

УДК 004.651:378:330.341.1

DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2026-2-34>**Сергій ЩЕРБАКОВ**

аспірант кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, Україна, 69063

ORCID: 0009-0002-8056-7578

Дмитро ШИРОКОРАД

доцент кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, Україна, 69063

ORCID: 0000-0002-2784-4081

Бібліографічний опис статті: Щербаков, С. С., Широкоград, Д. В. (2026). Концептуальне та логічне моделювання взаємодії освіти і бізнесу засобами теорії множин на основі блокчейн. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2026-2-34>

КОНЦЕПТУАЛЬНЕ ТА ЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ОСВІТИ І БІЗНЕСУ ЗАСОБАМИ ТЕОРІЇ МНОЖИН НА ОСНОВІ БЛОКЧЕЙН

Мета роботи. Розробка концептуальної та логічної моделей реляційної бази даних інформаційної системи освітньо-бізнесового середовища на архітектурі Quadruple Helix із blockchain-верифікацією, а також формалізація обмежень цілісності засобами теорії множин задля підвищення надійності зберігання та перевірки даних.

Методологія. Проєктування виконано у трьох рівнях: концептуальний – визначення сутностей та зв'язків відповідно до архітектури Quadruple Helix; логічний – нормалізація до 5NF та специфікація типів даних; формальний – опис обмежень апаратом теорії множин. Загальна структура охоплює 52 таблиці у 7 послідовних етапах із вузлами EDUCATION, BUSINESS, REGULATOR, USER. Blockchain-шар реалізовано через SHA-256-хешування документів, стандарт ERC-20 для токенів та ERC-721 для NFT-сертифікатів. Прогнозований обсяг розраховано для 16 119 закладів освіти України, 1,5 млн студентів та 500 тис. працівників бізнес-організацій.

Наукова новизна. Запропоновано семирівневу архітектуру реляційної бази даних на 52 таблиці, яка вперше комплексно поєднує модель Quadruple Helix із blockchain-захистом документів, навичок і токенних транзакцій у рамках єдиної СУБД. Формалізовано обмеження цілісності освітньої гілки через предикатну логіку та апарат теорії множин. Розроблено методику кількісного аналізу розподілу навантаження між таблицями, яка виявила, що таблиця токенних транзакцій (500 млн записів) охоплює 65,98 % прогнозованого обсягу у 180,69 ГБ.

Висновки. Реляційна база даних на 52 таблиці забезпечує зберігання та верифікацію даних про учасників освітньо-бізнесового середовища: 16 119 закладів освіти, 1,5 млн студентів і 500 тис. працівників. Теорія множин дозволяє специфікувати шість класів обмежень: унікальності, ієрархічності, референтної цілісності, темпоральні, однозначності ролі та обчислюваних полів. Blockchain-шар через SHA-256, ERC-20 та ERC-721 формує єдиний простір довіри між секторами. Прогнозований обсяг системи – 180,69 ГБ при 768,55 млн записів.

Ключові слова: реляційна база даних, Quadruple Helix, blockchain, NFT, теорія множин, нормалізація, освітньо-бізнесове середовище, верифікація.

Serhii SHCHERBAKOV

Postgraduate Student at the Department of System Analysis and Computational Mathematics, Zaporizhzhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskoho St., Zaporizhzhia, Ukraine, 69063

ORCID: 0009-0002-8056-7578

Dmytro SHYROKORAD

Associate Professor at the Department of System Analysis and Computational Mathematics, Zaporizhzhia Polytechnic National University, 64, Zhukovskoho St., Zaporizhzhia, Ukraine, 69063

ORCID: 0000-0002-2784-4081

To cite this article: Shcherbakov, S. S., Shyrokorad, D. V. (2026). Kontseptualne ta lohichne modeliuvannia vzaiemodii osvity i biznesu zasobamy teorii mnozhyn na osnovi blokchein [Conceptual and logical modeling of education-business interaction using set theory on a blockchain basis]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2026-2-34>

CONCEPTUAL AND LOGICAL MODELING OF EDUCATION-BUSINESS INTERACTION USING SET THEORY ON A BLOCKCHAIN BASIS

Purpose. To develop conceptual and logical models of a relational database for an education-business information system based on the Quadruple Helix architecture with blockchain verification, and to formalize integrity constraints using set theory methods to improve data reliability and auditability.

