем безпеки, прозорості та верифікації. Технологія має значні перспективи для трансформації освіти, зокрема в Україні, де цифрова модернізація є нагальною потребою. Подальші розділи роботи будуть присвячені технічним аспектам і практичним рекомендаціям щодо впровадження блокчейну в ВНС.

2 ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ БЛОКЧЕЙН У ВІРТУАЛЬНІ НАВЧАЛЬНІ СЕРЕДОВИЩА

2.1 Вибір типу блокчейн (публічний, приватний, гібридний) для освітніх платформ

Впровадження технології блокчейн у віртуальні навчальні середовища (ВНС) потребує ретельного вибору типу блокчейну, оскільки від цього залежить ефективність, безпека та масштабованість системи. Існує три основні типи блокчейну: публічний, приватний і гібридний, кожен із яких має свої особливості, переваги та обмеження. Вибір відповідного типу залежить від потреб освітньої платформи, таких як доступність даних, рівень конфіденційності, швидкість обробки транзакцій і витрати на впровадження. У цьому підпункті розглянуто характеристики кожного типу блокчейну та їхню придатність для ВНС, а також надано порівняльну таблицю для наочності.

Публічний блокчейн є повністю децентралізованою системою, де кожен учасник мережі має доступ до всіх даних і може брати участь у процесі валідації транзакцій. Прикладами таких систем є Bitcoin і Ethereum. Основною перевагою публічного блокчейну є його прозорість і відкритість: будь-хто може перевірити записи, що ідеально підходить для верифікації сертифікатів чи дипломів у ВНС. Публічні блокчейни забезпечують найвищий рівень довіри завдяки відсутності центрального органу управління, що усуває ризик маніпуляцій [10]. Наприклад, студент, який отримав сертифікат у публічному блокчейні, може надати роботодавцю відкритий ключ для перевірки без звернення до навчального закладу.

Однак публічні блокчейни мають суттєві недоліки для освітніх платформ. По-перше, вони характеризуються низькою швидкістю обробки транзакцій через складні консенсусні механізми, такі як Proof of Work (PoW), що потребує значних обчислювальних ресурсів. По-друге, усі дані є відкритими, що може суперечити вимогам до конфіденційності персональних даних студентів, наприклад, відповідно до Загального регламенту захисту даних (GDPR) у Європі.

Для ВНС із великою кількістю користувачів, таких як масові онлайн-курси (МООС), публічний блокчейн може бути неефективним через обмежену масштабованість.

Приватний блокчейн, на відміну від публічного, є централізованою системою, контрольованою однією організацією або групою уповноважених вузлів. Доступ до даних і участь у мережі обмежені лише авторизованими учасниками, що робить його привабливим для навчальних закладів, які прагнуть зберегти конфіденційність. Підкреслюється, що приватні блокчейни, такі як Hyperledger Fabric, пропонують високу швидкість транзакцій і гнучкість у налаштуванні, що ідеально для внутрішнього використання в університетах чи школах [21]. Наприклад, приватний блокчейн може бути використаний для зберігання оцінок, історії навчання чи адміністративних записів, доступ до яких матимуть лише викладачі та адміністрація.

Перевагою приватного блокчейну є також його енергоефективність, оскільки консенсусні механізми, такі як Proof of Authority (PoA), не потребують значних обчислювальних ресурсів. Однак цей тип втрачає одну з ключових властивостей блокчейну — децентралізацію, що може викликати недовіру серед користувачів. Для ВНС, де важлива прозорість результатів для зовнішніх сторін, наприклад, роботодавців, приватний блокчейн може бути менш ефективним через обмежений доступ до даних.

Гібридний блокчейн поєднує елементи публічного та приватного типів, дозволяючи контролювати доступ до даних, зберігаючи при цьому певний рівень відкритості. У такій системі частина інформації може бути публічною (наприклад, сертифікати), а частина — приватною (наприклад, персональні дані студентів). Зазначається, що гібридні блокчейни, такі як Corda чи Dragonchain, стають популярними в галузях, де потрібен баланс між прозорістю та конфіденційністю, що робить їх перспективними для ВНС [29]. Наприклад, гібридна система може дозволити студентам ділитися сертифікатами з роботодавцями через публічну частину, тоді як оцінки чи історія навчання залишатимуться доступними лише для викладачів.

Гібридний блокчейн також пропонує компроміс у продуктивності: він швидший за публічний, але може бути складнішим у реалізації порівняно з приватним. Для України, де освіта потребує як відкритості (для визнання дипломів), так і захисту даних, гібридний підхід може бути оптимальним. Наприклад, національний реєстр сертифікатів, інтегрований із "Дією", міг би використовувати гібридний блокчейн для поєднання державної верифікації з доступністю для громадян.

Для наочності порівняння типів блокчейну наведено в таблиці А.3. Ця таблиця ілюструє їхні ключові характеристики та придатність для ВНС.

Вибір типу блокчейну для ВНС залежить від конкретних потреб платформи. Публічний блокчейн підходить для глобальних систем із акцентом на верифікацію, наприклад, для МООС чи міжнародних сертифікатів. Приватний блокчейн є оптимальним для локальних ВНС, де потрібен контроль і швидкість, наприклад, у школах чи університетах. Гібридний блокчейн пропонує баланс, що робить його універсальним рішенням для змішаних систем, де важливі як прозорість, так і захист даних.

Аналіз типів блокчейну показує, що кожен із них має унікальні переваги для ВНС. Публічний забезпечує максимальну довіру, приватний — ефективність і конфіденційність, а гібридний — гнучкість. Вибір залежить від масштабів платформи, вимог до безпеки та доступності, що потребує подальшого технічного аналізу для конкретних реалізацій.

2.2 Структура зберігання даних у блокчейн: сертифікати, оцінки, історія навчання

Використання технології блокчейн у віртуальних навчальних середовищах (ВНС) передбачає створення ефективної структури для зберігання даних, таких як сертифікати, оцінки та історія навчання. Блокчейн, як розподілений реєстр, пропонує унікальний підхід до організації інформації, забезпечуючи її незмінність, безпеку та доступність. Структура зберігання даних у блокчейні має відповідати специфіці освітніх процесів, враховуючи обсяг інформації, вимоги до конфіденційності та потребу в верифікації. У цьому підпункті розглянуто, як

дані про сертифікати, оцінки та історію навчання можуть бути організовані в блокчейні, із деталізацією технічних аспектів і прикладів реалізації.

Основою зберігання даних у блокчейні є структура блоків, кожен із яких містить набір транзакцій, мітку часу та криптографічний хеш попереднього блоку. У контексті ВНС транзакція може представляти запис про видачу сертифіката, нарахування оцінки чи фіксацію етапу навчання. Наприклад, видача сертифіката після завершення курсу фіксується як транзакція, що включає ідентифікатор студента, назву курсу, дату завершення та цифровий підпис викладача чи платформи. У [1] зазначається, що блокчейн дозволяє створювати структуровані записи, які є незмінними після додавання до ланцюжка, що ідеально підходить для сертифікації. Ці дані зберігаються в розподіленому реєстрі, доступному для всіх вузлів мережі (у публічному чи гібридному блокчейні) або лише авторизованим учасникам (у приватному).

Сертифікати в блокчейні можуть бути представлені у вигляді цифрових документів, пов'язаних із унікальним хешем. Кожен сертифікат генерується як транзакція, що включає метадані: ім'я студента (зашифроване для конфіденційності), код курсу, результат (наприклад, "успішно завершено") і цифровий підпис емітента. Після запису в блокчейн сертифікат отримує унікальний ідентифікатор (хеш транзакції), який студент може надати для верифікації. Такий підхід уже реалізовано в проєкті Blockcerts, де сертифікати зберігаються у форматі JSON і пов'язані з блокчейном Bitcoin. Перевага полягає в тому, що сертифікат не потребує централізованого сховища, а його достовірність може бути перевірена будь-ким через відкритий ключ.

Оцінки студентів у блокчейні фіксуються як серія транзакцій, що відображають їхній прогрес у навчанні. Наприклад, оцінка за модуль курсу записується як транзакція, що містить ідентифікатор студента, код завдання, отриманий бал і підпис викладача. Ці записи можуть бути згруповані в блоки за певний період (наприклад, семестр) або додаватися в реальному часі залежно від типу блокчейну. У [13] підкреслюється, що використання блокчейну для оцінок дозволяє уникнути маніпуляцій, оскільки кожна зміна потребує згоди мережі, а

історія змін залишається прозорою. Для забезпечення конфіденційності оцінки можуть шифруватися, а доступ до них надаватися лише студенту та викладачу через приватні ключі.

Історія навчання є більш складним набором даних, який включає не лише оцінки, але й інформацію про відвідуваність, виконані завдання, отримані кредити тощо. У блокчейні вона може бути організована як ланцюжок транзакцій, пов'язаних із профілем студента. Наприклад, кожне завершене завдання чи модуль фіксується як окрема транзакція, що містить метадані: дату, тип активності, результат і посилання на попередній запис. Така структура дозволяє створити повне цифрове портфоліо студента, яке відображає весь його навчальний шлях. У гібридному чи приватному блокчейні частина даних (наприклад, персональна інформація) може бути зашифрована, тоді як публічні дані (наприклад, кредити) залишаються доступними для верифікації.

Для оптимізації зберігання великих обсягів даних у блокчейні часто використовується підхід із розділенням "on-chain" і "off-chain" інформації. Критичні дані, такі як хеші сертифікатів чи підсумкові оцінки, записуються безпосередньо в блокчейн (on-chain), тоді як деталізована історія навчання чи об'ємні файли (наприклад, тексти завдань) зберігаються в зовнішніх сховищах (off-chain), наприклад, у розподіленій файловій системі IPFS. У [20] зазначається, що такий підхід підвищує масштабованість блокчейну, зберігаючи його безпеку та незмінність. Наприклад, сертифікат записується в блокчейн як хеш, а повний документ доступний через зовнішнє посилання, що зменшує навантаження на мережу.