Methodology. The design spans three levels: conceptual – entity and relationship modeling under the Quadruple Helix framework; logical – normalization to 5NF and data type specification; formal – constraint description via set theory predicates and quantifiers. The structure comprises 52 tables in 7 stages with EDUCATION, BUSINESS, REGULATOR, and USER node types. The blockchain layer uses SHA-256 document hashing, the ERC-20 token standard, and ERC-721 NFT certificates. Volume projections are calculated for 16,119 Ukrainian educational institutions, 1.5 million students, and 500,000 business employees.

Scientific novelty. A seven-stage relational database architecture with 52 tables is proposed, which for the first time combines the Quadruple Helix model with blockchain protection of documents, skills, and token transactions within a single DBMS. Integrity constraints for the educational branch are formalized via predicate logic and set theory. A quantitative load distribution methodology is developed, establishing that the token transaction table (500 million records) accounts for 65.98 % of the projected 180.69 GB total volume.

Conclusions. The 52-table relational database covers 16,119 educational institutions, 1.5 million students, and 500,000 business employees. Set theory enables specification of six constraint classes: uniqueness, hierarchy, referential integrity, temporal, role uniqueness, and computed fields. The blockchain layer via SHA-256, ERC-20, and ERC-721 creates a unified trust space across sectors. The projected system volume is 180.69 GB across 768.55 million records.

Key words: relational database, Quadruple Helix, blockchain, NFT, set theory, normalization, education-business environment, verification.

Актуальність проблеми. Цифрова трансформація освіти та бізнесу поставила на порядок денний потребу у спільних інформаційних платформах, що здатні фіксувати складні взаємозв'язки між різними секторами суспільства. Станом на 2023/24 навчальний рік в Україні налічується 16 119 закладів освіти різних рівнів (Інститут освітньої аналітики, 2024), а загальний контингент студентів перевищує 1,5 млн осіб. Демографічні втрати, пов'язані зі збройним конфліктом та еміграційними хвилями, скоротили населення країни приблизно на 10 млн осіб від 2014 року (UN News, 2024), що суттєво загострює конкуренцію за кваліфіковані кадри.

Роботодавці дедалі частіше вимагають верифікованих, машинозчитуваних даних про

компетентності здобувачів, натомість традиційні паперові дипломи є вразливими до фальсифікацій. Blockchain-технологія пропонує принципово інший підхід: незмінювані записи про досягнення, доступні для перевірки без залучення посередників (Grech et al., 2022). Проектування єдиної реляційної бази даних, що охоплює освітній, бізнесовий та регуляторний домени в межах архітектури Quadruple Helix, є нагальним кроком до побудови відкритої інформаційної екосистеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Концепцію Triple Helix – взаємодії університетів, промисловості та держави – запропонували (Etzkowitz та Leydesdorff, 2000). Розширення до Quadruple Helix шляхом включення громадянського суспільства як четвертого

актора обґрунтували (Carayannis та Campbell, 2009), а порівняльний аналіз обох моделей для емпіричних досліджень виконали (Cai та Lattu, 2022), підтвердивши більшу охоплюваність Quadruple Helix для сучасних інноваційних екосистем. Автори пропонують концепцію «нескінченної перспективи»: замість додавання нових спіралей вводяться різні «рамки аналізу» (scopes), що дозволяє досліджувати динаміку як між, так і всередині університету, промисловості та уряду (Simoes et al., 2022).

У галузі blockchain-верифікації освітніх документів накопичено значну дослідницьку базу. У дослідженні (Chen et al., 2018) проаналізовано потенціал технології блокчейн для освітньої сфери та встановлено, що її застосування забезпечує надійне зберігання й верифікацію академічних даних, знижує ризики їх фальсифікації та спрощує обмін інформацією між освітніми установами. Визначено, що децентралізована архітектура сприяє підвищенню прозорості та довіри, а також розширює можливості здобувачів освіти щодо контролю власних досягнень. Водночас акцентовано на обмеженнях практичного впровадження, зокрема проблемах масштабованості та необхідності нормативного врегулювання.