Реалізація структури зберігання даних у блокчейні для ВНС потребує врахування кількох технічних аспектів. По-перше, вибір формату даних (наприклад, JSON чи XML) має бути стандартизованим для сумісності з різними платформами. По-друге, шифрування персональних даних є обов'язковим для відповідності стандартам захисту, таким як GDPR. По-третє, обсяг транзакцій у ВНС може бути значним, що вимагає оптимізації консенсусних механізмів

(наприклад, використання Proof of Authority замість Proof of Work) для підвищення швидкості обробки.

У контексті України структура зберігання даних у блокчейні може бути адаптована для інтеграції з державними системами, такими як "Дія". Наприклад, сертифікати та кредити студентів можуть записуватися в гібридний блокчейн, де публічна частина доступна для верифікації, а приватна — для внутрішнього використання вишами. Це дозволить створити єдиний реєстр освітніх даних, що підвищить їхню достовірність і спростить визнання результатів навчання.

Структура зберігання даних у блокчейні для ВНС забезпечує надійне фіксування сертифікатів, оцінок та історії навчання завдяки розподіленому реєстру та криптографічному захисту. Сертифікати стають верифікованими, оцінки — захищеними від змін, а історія навчання — прозорою та доступною. Такий підхід відкриває перспективи для створення безпечних і ефективних освітніх платформ, хоча потребує вирішення питань масштабованості та стандартизації.

2.3 Використання криптографії для захисту персональних даних студентів

Інтеграція технології блокчейн у віртуальні навчальні середовища (ВНС) відкриває нові можливості для зберігання та управління даними, однак вимагає особливого підходу до захисту персональних даних студентів. Криптографія є ключовим елементом блокчейну, який забезпечує конфіденційність, цілісність і автентичність інформації. У контексті ВНС, де зберігаються чутливі дані, такі як імена, номери документів, оцінки та історія навчання, використання криптографічних методів стає необхідним для відповідності стандартам захисту даних і підвищення довіри до системи. У цьому підпункті розглянуто, як криптографія застосовується для захисту персональних даних студентів у блокчейн-системах, із акцентом на основні методи та їхню практичну реалізацію.

Криптографія в блокчейні базується на двох основних підходах: симетричному та асиметричному шифруванні. Симетричне шифрування, наприклад, алгоритм AES (Advanced Encryption Standard), використовує один

ключ для шифрування та розшифрування даних. У ВНС цей метод може застосовуватися для захисту великих обсягів даних, таких як історія навчання, перед їхнім записом у блокчейн. Однак симетричне шифрування потребує безпечного способу передачі ключа між сторонами, що ускладнює його використання в децентралізованих системах.

Асиметричне шифрування, відоме як шифрування з відкритим ключем, є основою безпеки блокчейну. Воно використовує пару ключів: публічний (для шифрування) і приватний (для розшифрування). У [2] зазначається, що асиметрична криптографія, наприклад, алгоритм RSA чи ECC (Elliptic Curve Cryptography), була одним із перших кроків до створення безпечних цифрових систем, що лягли в основу блокчейну. У ВНС студент може мати публічний ключ, який використовується для запису зашифрованих даних (наприклад, оцінки чи сертифіката) у блокчейн, і приватний ключ, який дозволяє йому розшифрувати цю інформацію. Такий підхід гарантує, що лише власник приватного ключа має доступ до своїх даних, навіть якщо вони зберігаються у публічному чи гібридному блокчейні.

Ще одним важливим елементом криптографії в блокчейні є хеш-функції, такі як SHA-256. Хешування не шифрує дані, а створює їхній унікальний цифровий відбиток (хеш), який фіксується в блокчейні. Наприклад, персональні дані студента (ім'я, номер документа) можуть бути захешовані перед записом, а самі дані зберігатися поза блокчейном (off-chain) у зашифрованому вигляді. У разі перевірки хеш у блокчейні порівнюється з хешем оригінальних даних, що підтверджує їхню цілісність без розкриття вмісту. У [26] підкреслюється, що хеш-функції підвищують безпеку блокчейну, роблячи його стійким до маніпуляцій, що є критично важливим для захисту чутливих даних у ВНС.

Цифрові підписи, які також базуються на асиметричній криптографії, відіграють ключову роль у верифікації даних. У ВНС цифровий підпис викладача чи платформи додається до транзакції, наприклад, при видачі сертифіката чи нарахуванні оцінки. Це гарантує, що запис автентичний і не був змінений після підпису. Наприклад, студент завершує курс, платформа генерує

сертифікат, підписує його своїм приватним ключем, а публічний ключ дозволяє перевірити достовірність. Такий механізм усуває можливість фальсифікації результатів, що є однією з основних проблем традиційних ВНС.

У практичній реалізації криптографія в блокчейні для ВНС має враховувати вимоги до конфіденційності, зокрема стандарти GDPR у Європі чи аналогічні норми в інших країнах. Персональні дані студентів, такі як імена чи адреси, не повинні зберігатися у відкритому вигляді в блокчейні. Натомість їх можна зашифрувати, а в реєстрі записувати лише хеші або зашифровані ідентифікатори. У [17] зазначається, що комбінація шифрування та розподіленого зберігання дозволяє створювати системи, які відповідають вимогам захисту даних, зберігаючи при цьому їхню доступність для авторизованих сторін. Наприклад, у гібридному блокчейні приватна частина може містити зашифровані дані, доступні лише студенту та викладачу, тоді як публічна частина — хеші сертифікатів для верифікації.

Для України використання криптографії в блокчейн-системах ВНС має додаткове значення через низький рівень кібербезпеки в багатьох освітніх платформах. Інтеграція з державними системами, такими як "Дія", потребує захисту персональних даних громадян, що може бути реалізовано через асиметричне шифрування та цифрові підписи. Наприклад, студентський профіль у блокчейні може включати зашифровані дані, доступ до яких надається лише через його приватний ключ, а державні установи можуть верифікувати сертифікати через публічні ключі.

Реалізація криптографічних методів у ВНС на базі блокчейну має свої виклики. По-перше, управління ключами вимагає від студентів і викладачів базових знань про їхнє зберігання та використання, що може потребувати додаткового навчання. По-друге, обчислювальні ресурси для шифрування та хешування можуть уповільнити систему, якщо не оптимізувати алгоритми. По-третє, втрата приватного ключа означає втрату доступу до даних, що потребує механізмів відновлення, таких як резервні ключі чи мультипідписи.

Використання криптографії для захисту персональних даних студентів у блокчейн-системах ВНС забезпечує конфіденційність, цілісність і автентичність інформації. Асиметричне шифрування, хеш-функції та цифрові підписи створюють надійний захист від несанкціонованого доступу та маніпуляцій, відповідаючи сучасним стандартам безпеки. Цей підхід є особливо перспективним для України, де цифрова трансформація освіти потребує балансу між доступністю та захистом даних.

2.4 Розробка смарт-контрактів для автоматизації видачі сертифікатів і оцінювання

Смарт-контракти є однією з ключових особливостей технології блокчейн, яка дозволяє автоматизувати процеси в децентралізованих системах. У контексті віртуальних навчальних середовищ (ВНС) смарт-контракти можуть значно спростити видачу сертифікатів і оцінювання студентів, зменшуючи адміністративне навантаження, підвищуючи прозорість і усуваючи людський фактор. Їхня здатність виконувати заздалегідь запрограмовані умови робить їх ідеальним інструментом для створення ефективних і надійних освітніх платформ. У цьому підпункті розглянуто принципи розробки смарт-контрактів для автоматизації видачі сертифікатів і оцінювання, технічні аспекти реалізації та потенційні переваги для ВНС.

Смарт-контракт — це програмний код, який виконується на блокчейні та автоматично запускає дії за певними умовами. Уперше концепцію смарт-контрактів запропонував Нік Сабо в 1994 році, але практичну реалізацію вона отримала з появою платформи Ethereum у 2015 році [24]. У ВНС смарт-контракт може бути запрограмований так, щоб видавати сертифікат студенту після успішного завершення курсу або нараховувати оцінку після виконання завдання. Наприклад, умова "якщо студент набрав 80% балів за фінальний тест" запускає запис сертифіката в блокчейн, що усуває потребу в ручному втручанні викладача чи адміністратора.

Розробка смарт-контрактів для видачі сертифікатів передбачає кілька етапів. Спочатку визначаються умови виконання: наприклад, завершення всіх

модулів курсу, проходження тестів із мінімальним балом чи здача проєкту. Ці умови переводяться в логічні оператори (if-then-else) мовою програмування, такою як Solidity, яка використовується в Ethereum. Після цього контракт розгортається в блокчейні, де він стає доступним для взаємодії. Наприклад, студент завершує курс у ВНС, система надсилає дані в смарт-контракт, який перевіряє умови та генерує транзакцію з унікальним хешем сертифіката. У [7] зазначається, що смарт-контракти дозволяють автоматизувати адміністративні процеси, зберігаючи при цьому незмінність записів, що ідеально для сертифікації.

Для оцінювання смарт-контракти можуть бути запрограмовані на автоматичне нарахування балів за виконання завдань чи тестів. Наприклад, студент проходить онлайн-тест у ВНС, результати якого передаються в смарт-контракт. Контракт порівнює відповіді з еталоном, розраховує бал і записує його в блокчейн як транзакцію, підписану системою. Такий підхід усуває можливість маніпуляцій з оцінками, оскільки всі дії фіксуються в розподіленому реєстрі. У приватному чи гібридному блокчейні доступ до цих даних може бути обмежений викладачем і студентом, що забезпечує конфіденційність.

Технічна реалізація смарт-контрактів у ВНС потребує інтеграції з існуючими платформами. Наприклад, Moodle чи Google Classroom можуть бути підключені до блокчейну через API (Application Programming Interface), який передає дані про завершення курсів чи оцінки в смарт-контракт. Для цього розробляється інтерфейс, який дозволяє платформі взаємодіяти з блокчейном, наприклад, Ethereum чи Hyperledger. У [9] підкреслюється, що інтеграція з ВНС потребує стандартизації форматів даних, щоб забезпечити сумісність між системами. Після розгортання смарт-контракт стає автономним: він виконує дії без посередників, що підвищує ефективність і знижує витрати.

Прикладом практичного використання може бути автоматизація видачі сертифікатів у масових онлайн-курсах (МООС). Студент реєструється на курс у Coursera, проходить навчання, а смарт-контракт, розгорнутий на Ethereum, перевіряє виконання умов (наприклад, 90% виконаних завдань). Після цього

контракт автоматично записує сертифікат у блокчейн, надаючи студенту хеш для верифікації. Такий підхід уже частково реалізовано в проєкті MIT Blockcerts, де смарт-контракти генерують цифрові дипломи, доступні для перевірки в реальному часі.

Переваги смарт-контрактів для ВНС включають кілька аспектів. Автоматизація зменшує час на обробку результатів і видачу документів, що особливо важливо для великих платформ із тисячами студентів. Прозорість забезпечується незмінністю коду та записів у блокчейні, що усуває шахрайство. Економія ресурсів досягається завдяки відсутності потреби в посередниках чи додатковому персоналі. У контексті України це може допомогти вишам оптимізувати процеси, наприклад, автоматично видавати сертифікати про підвищення кваліфікації чи нараховувати кредити в рамках Болонського процесу.

Проте розробка смарт-контрактів має й виклики. По-перше, код має бути ретельно протестований, оскільки після розгортання в блокчейні його неможливо змінити, а помилки можуть призвести до неправильного виконання умов. По-друге, смарт-контракти в публічних блокчейнах, таких як Ethereum, потребують оплати за виконання (gas), що може збільшити витрати. По-третє, інтеграція з ВНС потребує технічної експертизи, що може бути проблемою для українських закладів із обмеженими ресурсами. Використання приватних блокчейнів, таких як Hyperledger, може вирішити питання витрат, але зменшує децентралізацію.

Україна може адаптувати смарт-контракти для ВНС, інтегруючи їх із державними системами, наприклад, "Дія". Смарт-контракт міг би автоматично видавати цифровий сертифікат, який одразу з'являється в додатку "Дія", що спрощує верифікацію для роботодавців чи інших установ. Такий підхід потребує створення стандартів для смарт-контрактів у національній освітній системі.

Розробка смарт-контрактів для автоматизації видачі сертифікатів і оцінювання в ВНС дозволяє підвищити ефективність, прозорість і надійність процесів. Технічна реалізація базується на програмуванні умов, інтеграції з

платформами та виборі типу блокчейну, що відкриває перспективи для модернізації освіти, зокрема в Україні, за умови вирішення питань вартості та підготовки кадрів.

2.5 Інтеграція блокчейн із існуючими навчальними платформами: технічні виклики

Інтеграція технології блокчейн із існуючими віртуальними навчальними середовищами (ВНС), такими як Moodle, Google Classroom чи Coursera, відкриває можливості для підвищення безпеки, прозорості та автоматизації освітніх процесів. Проте цей процес супроводжується низкою технічних викликів, пов'язаних із сумісністю систем, продуктивністю, вартістю впровадження та підготовкою користувачів. Успішна інтеграція потребує ретельного аналізу архітектури платформ, стандартизації даних і вирішення проблем масштабованості. У цьому підпункті розглянуто основні технічні виклики, які виникають під час інтеграції блокчейну з ВНС, та можливі шляхи їхнього подолання.

Одним із головних викликів є сумісність блокчейну з існуючими платформами. Більшість ВНС використовують централізовані бази даних, такі як MySQL чи PostgreSQL, які не призначені для роботи з децентралізованими системами. Для передачі даних із платформи в блокчейн необхідно розробити інтерфейс програмування додатків (API), який забезпечить зв'язок між цими системами. У [12] зазначається, що *integration of blockchain with LMS requires middleware to translate data formats and protocols*, що ускладнює процес через різницю в архітектурі. Наприклад, Moodle може зберігати оцінки в реляційній базі даних, тоді як блокчейн потребує даних у форматі транзакцій, що вимагає додаткового програмного шару для їхньої конверсії.

Продуктивність і масштабованість блокчейну є ще одним суттєвим викликом. Публічні блокчейни, такі як Ethereum, мають обмежену пропускну здатність — наприклад, 15-30 транзакцій за секунду, що недостатньо для ВНС із тисячами студентів, які одночасно здають тести чи отримують сертифікати. У масових онлайн-курсах (МООС) обсяг транзакцій може сягати десятків тисяч на

день, що перевищує можливості більшості блокчейн-систем. Приватні блокчейни, такі як Hyperledger, пропонують вищу швидкість, але втрачають децентралізацію, що може знизити довіру до системи. У [18] підкреслюється, що масштабування блокчейну залишається відкритою проблемою, яка потребує використання технологій на кшталт шардингу чи off-chain рішень, таких як IPFS.

Забезпечення конфіденційності даних також ускладнює інтеграцію. Існуючі ВНС часто зберігають персональні дані студентів у відкритому чи слабо зашифрованому вигляді, тоді як блокчейн потребує їхнього шифрування для відповідності стандартам, наприклад, GDPR. Передача даних у блокчейн вимагає криптографічного захисту, що може уповільнити систему через обчислювальне навантаження. Наприклад, шифрування оцінок чи сертифікатів перед записом у блокчейн потребує додаткових ресурсів, а управління ключами (публічними та приватними) ускладнює доступ для користувачів. У контексті України це особливо актуально, оскільки багато платформ не відповідають сучасним вимогам кібербезпеки [15].

Вартість впровадження є ще одним технічним і економічним викликом. Розробка смарт-контрактів, інтеграція API та підтримка блокчейн-вузлів потребують значних фінансових і людських ресурсів. У публічних блокчейнах, таких як Ethereum, кожна транзакція оплачується (gas), що може призвести до високих витрат для ВНС із великою кількістю операцій. Наприклад, видача сертифіката кожному студенту в МООС може коштувати кілька доларів за транзакцію, що непрактично для безкоштовних курсів. Приватні блокчейни знижують ці витрати, але потребують інфраструктури для розгортання власних вузлів, що також є дорогим. Для України, де бюджет на освіту обмежений, це може стати суттєвою перешкодою.

Підготовка користувачів і технічна підтримка додають складності до інтеграції. Викладачі, студенти та адміністратори ВНС зазвичай не мають досвіду роботи з блокчейном, що вимагає навчання основам управління ключами, розуміння смарт-контрактів і верифікації даних. Втрата приватного ключа може призвести до втрати доступу до сертифікатів чи оцінок, що потребує

створення механізмів відновлення, таких як резервні ключі чи мультипідписи. У [23] зазначається, що низький рівень цифрової грамотності є бар'єром для впровадження інноваційних технологій в освіті, що особливо актуально для України, де цифрова трансформація ще триває.

Інтеграція з існуючими платформами також стикається з проблемою стандартизації даних. Різні ВНС використовують власні формати для зберігання оцінок, сертифікатів чи історії навчання, що ускладнює їхню уніфікацію для запису в блокчейн. Наприклад, оцінки в Moodle можуть бути у вигляді числових балів, тоді як у Google Classroom — у текстовому форматі. Розробка єдиного стандарту потребує співпраці між платформами та створення консенсусу щодо структури транзакцій.

Можливі шляхи вирішення цих викликів включають кілька підходів. Для підвищення продуктивності можна використовувати гібридні блокчейни, де критичні дані (сертифікати) записуються в блокчейн, а менш важливі (деталі завдань) зберігаються off-chain. Сумісність може бути досягнута через middleware або плагіни, які адаптують дані ВНС до блокчейну. Зниження витрат можливе завдяки приватним чи консорціумним блокчейнам, де учасники (університети, платформи) ділять інфраструктуру. Підготовка користувачів потребує створення інтуїтивних інтерфейсів і навчальних програм.

У контексті України інтеграція блокчейну з ВНС могла б початися з пілотних проєктів у провідних вишах, наприклад, із підключенням до "Дія" для верифікації сертифікатів. Це дозволило б протестувати технологію в контрольованому середовищі перед масштабним впровадженням.

Інтеграція блокчейну з існуючими навчальними платформами стикається з технічними викликами, такими як сумісність, продуктивність, конфіденційність, вартість і підготовка користувачів. Вирішення цих проблем потребує комплексного підходу, включаючи стандартизацію, оптимізацію архітектури та поступове впровадження, що відкриває шлях до створення безпечних і ефективних ВНС.

2.6 Оцінка енергоефективності та масштабованості блокчейн-систем у навчанні

Використання блокчейн-систем у віртуальних навчальних середовищах (ВНС) обіцяє підвищення безпеки та прозорості, однак їхня енергоефективність і масштабованість залишаються критичними факторами, які впливають на практичність впровадження. Енергоефективність визначає обсяг ресурсів, необхідних для роботи системи, тоді як масштабованість відображає її здатність обробляти велику кількість транзакцій у реальному часі. Ці аспекти є особливо важливими для ВНС, де можуть одночасно працювати тисячі студентів, а ресурси часто обмежені. У цьому підпункті проведено оцінку енергоефективності та масштабованості блокчейн-систем у навчанні, розглянуто їхні особливості залежно від типу блокчейну та запропоновано підходи до оптимізації.