У дослідженні (Grech et al., 2022) визначено, що застосування блокчейн-технологій в освіті сприяє підвищенню прозорості, довіри та ефективності управління освітніми даними, зокрема у сфері визнання кваліфікацій і мобільності здобувачів освіти. Обґрунтовано, що децентралізовані рішення дозволяють забезпечити надійну верифікацію освітніх досягнень і зменшити адміністративні бар'єри. Водночас наголошено, що масштабне впровадження обмежується технологічними викликами, відсутністю єдиних стандартів та необхідністю нормативно-правового регулювання.

У роботі (Rustemi et al., 2023) проведено систематичний огляд літератури щодо застосування блокчейну для верифікації академічних сертифікатів. Застосовуючи методологію PRISMA, автори відібрали 34 релевантні дослідження з 1744 публікацій (2018–2022) і згрупували їх за шістьма напрямками: класифікація блокчейн-систем, автоматизована генерація дипломів, безпека, прозорість, адаптивність і допоміжні технології. Встановлено, що блокчейн пришвидшує верифікацію сертифікатів і усуває залежність від централізованого органу, однак залишаються прогалини у стандартизації, дотриманні законодавства про захист даних та інтеграції з наявною освітньою інфраструктурою. Майбутні дослідження, на думку авторів,

мають спиратися на емпіричні дані від студентів та академічного персоналу щодо практичного використання таких систем.

У роботі (Berrios et al., 2025) розроблено та реалізовано систему ZKBAR-V для верифікації академічних сертифікатів із застосуванням доказів з нульовим розголошенням (ZKP). Система поєднує публічний і приватний zkEVM-блокчейн: приватний зберігає чутливі дані студентів (номер паспорта, оцінки, дисциплінарні записи), а публічний фіксує лише криптографічні хеші та zk-SNARK-докази, не розкриваючи особистої інформації під час верифікації. Для зберігання документів використовується IPFS, а ідентифікація студентів здійснюється через децентралізовані ідентифікатори (DID). Тестування показало, що система витримує до 280 одночасних запитів без погіршення продуктивності, ZKP-верифікація виконується за 5,8 мс – приблизно у 120 разів швидше порівняно зі звичайним EVM (708 мс), а використання zkEVM Polygon знижує транзакційні витрати на ~94% порівняно з Ethereum Mainnet. Автори зазначають, що серед невирішених питань залишаються оцінка затримки реального завантаження IPFS та доступність системи для користувачів з низьким рівнем цифрової грамотності (Berrios et al., 2025).

NFT-сертифікати на основі стандарту ERC-721 як інструмент довгострокової верифікації освітніх досягнень досліджували (Wu та Liu, 2023). Проведено огляд літератури та серію кейс-стаді щодо застосування невзаємозамінних токенів (NFT) в освіті. Автори виявили 10 напрямів використання NFT: підручники, мікросертифікати, залікові відомості та записи, стипендії та права, майстер-класи й створення контенту, навчальний досвід, реєстрація та збір даних, патенти й дослідження, мистецтво, а також платежі й зберігання. На основі аналізу конкретних платформ – Eduloco, BooksGoSocial, Bees2be та OMIA – із застосуванням SWOT-аналізу було встановлено, що найбільш перспективним напрямом є зберігання залікових відомостей і записів, оскільки паперові та звичайні електронні документи легко втрачаються або стають недоступними, тоді як NFT забезпечує їх постійне збереження та швидкий доступ без необхідності проходити складні адміністративні процедури. Водночас автори зазначають, що карбування NFT на блокчейнах із доказом виконання роботи (proof-of-work) потребує значних енерговитрат, і рекомендують використовувати блокчейни з доказом частки (proof-of-stake), зокрема Ethereum, Solana або Algorand, для зменшення екологічного навантаження.

Blockchain-інтеграцію в міжорганізаційні бізнес-процеси та автоматизацію з використанням мережі LTO Network вивчали (Khryupko та Shcherbakov, 2024). Стаття присвячена розгляду блокчейн-технології як засобу автоматизації міжорганізаційних бізнес-процесів. Зазначається, що цифровізація внутрішніх процесів дає переваги щодо продуктивності та скорочення витрат, однак організації стикаються з труднощами при спробі отримати такі переваги для міжорганізаційних процесів – частково через брак довіри.

Інформація між учасниками передається через приватні ланцюжки подій для кожного процесу та хешується у публічному блокчейні. Такий гібридний підхід дозволяє організаціям дотримуватись вимог захисту даних і уникати проблем масштабованості. Live contracts описують взаємодію між сторонами, на відміну від смарт-контрактів Ethereum, що зберігають значення напряду. Моделювання у вигляді скінчених автоматів дозволяє візуалізувати їх у формі блок-схеми; також розглядаються мережі Петрі та BPMN. Консенсус-алгоритм базується на важливості володіння токенами, а протокол NG та агрегаційні блоки забезпечують масштабування при великій кількості транзакцій.

Огляд переваг і ризиків blockchain у різних галузях країн, що розвиваються, представили (Al-Sulami et al., 2024). Дослідження систематично проаналізувало 86 статей (2019 – червень 2023 р.) щодо впровадження блокчейну в різних галузях країн, що розвиваються. Встановлено, що технологія перебуває на початковому етапі розвитку, проте викликає інтерес у багатьох секторах. Серед найпоширеніших теоретичних моделей – TAM, UTAUT і Task Technology Fit. Виявлено переваги блокчейну (безпека, прозорість, зниження витрат), а також бар'єри та виклики його прийняття в різних індустріях.

Формальний апарат реляційної алгебри та нормалізацію баз даних до п'ятої нормальної форми описано в навчальних ресурсах (TutorialsPoint, 2024; Studytonight, 2024). Математичні основи проектування реляційних систем на базі теорії множин та предикатної логіки висвітлено у фундаментальних джерелах (Britannica, 2024).

Мета дослідження: розробити концептуальну та логічну моделі реляційної бази даних освітньо-бізнесового середовища на архітектурі Quadruple Helix із blockchain-верифікацією та формалізувати обмеження цілісності освітнього домену засобами теорії множин.

Виклад основного матеріалу. Архітектурну основу системи утворює кастомізована модель Quadruple Helix (Carayannis та Campbell, 2009), де кожен учасник освітньо-бізнесового середовища відноситься до одного з чотирьох типів вузлів: EDUCATION (освітні заклади), BUSINESS (підприємства), REGULATOR (державні органи), USER (фізичні особи) замість громадського суспільства. Концептуальна модель описує предметну область незалежно від конкретної СУБД, фіксуючи сутності, атрибути та зв'язки між ними. Загальна структура налічує 52 таблиці, що формуються у 7 послідовних етапах. Результати візуалізовано на рисунках 1–3. Проектування бази даних охоплює три рівні абстракції. Концептуальний рівень визначає сутності та зв'язки між ними без прив'язки до конкретної СУБД. Логічний рівень деталізує атрибути, первинні та зовнішні ключі, виконує нормалізацію. Фізичний рівень реалізує схему в обраній СУБД – MySQL, Oracle чи PostgreSQL – з урахуванням індексування, зберігання даних та контролю доступу (Visual Paradigm, 2024). Основні техніки моделювання – ERD, UML та словники даних (LeanIX, 2024).

Перший етап охоплює незалежні довідникові таблиці: географічний блок (country за ISO 3166, city, country_city), лінгвістичний блок (language за ISO 639-1), компетентнісний блок (proficiency_level за шкалою Beginner–Master), освітній довідниковий блок (education_form, education_year, education_semester) та класифікаційний блок із рекурсивними зв'язками для навичок і організацій. Другий етап визначає таблицю organization як центральний реєстр із типізацією Quadruple Helix, кодом ЄДРПОУ, blockchain-адресою вузла та ідентифікатором шарду (0–119). Третій–сьомий етапи послідовно формують блоки приватних користувачів, освітніх закладів, бізнес-організацій, регуляторних органів і токеномічний блок. Сутність person є центральною, пов'язаною з навичками, мовними компетентностями, досвідом роботи, академічним статусом, документами та цифровим гаманцем.