Енергоефективність блокчейн-систем значною мірою залежить від механізму консенсусу, який використовується для валідації транзакцій. У публічних блокчейнах, таких як Bitcoin чи Ethereum, застосовується Proof of Work (PoW), що вимагає значних обчислювальних ресурсів для розв'язання криптографічних задач. Наприклад, Bitcoin споживає близько 120 терават-годин електроенергії щорічно, що перевищує енергоспоживання деяких країн. У [3] зазначається, що PoW забезпечує високий рівень безпеки, але його енергоємність робить його непрактичним для ВНС, де потрібно обробляти тисячі транзакцій (наприклад, видачу сертифікатів чи запис оцінок) із мінімальними витратами. Для масових онлайн-курсів (МООС) із мільйонами користувачів використання PoW призвело б до непомірних витрат на електроенергію та обладнання.

Альтернативні механізми консенсусу, такі як Proof of Stake (PoS) і Proof of Authority (PoA), пропонують кращу енергоефективність. У PoS валідація транзакцій залежить від частки участі в мережі, а не від обчислювальних потужностей, що значно знижує енергоспоживання. Ethereum, наприклад, після переходу на PoS у 2022 році скоротив енергоспоживання на 99%. У приватних блокчейнах, таких як Hyperledger Fabric, PoA дозволяє довіреним вузлам (наприклад, адміністрації вишу) підтверджувати транзакції без складних

обчислень, що робить систему ще більш енергоефективною. Для ВНС, де ресурси обмежені, ці механізми є привабливішими, особливо в Україні, де енергетична інфраструктура зазнає значного навантаження.

Масштабованість блокчейн-систем визначається їхньою здатністю обробляти велику кількість транзакцій за одиницю часу. Публічні блокчейни мають низьку пропускну здатність: Bitcoin обробляє 7 транзакцій за секунду, Ethereum — до 30. У ВНС, де одночасно можуть відбуватися сотні чи тисячі операцій (наприклад, здача тестів чи видача сертифікатів), це створює затримки. У [20] підкреслюється, що масштабованість є однією з головних проблем блокчейну, яка потребує нових технічних рішень, таких як шардинг (розподіл мережі на сегменти) чи sidechains (додаткові ланцюжки для обробки транзакцій). Для великих платформ, таких як Coursera, ці обмеження можуть зробити публічний блокчейн непридатним без додаткової оптимізації.

Приватні та гібридні блокчейни пропонують кращу масштабованість завдяки меншій кількості вузлів і спрощеним механізмам консенсусу. Наприклад, Hyperledger Fabric може обробляти до 20 000 транзакцій за секунду в контрольованому середовищі, що відповідає потребам локальних ВНС, таких як університетські платформи. У гібридних системах частина даних (наприклад, сертифікати) може записуватися в публічний блокчейн для верифікації, а об'ємні операції (оцінки, історія навчання) — у приватний, що оптимізує продуктивність. У контексті України, де багато вишів використовують Moodle, гібридний підхід міг би забезпечити баланс між масштабованістю та децентралізацією.

Енергоефективність і масштабованість також залежать від обсягу даних, які зберігаються в блокчейні. У ВНС інформація про сертифікати, оцінки та історію навчання може бути значною, що збільшує розмір блоків і ускладнює їхню обробку. Для вирішення цієї проблеми використовується підхід on-chain/off-chain: критичні дані (хеші сертифікатів) записуються в блокчейн, а деталі (тексти завдань, відеоматеріали) зберігаються в зовнішніх сховищах, таких як IPFS. У [25] зазначається, що такий розподіл підвищує як

енергоефективність, так і масштабованість, зменшуючи навантаження на мережу.

Оцінка енергоефективності та масштабованості для ВНС потребує врахування специфіки їхнього використання. Локальні платформи (наприклад, шкільні системи) можуть ефективно працювати на приватних блокчейнах із PoA, де енергоспоживання мінімальне, а пропускна здатність достатня для сотень користувачів. Глобальні платформи, такі як MOOC, потребують гібридних рішень із оптимізацією через sidechains чи шардинг, щоб підтримувати тисячі транзакцій без значних енергетичних витрат. У контексті України, де енергетичні ресурси обмежені, приватні чи гібридні блокчейни з PoS або PoA є більш реалістичними для впровадження.

Оптимізація енергоефективності та масштабованості можлива через кілька підходів. Використання енергоефективних консенсусних механізмів (PoS, PoA) знижує витрати. Застосування off-chain сховищ зменшує обсяг даних у блокчейні. Розробка консорціумних блокчейнів, де кілька закладів ділять інфраструктуру, дозволяє розподілити навантаження та ресурси. Для України ці підходи можуть бути реалізовані в пілотних проєктах, наприклад, у вишах чи в рамках "Дія", щоб протестувати їхню ефективність перед масштабним розгортанням.

Оцінка енергоефективності та масштабованості блокчейн-систем у навчанні показує, що публічні блокчейни з PoW є енергоємними та обмеженими в продуктивності, тоді як приватні та гібридні системи з PoS чи PoA пропонують кращі показники. Оптимізація через off-chain рішення та вибір відповідного типу блокчейну дозволяють адаптувати технологію до потреб ВНС, що є ключовим для її успішного впровадження, зокрема в Україні.

2.7 Висновки до розділу

Другий розділ роботи присвячено технічним аспектам впровадження технології блокчейн у віртуальні навчальні середовища (ВНС). Проведений аналіз дозволив визначити ключові елементи реалізації, включаючи вибір типу

блокчейну, структуру зберігання даних, використання криптографії, розробку смарт-контрактів, інтеграцію з існуючими платформами, а також оцінку енергоефективності та масштабованості. Отримані результати створюють основу для практичного застосування технології в освіті.

Вибір типу блокчейну (публічного, приватного чи гібридного) залежить від потреб ВНС. Публічні блокчейни підходять для верифікації сертифікатів, приватні — для локального обліку даних, а гібридні пропонують баланс між прозорістю та конфіденційністю. Структура зберігання даних у блокчейні забезпечує надійність сертифікатів, оцінок та історії навчання через розподілений реєстр і комбінацію on-chain/off-chain підходів. У [20] зазначається, що такий розподіл підвищує ефективність системи, що є важливим для великих ВНС.

Криптографія відіграє ключову роль у захисті персональних даних студентів. Асиметричне шифрування, хеш-функції та цифрові підписи гарантують конфіденційність і автентичність, відповідаючи стандартам безпеки, таким як GDPR. Смарт-контракти дозволяють автоматизувати видачу сертифікатів і оцінювання, зменшуючи адміністративне навантаження та усуваючи шахрайство. Їхня інтеграція з платформами, такими як Moodle, можлива через API, хоча потребує стандартизації даних.

Інтеграція блокчейну з існуючими ВНС стикається з викликами сумісності, продуктивності, вартості та підготовки користувачів. Гібридні рішення та middleware можуть вирішити ці проблеми, але потребують інвестицій і технічної експертизи. Оцінка енергоефективності та масштабованості показала, що публічні блокчейни з PoW є енергоємними та обмеженими в продуктивності, тоді як PoS і PoA у приватних чи гібридних системах пропонують оптимальніші показники. У [25] підкреслюється, що off-chain сховища та оптимізовані консенсусні механізми підвищують масштабованість, що критично для МООС чи національних освітніх систем.

Для України технічні аспекти впровадження блокчейну в ВНС мають враховувати обмежені ресурси та рівень цифрової інфраструктури. Гібридні

блокчейни з PoA, інтеграція з "Дія" та пілотні проєкти в провідних вишах можуть стати першими кроками до модернізації. Отже, блокчейн пропонує технічні рішення для підвищення безпеки та ефективності ВНС, але його успішне впровадження залежить від подолання викликів масштабованості, енергоефективності та сумісності, що буде розглянуто в наступному розділі.

3 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

3.1 Огляд успішних кейсів використання блокчейн в освіті

Технологія блокчейн дедалі частіше застосовується в освітній сфері, демонструючи свою здатність вирішувати проблеми верифікації, безпеки та доступності даних. Успішні кейси використання блокчейну в освіті, реалізовані в різних країнах, ілюструють його практичну цінність для віртуальних навчальних середовищ (ВНС). Ці приклади показують, як технологія може бути адаптована до потреб навчальних закладів, студентів і роботодавців, створюючи основу для її ширшого впровадження. У цьому підпункті розглянуто ключові кейси, їхні особливості, результати та уроки, які можуть бути корисними для України, а також подано порівняльну таблицю.

Одним із найвідоміших прикладів є проєкт Массачусетського технологічного інституту (MIT) у США. У 2017 році MIT запровадив систему Blockcerts для видачі цифрових дипломів на базі блокчейну Bitcoin. Студенти отримують цифровий сертифікат, який записується в розподілений реєстр, що дозволяє будь-кому перевірити його автентичність через відкритий ключ. У [5] зазначається, що Blockcerts стала відкритим стандартом, який можуть використовувати інші заклади, що сприяє глобальному визнанню документів. Цей кейс демонструє, як блокчейн вирішує проблему фальсифікації дипломів і спрощує їхню верифікацію для роботодавців, скорочуючи бюрократичні процеси.

У Великобританії Open University реалізував проєкт із використання блокчейну для фіксації мікрокредитів (microcredentials). З 2018 року університет застосовує платформу Ethereum для запису даних про короткотермінові курси, які студенти можуть накопичувати для отримання повноцінного диплома. Ця система дозволяє створювати цифрове портфоліо досягнень, доступне для перевірки в реальному часі. Перевагою є гнучкість: студенти можуть навчатися у власному темпі, а роботодавці отримують достовірну інформацію про їхні

навички. Цей підхід підкреслює потенціал блокчейну для підтримки безперервного навчання.