В основі моделі лежить чотириланкова спіраль. Вона об'єднує чотири ключові актори: освітні заклади, бізнес-організації, регуляторний орган від держави та фізичних осіб. Їхня взаємодія відбувається в межах 12 функціональних блоків, що дозволяє юридичним особам створювати запити на стажування, а закладам освіти – пропонувати релевантних студентів.

Система функціонує за замкненим інформаційним циклом. Усе починається з реєстрації

Conceptual Model of the Open Information System of the Education-Business Environment (Quadruple Helix Architecture)

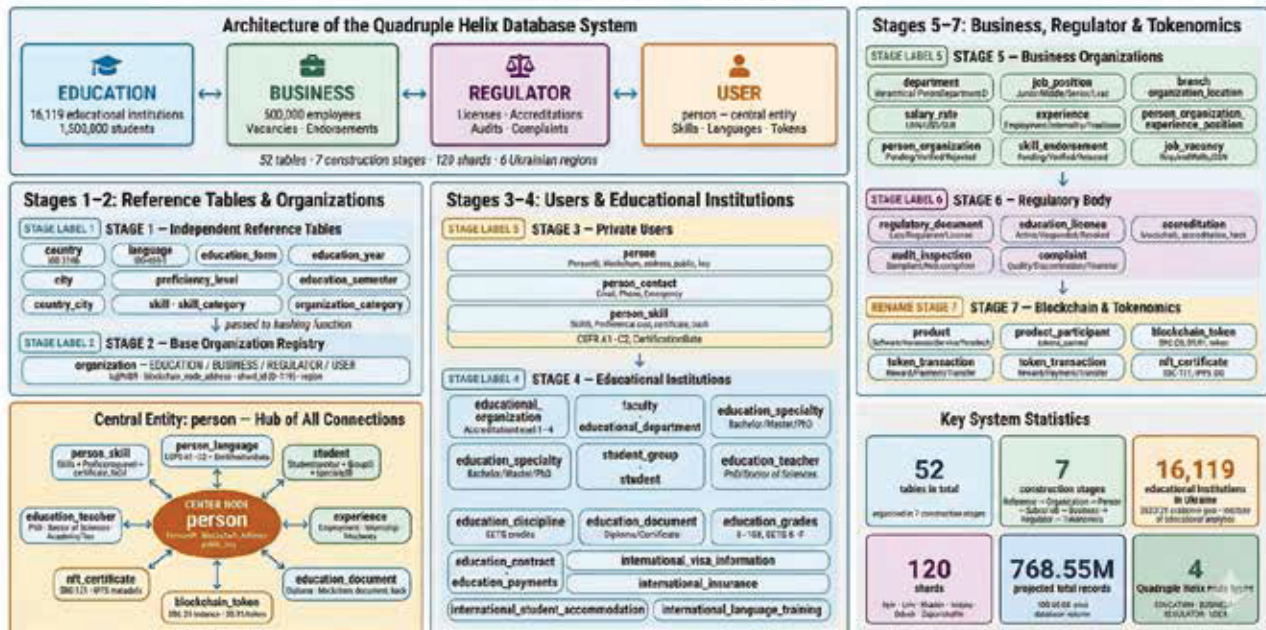


Рис. 1. Концептуальна модель інформаційно-відкритої системи освітньо-бізнесового середовища

Джерело: розроблено автором

студента. Далі ці дані проходять криптографічну верифікацію через блокчейн, що робить їх незмінними. На основі цих даних система автоматично генерує резюме з гарантованою достовірністю.

Для забезпечення безпеки ключові сутності «Особа» та «Організація» наділені криптографічними атрибутами. Адреса гаманця ідентифікує користувача, а публічний ключ дозволяє перевірити його цифровий підпис. Хеші документів у блокчейні підтверджують, що інформація про досягнення є автентичною та не зазнавала модифікацій.

Поле `blockchain_hash` функціонує як криптографічний зв'язок: воно розташоване в реляційній таблиці, але посилається на відповідний запис у блокчейні. Цей механізм поєднує швидкість реляційної бази та надійність блокчейну.

Створення моделі відбувається в 7 послідовних етапах – від загального до конкретного. Все починається з фундаментальних незалежних довідників. Далі створюється універсальна сутність «Організація», яка потім деталізується специфічними атрибутами для 4 груп акторів. Для освітніх закладів вона розширюється, додаючи унікальні поля: рівень акредитації, номер ліцензії. Такий підхід дозволяє уникнути дублювання інформації та зберегти логічну структуру.

Передбачено гібридну структуру зберігання. Конфіденційні персональні дані знаходяться у захищеній реляційній базі даних, тоді як у публічний блокчейн виносяться лише їх криптографічні хеші. Це дозволяє будь-кому верифікувати автентичність даних, не розкриваючи приватної інформації.

Логічна модель деталізує структуру через конкретні типи даних та ключі. Використовуються типи: INT для ідентифікаторів, VARCHAR змінної довжини для текстових полів, ENUM для фіксованих переліків, DECIMAL для фінансових показників, TIMESTAMP для часових міток. Нормалізацію (Studytonight, 2024) виконано до п'ятої нормальної форми (Studytonight, 2024): 1NF забезпечує атомарність значень; 2NF усуває часткові залежності від складеного ключа; 3NF виключає транзитивні залежності; BCNF – залежності ключових атрибутів від неключових; 4NF та 5NF усувають багатозначні залежності й аномалії з'єднання. Нижче в таблиці 1 наведено ключові таблиці логічної моделі.

Логічна модель бази даних є центральним технічним рішенням системи ТЕБІ (Transparent Education-Business Interaction) – вона визначає, як саме зберігаються, пов'язуються і захищаються дані всіх учасників освітньо-бізнесової взаємодії. На відміну від концептуальної моделі, логічна модель деталізує кожну таблицю: типи

даних, первинні та зовнішні ключі, зв'язки між об'єктами. Саме на цьому рівні приймаються рішення, які безпосередньо впливають на продуктивність і цілісність системи.

Модульна структура складається з шести логічних блоків. Незалежні довідникові таблиці – країни, міста, мови – є основою для всіх інших блоків. Блок організацій і приватних користувачів фіксує юридичних та фізичних осіб із їхніми ролями. Блок освітніх закладів охоплює навчальні програми, семестри, групи, навчальне навантаження та документи. Міжнародний блок забезпечує підтримку іноземних студентів – страхування, проживання, мовна підтримка. Блок бізнес-організацій зберігає вакансії, контракти та процеси підбору персоналу. Регуляторний блок фіксує акредитації, ліцензії та журнали аудиту.

Гарантія цілісності даних досягається через нормалізацію. Кожен етап від першої до п'ятої нормальної форми послідовно усуває надлишковість та потенційні аномалії модифікації. Перша усуває повторювані групи, друга – часткові залежності, третя – транзитивні, четверта – багатозначні залежності, не пов'язані з ключем, п'ята – аномалії з'єднання. Результат: структура без надлишковості та без аномалій оновлення.

Для моделювання зв'язків «багато до багатьох» – наприклад, коли багато студентів володіють багатьма навичками – використовуються проміжні таблиці. Таблиця `Person_skill` з'єднує сутності користувача та його навички, що дозволяє уникнути надлишковості і чітко відобразити складні зв'язки в системі.

Оптимізація бази даних вимагає раціонального вибору типу даних. Для полів з обмеженим набором значень, таких як ролі користувача, використовується `ENUM` (1 байт). Там де важлива точність – `DECIMAL` (8 байт). Для числових ідентифікаторів – `TINYINT` (1 байт). Найбільше місця займає `token_transaction` – на неї припадає 66 %. Це пов'язано з тим, що кожне освітнє досягнення генерує транзакцію, що свідчить про високу очікувану активність у системі.