У Мальті уряд у 2017 році ініціював проєкт із використання блокчейну для створення національного реєстру освітніх сертифікатів. Усі дипломи, сертифікати та професійні кваліфікації записуються в розподілений реєстр, що забезпечує прозорість і доступність даних. У [19] зазначається, що Мальта стала піонером у застосуванні блокчейну на державному рівні, що дозволило усунути паперову документацію та спростити процеси для громадян і установ. Цей кейс ілюструє, як технологія може бути масштабована до національного рівня, створюючи єдину екосистему для освіти.

У Китаї Університет Нанкай із 2019 року використовує блокчейн для запису результатів студентів і видачі сертифікатів у партнерстві з компанією Tencent. Система фіксує не лише кінцеві оцінки, але й проміжний прогрес, інтегруючись із механізмами ідентифікації для запобігання шахрайству. Цей проєкт показує, як блокчейн може підвищити прозорість оцінювання та захистити від академічної недоброчесності, що є актуальним для багатьох країн, включаючи Україну.

Ще один приклад — проєкт SkillsFuture у Сінгапурі, запущений урядом для підтримки безперервного навчання. З 2016 року (з інтеграцією блокчейну в пізніших етапах) програма використовує технологію для запису навичок і кваліфікацій, отриманих через короткотермінові курси. У [22] підкреслюється, що SkillsFuture створює цифрові портфоліо, які визнаються роботодавцями, що сприяє інтеграції освіти з ринком праці. Цей кейс демонструє, як блокчейн може об'єднувати формальну та неформальну освіту, підвищуючи її практичну цінність.

Для наочності основні характеристики цих кейсів подано в таблиці А.4, яка порівнює їх за ключовими параметрами.

Аналіз цих кейсів виявляє кілька спільних рис. Блокчейн найчастіше застосовується для сертифікації та обліку досягнень, що підвищує довіру до результатів навчання. Успіх проєктів залежить від співпраці з технологічними

партнерами (наприклад, Learning Machine, Tencent), що забезпечує технічну підтримку. Різні типи блокчейну (публічний, приватний, гібридний) дозволяють адаптувати технологію до конкретних потреб: публічний — для глобальної верифікації, приватний — для локального контролю, гібридний — для національних систем.

Для України ці кейси пропонують цінні уроки. Модель MIT може бути адаптована для боротьби з підробкою дипломів у вишах. Ініціатива Мальти надихає на створення національного реєстру через «Дію». Проєкт SkillsFuture показує, як блокчейн може підтримувати підвищення кваліфікації вчителів чи студентів. Однак впровадження потребує врахування місцевих умов: обмежених ресурсів, рівня цифрової грамотності та інфраструктури.

Успішні кейси використання блокчейну в освіті демонструють його здатність вирішувати проблеми верифікації, прозорості та гнучкості. Ці приклади створюють основу для практичного застосування технології в Україні, де вона може сприяти цифровій трансформації освіти за умови адаптації до національних реалій.

3.2 Вплив блокчейн на прозорість і довіру в навчальних процесах.

Технологія блокчейн має потенціал трансформувати навчальні процеси у віртуальних навчальних середовищах (ВНС), підвищуючи прозорість і довіру між усіма учасниками: студентами, викладачами, адміністрацією та роботодавцями. Її децентралізована природа, незмінність даних і автоматизація через смарт-контракти усувають багато недоліків традиційних систем, таких як непрозорість оцінювання, фальсифікація результатів і залежність від посередників. У цьому підпункті розглянуто, як блокчейн впливає на прозорість і довіру в навчальних процесах, із акцентом на конкретні аспекти освіти та їхнє значення для сучасних ВНС.

Прозорість у навчальних процесах забезпечується завдяки розподіленому реєстру блокчейну, де всі транзакції (записи про оцінки, сертифікати, історію навчання) є відкритими для перевірки учасниками мережі. У традиційних ВНС,

таких як Moodle чи Google Classroom, дані зберігаються на централізованих серверах, що дозволяє адміністраторам чи викладачам вносити зміни без відома студентів. Блокчейн усуває цю проблему, фіксуючи кожен запис у незмінному вигляді. У [16] зазначається, що децентралізація блокчейну підвищує прозорість, оскільки будь-яка спроба маніпуляції стає видимою для всіх вузлів мережі. Наприклад, оцінка за тест, записана в блокчейн, не може бути змінена без згоди всіх сторін, що гарантує її достовірність.

Така прозорість має прямий вплив на довіру студентів до системи оцінювання. У багатьох країнах, включаючи Україну, студенти часто стикаються з суб'єктивізмом чи непрозорими критеріями оцінки. Блокчейн дозволяє фіксувати не лише кінцеві бали, але й деталі процесу: які завдання виконані, які критерії застосовані, хто і коли вніс оцінку. Це створює об'єктивну картину, доступну для перегляду, що підвищує впевненість студентів у справедливості системи. У контексті масових онлайн-курсів (МООС) прозорість також допомагає учасникам перевіряти, що їхні результати відповідають заявленим стандартам платформи.

Довіра до сертифікатів і дипломів є ще одним аспектом, де блокчейн відіграє ключову роль. У традиційних системах верифікація документів часто потребує звернення до навчального закладу, що ускладнює процес для роботодавців і підвищує ризик фальсифікації. Блокчейн дозволяє записувати сертифікати в розподілений реєстр, де їхня автентичність може бути перевірена через відкритий ключ у реальному часі. У [28] підкреслюється, що це підвищує довіру до онлайн-освіти, роблячи її більш визнаною на глобальному ринку праці. Наприклад, проєкт MIT Blockcerts показав, як роботодавці можуть швидко підтвердити достовірність диплома, що зменшує бюрократію та зміцнює репутацію навчальних платформ.

Автоматизація через смарт-контракти також сприяє прозорості та довірі. Смарт-контракти можуть бути запрограмовані для автоматичного нарахування оцінок чи видачі сертифікатів за чітко визначеними умовами, що виключає людський фактор і суб'єктивність. Наприклад, якщо студент набрав необхідний

бал за курс, смарт-контракт автоматично записує сертифікат у блокчейн, а код контракту є відкритим для перевірки. Це усуває можливість корупції чи помилок, що особливо актуально для країн, де академічна доброчесність є проблемою, зокрема в Україні.

Прозорість блокчейну впливає і на взаємодію між навчальними закладами та зовнішніми сторонами. Роботодавці, державні установи чи інші виші можуть легко перевірити історію навчання студента, кредити чи навички, записані в блокчейні. Це сприяє глобалізації освіти, оскільки результати навчання стають визнаними за межами однієї системи чи країни. У контексті Болонського процесу в Україні блокчейн міг би спростити визнання кредитів між університетами, підвищуючи довіру до національної освіти.

Водночас вплив блокчейну на прозорість і довіру має свої виклики. У публічних блокчейнах усі дані є відкритими, що може суперечити вимогам до конфіденційності, наприклад, GDPR. Для вирішення цього гібридні чи приватні блокчейни дозволяють обмежувати доступ до чутливої інформації, зберігаючи прозорість для авторизованих сторін. У [10] зазначається, що гнучкість у налаштуванні доступу є ключовою для адаптації блокчейну до різних сфер, включаючи освіту. Наприклад, оцінки можуть бути зашифровані для викладача та студента, тоді як сертифікати — доступні для всіх.

Для України впровадження блокчейну в навчальні процеси могло б вирішити проблему недовіри до системи освіти, яка часто асоціюється з корупцією та підбрюхою документів. Інтеграція з «Дією» могла б створити прозорий реєстр сертифікатів, доступний для громадян і роботодавців, що підвищило б репутацію українських вишів. Прозорість оцінювання через смарт-контракти зменшила б суб'єктивізм, а децентралізація усунула б залежність від централізованих серверів, вразливих до атак чи збоїв.

Блокчейн суттєво впливає на прозорість і довіру в навчальних процесах, забезпечуючи незмінність даних, автоматизацію процедур і доступність для перевірки. Він підвищує впевненість студентів у справедливості оцінювання, довіру роботодавців до сертифікатів і репутацію ВНС на глобальному рівні. Для

України ця технологія відкриває перспективи для боротьби з академічною недоброчесністю та модернізації освіти, хоча потребує адаптації до вимог конфіденційності та місцевих умов.

3.3 Можливості персоналізації навчання через децентралізовані платформи

Персоналізація навчання є однією з ключових тенденцій у сучасній освіті, спрямованих на адаптацію навчального процесу до індивідуальних потреб, темпу та інтересів студентів. Децентралізовані платформи на базі технології блокчейн відкривають нові можливості для реалізації цього підходу у віртуальних навчальних середовищах (ВНС), забезпечуючи гнучкість, контроль над даними та автоматизацію. Завдяки незмінності записів, прозорості та смарт-контрактам блокчейн може трансформувати традиційні методи навчання, пропонуючи персоналізований досвід із високим рівнем довіри та безпеки. У цьому підпункті розглянуто, як децентралізовані платформи сприяють персоналізації навчання, із акцентом на їхні технічні та практичні аспекти.

Однією з основних можливостей персоналізації через блокчейн є створення індивідуального цифрового портфоліо студента. У децентралізованій системі вся історія навчання — оцінки, завершені курси, отримані кредити, мікрокредити чи навички — фіксується в розподіленому реєстрі як набір транзакцій. Ці дані належать студенту, який може контролювати доступ до них через приватні ключі. У [25] зазначається, що блокчейн дозволяє створювати портативні профілі, які студенти можуть використовувати для адаптації навчання до своїх цілей. Наприклад, студент із портфоліо, що включає курси програмування та дизайну, може отримати рекомендації щодо поглиблення знань у веб-розробці, ґрунтуючись на його попередніх досягненнях.