Для вирішення проблеми продуктивності при роботі з великими обсягами історичних даних застосовується партиціонування. Таблиця транзакцій логічно сегментується за датою, що дозволяє при виконанні запиту сканувати не всю таблицю, а лише відповідний часовий проміжок.

Для збереження цілісності при видаленні записів використовуються правила зовнішніх ключів. Правило `CASCADE` означає, що при видаленні студента автоматично видаляються всі пов'язані з ним оцінки. Правило `SET NULL` працює інакше: якщо з університету звільняється куратор, поле «куратор» у записі групи стає порожнім, а сама група залишається. Для зберігання даних зі складною або змінною структурою використовується формат `JSON`, що дозволяє гнучко зберігати ієрархічні списки без необхідності змінювати архітектуру бази даних.

Для виявлення критичних таблиць проведено кількісний аналіз прогнозованого обсягу даних. Система розрахована на обслуговування 16 119 закладів освіти (Institute of Educational Analytics, 2024), 1 500 000 студентів та

Таблиця 1

Ключові таблиці логічної моделі та їхнє призначення (розроблено авторами)

№	Таблиця	Первинний ключ	Тип QH	Призначення
1	Organization	OrganizationID (INT)	усі типи	Центральний реєстр організацій із типізацією <code>Quadruple Helix</code>
2	Person	PersonID (INT)	USER	Реєстр приватних користувачів із <code>Ethereum</code> -адресою
3	Student	StudentID (INT)	EDUCATION	Здобувачі освіти з <code>blockchain</code> -ідентифікатором
4	education_teacher	TeacherID (INT)	EDUCATION	Педагогічний персонал із науковими ступенями
5	job_vacancy	VacancyID (INT)	BUSINESS	Вакансії з <code>JSON</code> -переліком необхідних навичок
6	skill_endorsement	EndorsementID (INT)	BUSINESS	Верифікація навичок зовнішніми організаціями
7	regulatory_document	DocumentID (INT)	REGULATOR	Нормативно-правові акти та їх <code>blockchain</code> -хеші
8	nft_certificate	NFTID (INT)	USER	<code>ERC-721</code> NFT-сертифікати з <code>IPFS</code> -посиланнями
9	token_transaction	TransactionID (INT)	усі типи	Повна хронологія <code>ERC-20</code> токенних транзакцій
10	blockchain_token	TokenID (INT)	USER	Баланс токенів (\$0,01 за токен)

500 000 працівників бізнес-організацій при 120 шардах із прив'язкою до шести регіонів України (Kyiv, Lviv, Kharkiv, Dnipro, Odesa, Zaporizhzhia). Результати аналізу зведено у таблиці 2.

Домінування таблиці `token_transaction` (65,98 %) зумовлене зберіганням повної хронології 500 млн токенних транзакцій для забезпечення аудиту `blockchain`-операцій. Шість найбільших таблиць охоплюють понад 87 % від загального обсягу 180,69 ГБ. Для оптимізації передбачено: партиціонування `token_transaction` за полем `TransactionDate`; індексацію всіх зовнішніх ключів (FOREIGN KEY); додаткові індекси на полях `blockchain_address`, `wallet_address`, `EDRPOU`, `skill_hash`, `StudentNumber`; каскадне видалення ON DELETE CASCADE для залежних записів та ON DELETE SET NULL для опціональних зв'язків. JSON-поля (`RequiredSkillsJSON`, `TechnologyStack`, `ResponsibilitiesJSON`) забезпечують гнучкість без надлишкових таблиць 3–8.

Географічний блок формується з трьох взаємопов'язаних таблиць: `country` зберігає перелік країн із кодами за стандартом ISO 3166 Alpha-2, `city` – довідник міст, а проміжна таблиця `country_city` реалізує відношення один-до-одного між ними, оскільки одне місто може належати лише до одного адміністративного утворення. Лінгвістичний блок представлений таблицею `language` з кодами ISO 639-1 для стандартизованої ідентифікації мов світу. Таблиця `proficiency_level` визначає п'ятирівневу шкалу компетентності – Beginner, Intermediate, Advanced, Expert, Master – яка використовується для оцінювання навичок у всій системі.