Смарт-контракти відіграють важливу роль у персоналізації, автоматизуючи вибір навчальних траєкторій. Вони можуть бути запрограмовані для аналізу прогресу студента та надання рекомендацій на основі заздалегідь визначених умов. Наприклад, якщо студент успішно завершив базовий курс математики (набравши понад 80% балів), смарт-контракт автоматично пропонує

йому просунутий курс або видає доступ до спеціалізованих матеріалів. Такий підхід зменшує залежність від викладача чи адміністратора, дозволяючи системі адаптуватися до індивідуального темпу навчання. У контексті масових онлайн-курсів (МООС) це може масштабуватися до тисяч користувачів, кожен із яких отримує унікальний навчальний шлях.

Децентралізовані платформи також дозволяють студентам самостійно обирати джерела навчання та отримувати визнання результатів із різних систем. У традиційних ВНС можливості вибору обмежені централізованим управлінням, тоді як блокчейн об'єднує дані з різних платформ (наприклад, Coursera, edX чи локальних курсів) у єдиний реєстр. У [22] підкреслюється, що децентралізація сприяє модульному навчанню, де студенти можуть комбінувати мікрокредити з різних джерел для створення персоналізованої програми. Наприклад, студент в Україні міг би пройти курс програмування на Coursera, курс англійської в місцевому виші та курс дизайну на Udemu, а блокчейн об'єднав би ці досягнення в єдине портфоліо, визнане роботодавцями.

Персоналізація через блокчейн підтримується також можливістю інтеграції зі штучним інтелектом (ШІ). Дані з блокчейну — історія навчання, оцінки, інтереси — можуть передаватися в ШІ-системи, які аналізують їх і пропонують індивідуальні рекомендації. Наприклад, якщо студент демонструє високі результати в аналітичних дисциплінах, ШІ може порадити курс із даних чи статистики, а смарт-контракт автоматично запише його на цей курс. Така синергія підвищує адаптивність ВНС, дозволяючи системі реагувати на потреби студента в реальному часі.

Ще однією перевагою є контроль студента над своїми даними, що сприяє персоналізованому доступу до ресурсів. У децентралізованій системі студент може вирішувати, які частини його портфоліо відкрити для викладачів, роботодавців чи інших платформ. Наприклад, він може надати доступ до сертифікатів із програмування для роботи, але приховати оцінки з інших дисциплін. У [16] зазначається, що децентралізація повертає користувачам владу над інформацією, що підвищує їхню автономність і довіру до системи. Це

особливо цінно для безперервного навчання, де людина протягом життя накопичує різноманітні навички.

У контексті України персоналізація через блокчейн могла б вирішити проблему стандартизації освіти та визнання неформального навчання. Наприклад, учитель, який проходить курси підвищення кваліфікації на різних платформах, міг би об'єднати їх у портфоліо, записане в блокчейн, і отримати офіційне визнання від Міністерства освіти. Інтеграція з «Дією» могла б спростити цей процес, надаючи доступ до персоналізованих освітніх пропозицій на основі попередніх досягнень.

Проте персоналізація через децентралізовані платформи має виклики. Технічна складність реалізації смарт-контрактів і ІШІ потребує значних ресурсів і кваліфікованих розробників, що може бути проблемою для України з обмеженим бюджетом на освіту. Управління приватними ключами вимагає від студентів цифрової грамотності, а втрата ключа може призвести до втрати доступу до портфоліо. Крім того, масштабування персоналізованих рішень для великої кількості користувачів потребує оптимізації продуктивності блокчейну, наприклад, через гібридні системи чи off-chain сховища.

Децентралізовані платформи на базі блокчейну відкривають широкі можливості для персоналізації навчання завдяки цифровим портфоліо, смарт-контрактам, інтеграції з ІШІ та контролю над даними. Вони дозволяють адаптувати освіту до потреб кожного студента, об'єднувати різноманітні джерела навчання та підвищувати його гнучкість. Для України це створює перспективи для модернізації ВНС, хоча потребує подолання технічних і організаційних бар'єрів.

3.4 Економічні аспекти впровадження: витрати та потенційна вигода

Впровадження технології блокчейн у віртуальні навчальні середовища (ВНС) пов'язане з економічними аспектами, які охоплюють початкові витрати та довгострокову вигоду для навчальних закладів, студентів і суспільства. Економічна доцільність залежить від типу блокчейну, масштабів реалізації,

технічної інфраструктури та здатності системи генерувати додану вартість. Аналіз витрат і потенційної вигоди дозволяє оцінити, чи є блокчейн життєздатним рішенням для модернізації освіти, зокрема в Україні, де ресурси обмежені. У цьому підпункті розглянуто ключові економічні фактори впровадження блокчейну в ВНС, включаючи витрати на розробку, підтримку та можливі економічні переваги.

Впровадження блокчейну в ВНС потребує значних початкових інвестицій. Розробка технічної інфраструктури є суттєвою частиною витрат. Для публічного блокчейну, наприклад, Ethereum, необхідно створювати смарт-контракти, інтегрувати їх із існуючими платформами через API та оплачувати транзакції (gas), які можуть коштувати від \$1 до \$10 за операцію залежно від навантаження мережі. У приватному чи гібридному блокчейні, такому як Hyperledger, потрібно розгортати власні вузли, що вимагає серверів, програмного забезпечення та технічного персоналу. У [18] зазначається, що створення приватної блокчейн-мережі для середнього університету може обійтися в \$50,000–\$100,000 на початковому етапі.

Інтеграція з існуючими ВНС, такими як Moodle чи Coursera, також додає витрат. Розробка middleware для сумісності, адаптація форматів даних і тестування системи потребують залучення програмістів із досвідом у блокчейні. Їхня погодинна оплата в середньому становить \$50-100 у країнах із розвинутою ІТ-інфраструктурою, хоча в Україні ці показники нижчі — \$20-40 за годину, що все одно відчутно для бюджетних установ. Навчання персоналу та користувачів є ще одним аспектом. Викладачі, адміністратори та студенти потребують базових знань про управління ключами та роботу з блокчейном, що вимагає створення навчальних програм чи тренінгів, кошторис яких може сягати кількох тисяч доларів.

Операційні витрати залежать від типу блокчейну. У публічних системах кожна транзакція, наприклад, видача сертифіката чи запис оцінки, оплачується, що для МООС із тисячами студентів може призвести до витрат у десятки тисяч доларів щорічно. Приватні блокчейни потребують витрат на підтримку серверів

і електроенергію, але ці показники нижчі порівняно з енергоємними системами типу PoW. Для України, де енергетичні ресурси мають високу вартість, це може суттєво впливати на бюджет.

Незважаючи на високі початкові витрати, блокчейн обіцяє значну економічну вигоду в довгостроковій перспективі. Автоматизація через смарт-контракти дозволяє заощаджувати на адміністративних процесах. Видача сертифікатів, перевірка документів і визнання кредитів стають автоматичними, що зменшує потребу в додатковому персоналі. У [7] зазначається, що смарт-контракти здатні скоротити адміністративні витрати на 20-30%, що для великого вишу означає економію тисяч доларів щорічно. Наприклад, замість найму працівників для верифікації дипломів система виконує ці функції самостійно.

Зменшення витрат на боротьбу з фальсифікацією та шахрайством є ще одним плюсом. У традиційних системах підrobка дипломів чи маніпуляції з оцінками призводять до фінансових і репутаційних втрат. Блокчейн усуває ці ризики завдяки незмінності даних, що економить ресурси на юридичні суперечки чи повторні перевірки. Для України, де академічна недобросовісність залишається проблемою, це може знизити витрати на контроль і підвищити довіру до освіти.

Глобалізація та визнання результатів навчання також приносять вигоду. Блокчейн дозволяє створювати сертифікати, визнані на міжнародному рівні, що приваблює іноземних студентів і збільшує доходи вишів від онлайн-курсів. Український університет, який видає сертифікати через блокчейн, може розширити аудиторію на ринки Європи чи Азії, отримуючи додатковий прибуток. У [28] підкреслюється, що глобальне визнання онлайн-освіти є важливим економічним стимулом для впровадження технологій.

Підвищення ефективності через персоналізацію додає економічної цінності. Децентралізовані платформи дозволяють студентам створювати індивідуальні навчальні траєкторії, що знижує витрати на повторне навчання чи нерелевантні курси. Для роботодавців це означає підготовку фахівців із точними навичками, що скорочує витрати на перекваліфікацію. У довгостроковій

перспективі це сприяє економічному зростанню через краще співвідношення освіти та ринку праці.

В Україні економічні аспекти впровадження блокчейну в ВНС потребують адаптації до місцевих умов через обмежені ресурси. Початкові витрати можуть бути частково покриті державними грантами чи міжнародними програмами, наприклад, від ЄС, які підтримують цифрову трансформацію. Використання гібридних чи приватних блокчейнів із PoA замість енергоємних PoW-систем зменшить операційні витрати. Інтеграція з «Дією» могла б оптимізувати витрати на інфраструктуру, створивши єдиний реєстр сертифікатів за участі кількох вишів.

Вигода для України включає економію на адмініструванні, підвищення конкурентоспроможності вишів і залучення іноземних студентів. Якщо один виш заощадить \$10,000 щорічно на верифікації дипломів, а 50 вишів впровадять систему, загальна економія складе \$500,000. Додатковий дохід від онлайн-курсів може сягати мільйонів гривень, якщо врахувати глобальний ринок.

Отже, економічні аспекти впровадження блокчейну в ВНС охоплюють значні витрати на розробку та інтеграцію, але обіцяють вигоду через автоматизацію, боротьбу з шахрайством, глобалізацію та персоналізацію. Для України ключем до успіху є поступове впровадження через пілотні проекти та державну підтримку, що дозволить збалансувати витрати та вигоди.

3.5 Прогнозування еволюції віртуальних навчальних середовищ із блокчейн

Технологія блокчейн поступово інтегрується у віртуальні навчальні середовища (ВНС), відкриваючи нові горизонти для їхнього розвитку. Завдяки децентралізації, незмінності даних і автоматизації блокчейн може кардинально змінити способи організації навчання, управління даними та взаємодії між учасниками освітнього процесу. Прогнозування еволюції ВНС із блокчейном ґрунтується на аналізі сучасних тенденцій, технологічного прогресу та потреб суспільства. У цьому підпункті розглянуто можливі напрямки розвитку ВНС, їхній вплив на освіту та перспективи для України в найближчі 5-10 років.

Одним із ключових напрямків еволюції ВНС із блокчейном є перехід до повністю децентралізованих платформ. Сучасні системи, такі як Moodle чи Coursera, базуються на централізованих серверах, що обмежує їхню гнучкість і вразливе до збоїв. У майбутньому блокчейн може замінити ці структури розподіленими мережами, де дані про навчання зберігаються на вузлах, керованих самими учасниками — студентами, викладачами, закладами. У [10] зазначається, що децентралізація усуває залежність від посередників, дозволяючи створювати самокеровані екосистеми. Наприклад, платформа могла б функціонувати як децентралізований додаток (Dapp), де студенти отримують доступ до курсів, а викладачі — винагороду через токени, без участі центральної адміністрації.

Іншим важливим аспектом є інтеграція блокчейну з технологіями штучного інтелекту (ШІ) та великих даних. Блокчейн забезпечує безпечне зберігання історії навчання, а ШІ може аналізувати ці дані для створення адаптивних навчальних траєкторій. Уявімо ВНС, де кожен студент має унікальний профіль у блокчейні, що включає його досягнення, інтереси та стиль навчання. ШІ, використовуючи ці дані, пропонує персоналізовані курси, завдання чи навіть кар'єрні рекомендації, а смарт-контракти автоматично записують результати. У [25] підкреслюється, що поєднання блокчейну з ШІ може зробити освіту більш індивідуалізованою та ефективною, що стане стандартом у наступному десятилітті.

Розвиток токенизації в освіті також вплине на еволюцію ВНС. Блокчейн дозволяє створювати цифрові токени, які можуть слугувати внутрішньою валютою чи мотиваційним інструментом. Студенти могли б отримувати токени за завершення курсів, виконання завдань чи внесок у спільноту (наприклад, створення контенту), а потім обмінювати їх на доступ до преміум-курсів чи сертифікатів. Викладачі, у свою чергу, могли б отримувати токени як оплату за навчання. Така модель уже тестується в проєктах, як BitDegree, і може стати основою для гейміфікованих ВНС, підвищуючи залученість студентів. У

майбутньому токенизація може інтегруватися з глобальними криптовалютами, створюючи економіку знань.

Ще одним напрямком є глобалізація та стандартизація освіти через блокчейн. У найближчі роки ВНС можуть еволюціонувати до міжнародних платформ, де сертифікати, кредити та навички, записані в блокчейн, визнаються у всьому світі. Це усуне бар'єри між національними системами освіти, дозволяючи студентам із різних країн об'єднувати свої досягнення в єдине портфоліо. У [28] прогнозується, що блокчейн стане основою для створення універсального стандарту верифікації, що зробить онлайн-освіту більш доступною та визаною. Для України це відкриває можливість інтеграції в глобальний освітній простір, підвищуючи конкурентоспроможність місцевих вишів.

Еволюція ВНС із блокчейном також передбачає підвищення безпеки та автономності. Завдяки криптографії та децентралізації дані студентів будуть захищені від витоків чи маніпуляцій, а контроль над ними перейде до самих користувачів. У майбутньому студент зможе самостійно вирішувати, кому надавати доступ до свого портфоліо — роботодавцям, вишам чи платформам, — без посередництва адміністрації. Така автономія може стати стандартом для ВНС, де конфіденційність і безпека є пріоритетами.

Для України еволюція ВНС із блокчейном матиме особливе значення. У найближчі 5-10 років технологія може допомогти вирішити проблеми фальсифікації дипломів, суб'єктивності оцінювання та фрагментації даних між закладами. Інтеграція з «Дією» могла б створити національну децентралізовану платформу, де кожен громадянин має профіль із записами про освіту, доступний для верифікації та персоналізації. Наприклад, учитель, який проходить курси підвищення кваліфікації, міг би автоматично отримувати токени чи кредити, визнані державою, що спростило б бюрократію.

Проте еволюція ВНС із блокчейном стикатиметься з викликами. Масштабування технології для мільйонів користувачів потребуватиме вдосконалення продуктивності, наприклад, через шардинг чи гібридні системи.

Енергоефективність залишатиметься важливим фактором, особливо для країн із обмеженими ресурсами, таких як Україна, де перехід до PoS чи PoA може стати необхідністю. Крім того, впровадження потребуватиме інвестицій у цифрову інфраструктуру та підвищення кваліфікації викладачів і студентів, що може уповільнити процес у короткостроковій перспективі.

У довгостроковій перспективі ВНС із блокчейном можуть еволюціонувати до саморегульованих екосистем, де освіта стане децентралізованою, персоналізованою та глобально визнаною. Студенти отримають більше автономії, викладачі — інструменти для автоматизації, а заклади — можливість конкурувати на міжнародному рівні. Для України це означатиме перехід до сучасної системи освіти, інтегрованої з глобальними стандартами, за умови поступового впровадження та підтримки держави.

Прогнозування еволюції ВНС із блокчейном вказує на їхній розвиток у бік децентралізації, персоналізації, токенизації та глобалізації. Технологія обіцяє трансформувати освіту, зробивши її безпечнішою, гнучкішою та доступнішою. Для України це відкриває перспективи модернізації, хоча потребує подолання технічних і фінансових бар'єрів у найближчі роки.

3.6 Висновки до розділу

Третій розділ роботи присвячено практичному застосуванню технології блокчейн у віртуальних навчальних середовищах (ВНС) і перспективам її розвитку. Аналіз охопив успішні кейси, вплив на прозорість і довіру, персоналізацію навчання, економічні аспекти та прогноз еволюції ВНС. Отримані результати підкреслюють потенціал блокчейну для трансформації освіти та його адаптацію до потреб сучасного суспільства.

Огляд кейсів, таких як MIT Blockcerts, Open University і проєкт Мальти, показав, що блокчейн ефективно вирішує проблеми верифікації сертифікатів, фіксації мікрокредитів і створення національних реєстрів. Ці приклади демонструють гнучкість технології для локальних і глобальних систем, що може бути використано в Україні для підвищення довіри до освіти. Вплив блокчейну

на прозорість і довіру проявляється через незмінність даних і автоматизацію, що усуває суб'єктивність і шахрайство в навчальних процесах. У [28] зазначається, що це сприяє визнанню онлайн-освіти, що є актуальним для глобалізації.

Персоналізація навчання через децентралізовані платформи відкриває можливості для створення індивідуальних траєкторій за допомогою цифрових портфоліо та смарт-контрактів. Економічні аспекти включають високі витрати на впровадження — розробку, інтеграцію, навчання — але обіцяють вигоду через автоматизацію, зменшення шахрайства та залучення іноземних студентів. Для України ключем є поступове впровадження з державною підтримкою для балансу витрат і доходів.

Прогноз еволюції ВНС із блокчейном передбачає перехід до децентралізованих платформ із інтеграцією ІШ, токенизацією та глобальними стандартами. Безпека, автономність і персоналізація стануть основними рисами майбутніх систем, що змінить освіту в найближчі 5-10 років. У [25] підкреслюється, що децентралізація може створити самокеровані екосистеми, що є перспективним для України за умови інвестування в інфраструктуру.

Блокчейн пропонує практичні рішення для підвищення прозорості, довіри та гнучкості ВНС, хоча потребує подолання економічних і технічних бар'єрів. Для України це шанс модернізувати освіту, інтегрувати її в глобальний простір і вирішити локальні проблеми, такі як академічна недобросовісність, за умови адаптації до місцевих реалій і поступового впровадження.

ВИСНОВКИ

Бакалаврська робота присвячена дослідженню можливостей використання технології блокчейн для вдосконалення віртуальних навчальних середовищ (ВНС). Аналіз сучасного стану, технічних аспектів і практичного застосування дозволив оцінити потенціал технології для підвищення безпеки, прозорості та ефективності освіти, а також визначити перспективи її впровадження в Україні.

Дослідження показало, що ВНС еволюціонували від простих систем до складних платформ, але стикаються з проблемами централізації, вразливості даних і фальсифікації результатів. Блокчейн пропонує рішення завдяки децентралізації, криптографії та смарт-контрактам. Порівняння з традиційними базами даних виявило переваги блокчейну в безпеці та стійкості, хоча його продуктивність потребує оптимізації. Зарубіжний досвід, наприклад, проекти MIT і Мальти, підтвердив практичну цінність технології для сертифікації та обліку даних.

Технічний аналіз визначив ключові аспекти впровадження. Вибір типу блокчейну (публічний, приватний, гібридний) залежить від потреб ВНС, де гібридні системи є компромісом між прозорістю та конфіденційністю. Структура зберігання даних у блокчейні забезпечує надійність сертифікатів і оцінок, а криптографія захищає персональну інформацію. Смарт-контракти автоматизують процеси, але інтеграція з існуючими платформами стикається з викликами сумісності та масштабованості. Енергоефективність покращується завдяки PoS і PoA, що робить приватні блокчейни привабливими для освіти.

Практичне застосування блокчейну підвищує прозорість і довіру, усуваючи шахрайство та суб'єктивність. Персоналізація через децентралізовані платформи дозволяє адаптувати навчання до потреб студентів, а економічні аспекти поєднують високі початкові витрати з довгостроковою вигодою від автоматизації та глобалізації. Прогноз еволюції ВНС передбачає перехід до

децентралізованих екосистем із ШІ, токенизацією та міжнародним визнанням результатів.

Для України блокчейн відкриває перспективи модернізації освіти. Інтеграція з «Дією», боротьба з фальсифікацією дипломів і персоналізація навчання можуть підвищити конкурентоспроможність вишів. У [28] зазначається, що технологія сприяє глобальному визнанню освіти, що актуально для України в контексті інтеграції до європейського простору. Однак впровадження потребує пілотних проєктів, державної підтримки та підвищення цифрової грамотності.

Блокчейн є перспективним інструментом для ВНС, вирішуючи їхні ключові проблеми та створюючи основу для інновацій. Успішна реалізація в Україні залежить від адаптації до місцевих умов, поступового впровадження та співпраці між державою, вишами та ІТ-сектором.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Блокчейн: теорія та практика / О. В. Ковальчук, А. М. Кудін, Н. В. Кучинська. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 141 с.
- 2) Габер С. Як зробити цифрові дані безпечними: перші кроки до блокчейну / С. Габер, В. С. Сторнетта // Journal of Cryptology. – 1991. – № 4. – С. 99–111.
- 3) Накамото С. Біткойн: однорангова електронна грошова система [Електронний ресурс] / С. Накамото. – 2008. – Режим доступу: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- 4) Технологія блокчейн в освіті [Електронний ресурс] // WhiteBIT Blog. – 2022. – Режим доступу: <https://blog.whitebit.com/uk/blockchain-in-education/>.
- 5) Греф А. Блокчейн у вищій освіті: нові можливості для сертифікації / А. Греф, Ф. Сабір // Smart Learning Environments. – 2017. – № 4. – С. 1–14.
- 6) Козловський Ю. М. Використання блокчейн для верифікації освітніх документів / Ю. М. Козловський // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету. – 2021. – Вип. 2. – С. 45–52.
- 7) Смарт-контракти: принципи та застосування / Л. В. Ковальчук. – Київ: Видавництво «Техніка», 2019. – 98 с.
- 8) Чен К. Блокчейн у навчанні: децентралізоване майбутнє освіти / К. Чен // Springer Open Journal. – 2018. – № 5. – С. 1–12.
- 9) Перспективи застосування технології блокчейну в освіті [Електронний ресурс] // Finances.in.ua. – 2022. – Режим доступу: <https://finances.in.ua/perspektyvy-zastosuvannya-tehnologiyi-blokcheynu-v-osviti/>.
- 10) Swan M. Blockchain: Blueprint for a New Economy / M. Swan. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2015. – 152 p.
- 11) Блокчейн: сутність і перспективи / В. І. Дубровський. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. – 210 с.

- 12) Han J. Blockchain Technology in Education: Opportunities and Challenges / J. Han, Y. Li // IEEE Transactions on Learning Technologies. – 2020. – Vol. 13, № 3. – P. 456–467.
- 13) Освітній проєкт з криптограмотності та блокчейну. Модуль 1 [Електронний ресурс] // Дія.Освіта. – 2023. – Режим доступу: <https://osvita.diia.gov.ua/courses/crypto-and-blockchain-module1>
- 14) Tapscott D. Blockchain Revolution: How the Technology Behind Bitcoin Is Changing Money, Business, and the World / D. Tapscott, A. Tapscott. – New York: Penguin Random House, 2016. – 368 p.
- 15) Блокчейн у державному управлінні: український досвід / О. П. Шевчук // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2019. – № 3. – С. 78–85.
- 16) Atzori M. Blockchain Technology and Decentralized Governance / M. Atzori // Journal of Governance and Regulation. – 2017. – Vol. 6, № 2. – P. 23–34.
- 17) Використання технології блокчейн для автоматизації управління / І. В. Гринишин // Науковий журнал "Економіка та суспільство". – 2021. – Вип. 25. – С. 112–119.
- 18) Yli-Huumo J. Where Is Current Research on Blockchain Technology? / J. Yli-Huumo, D. Ko // PLoS ONE. – 2016. – Vol. 11, № 10. – P. 1–27.
- 19) Блокчейн в освіті: перспективи застосування технології [Електронний ресурс] // Guland. – 2019. – Режим доступу: <https://guland.com.ua/kryptovalyuta/blockchain/blokcheyn-v-osviti.htm>
- 20) Zheng Z. An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends / Z. Zheng, S. Xie // IEEE International Congress on Big Data. – 2017. – P. 557–564.
- 21) Криптовалюти та блокчейн: основи для початківців / О. В. Литвиненко. – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2022. – 180 с.
- 22) Blockchain in Education: A Systematic Review / A. Alammery, S. Alhazmi // Education and Information Technologies. – 2019. – Vol. 24, № 5. – P. 3299–3323.

- 23) Технологія блокчейн: від біткойна до освіти / П. І. Сидоренко // Інформаційні технології в освіті. – 2020. – № 2. – С. 34–41.
- 24) Buterin V. Ethereum: A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform [Електронний ресурс] / V. Buterin. – 2014. – Режим доступу: <https://ethereum.org/en/whitepaper/>.
- 25) Децентралізовані технології в освіті / М. О. Кравченко. – Одеса: Видавничий дім "Гельветика", 2021. – 156 с.
- 26) Kshetri N. Blockchain's Roles in Strengthening Cybersecurity and Protecting Privacy / N. Kshetri // Telecommunications Policy. – 2017. – Vol. 41, № 10. – P. 1027–1038.
- 27) Блокчейн-технології: сутність і класифікація / О. В. Романенко // Академічний журнал "Економіка та управління". – 2022. – № 1. – С. 56–63.
- 28) Unlocking the Power of Blockchain in Education / S. Kumar, R. Jain // ScienceDirect. – 2023. – Vol. 9. – P. 40–52.
- 29) Все про блокчейн: як працює, де застосовують [Електронний ресурс] // ТСН. – 2023. – Режим доступу: <https://tsn.ua/groshi/vse-pro-blokcheyn-yak-pracyuye-hto-koristuyetsya-de-zastosovuyut-2378878.html>

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Класифікація віртуальних навчальних систем за функціоналом і аудиторією

Тип ВНС	Функціонал	Цільова аудиторія	Приклади	Особливості
Системи управління навчанням (LMS)	Організація курсів, тести, аналітика	Вища освіта, школи	Moodle, Blackboard	Універсальність, модульність
Масові онлайн-курси (MOOC)	Відеолекції, сертифікація	Широка аудиторія	Coursera, edX	Масштабованість, доступність
Адаптивні системи	Персоналізація, ІІІ	Вища освіта, професіонали	Smart Sparrow	Індивідуальний підхід
Платформи для шкільної освіти	Завдання, спілкування	Школярі, вчителі	Google Classroom	Простота, інтеграція
Професійне навчання	Практичні курси, сертифікати	Дорослі, професіонали	LinkedIn Learning	Фокус на кар'єру
Неформальна освіта	Інтерактивність, гейміфікація	Самоосвіта	Khan Academy	Доступність, мотивація

Таблиця А.2 – Порівняння традиційних баз даних із децентралізованими блокчейн-системами

Параметр	Традиційні бази даних	Децентралізовані блокчейн-системи
Архітектура	Централізована	Децентралізована
Безпека	Залежить від адміністрування	Криптографічна, незмінність
Швидкість обробки	Висока (тисячі транзакцій/с)	Нижча (залежить від консенсусу)
Доступність	Контрольована адміністратором	Прозора, регульована ключами
Стійкість до збоїв	Залежить від одного сервера	Висока завдяки розподіленості
Масштабованість	Висока	Обмежена, але розвивається
Приклади	MySQL, Oracle	Bitcoin, Ethereum

Таблиця А.3 – Порівняння типів блокчейн для освітніх платформ

Характеристика	Публічний блокчейн	Приватний блокчейн	Гібридний блокчейн
Децентралізація	Повна	Обмежена	Часткова
Доступ до даних	Відкритий для всіх	Тільки авторизовані	Комбінований
Швидкість транзакцій	Низька	Висока	Середня
Конфіденційність	Низька	Висока	Регульована
Енергоефективність	Низька	Висока	Середня
Приклади	Bitcoin, Ethereum	Hyperledger Fabric	Corda, Dragonchain

Продовження таблиці А.3

Застосування в ВНС	Сертифікація	Облік даних	Сертифікація + облік
--------------------	--------------	-------------	----------------------

Таблиця А.4 – Порівняння успішних кейсів використання блокчейн в освіті

Кейс	Країна	Тип блокчейну	Застосування	Переваги	Рік запуску
MIT (Blockcerts)	США	Публічний	Видача цифрових дипломів	Верифікація, захист від підробки	2017
Open University	Великобританія	Публічний	Фіксація мікрокредитів	Гнучкість, портфоліо досягнень	2018
Національний реєстр	Мальта	Гібридний	Реєстр сертифікатів	Прозорість, масштабування	2017
Університет Нанкай	Китай	Приватний	Оцінки, сертифікати	Захист від шахрайства	2019
SkillsFuture	Сінгапур	Гібридний	Запис навичок	Інтеграція з ринком праці	2016