Компетентнісний блок персони починається з ієрархічного класифікатора `skill_category`, що підтримує рекурсивний зв'язок через `ParentCategoryID` для побудови довільно глибокого дерева категорій. Таблиця `skill` зберігає реєстр усіх навичок із SHA-256 хешем кожного

запису для `blockchain` верифікації. Центральною сутністю всієї системи є таблиця `person`, що фіксує демографічні дані, Ethereum-адресу та публічний ключ кожного учасника освітньо-бізнесового середовища. Контактна інформація винесена в окрему таблицю `person_contact` для дотримання принципу єдиної відповідальності.

Навички особи пов'язуються з рівнем володіння через таблицю `person_skill`, яка додатково зберігає дату набуття, роки практичного досвіду та `blockchain`-хеш сертифіката підтвердження. Мовні компетентності фіксуються в таблиці `person_language` за шкалою CEFR від A1 до C2 з датою сертифікації. Трудовий досвід описується таблицею `experience` з класифікацією за типами активності: Employment, Internship, Freelance, Volunteering, Project. Комплексний зв'язок між особою, організацією, конкретним досвідом і посадою реалізовано через таблицю `person_organization_experience_position`, яка зберігає обов'язки та досягнення у форматі JSON для максимальної гнучкості структури.

Часова структура навчального процесу забезпечується трьома довідниковими таблицями: `education_form` визначає форми здобуття освіти (Full-time, Part-time, Distance, Evening), `education_year` фіксує академічні роки з датами початку та завершення, `education_semester` деталізує кожен рік до конкретних семестрів. Таблиця `educational_organization` розширює базовий реєстр `organization` освітньо-специфічними атрибутами: типом закладу, номером ліцензії МОН та прізвищем ректора.

Академічна ієрархія будується послідовно: факультети (`faculty`) підпорядковуються освітній організації, кафедри (`educational_department`) – факультетам, а освітні спеціальності (`education_specialty`) прив'язані до організації з визначенням рівня кваліфікації – Bachelor, Master або PhD. Організаційний рівень охоплює студентські групи (`student_group`) та реєстр студентів

Таблиця 2

Аналіз прогнозованих розмірів таблиць бази даних (розроблено авторами)

Таблиця БД	Прогноз записів	Розмір запису (байт)	Обсяг (ГБ)	Частка (%)
<code>token_transaction</code>	500 000 000	256	119,21	65,98
<code>education_grades</code>	120 000 000	96	10,73	5,94
<code>person_organization_experience_position</code>	20 000 000	512	9,54	5,28
<code>Experience</code>	15 000 000	512	7,15	3,96
<code>person_skill</code>	50 000 000	128	5,96	3,30
<code>skill_endorsement</code>	25 000 000	256	5,96	3,30
<code>nft_certificate</code>	10 000 000	384	3,58	1,98
Інші таблиці (44 шт.)	~27 550 000	–	16,56	9,16
РАЗОМ	768 550 000	–	180,69	100,00

Таблиця 3

Довідникові таблиці (розроблено авторами)

№	Таблиця	Первинний ключ	Основні атрибути	FOREIGN KEY	Призначення
1	Country	CountryID (INT)	CountryName (VARCHAR 100), ISO3166_Alpha2 (CHAR 2)	–	Довідник країн за стандартом ISO 3166
2	City	CityID (INT)	CityName (VARCHAR 100)	–	Довідник міст
3	country_city	CountryCityID (INT)	CountryID, CityID	CountryID → country, CityID → city	Географічна прив'язка міст до країн (багато-до-багатьох)
4	language	LanguageID (INT)	LanguageName (VARCHAR 50), ISO639_1 (CHAR 2)	–	Довідник мов за стандартом ISO 639-1
5	proficiency_level	ProficiencyLevelID (INT)	ProficiencyLevelName (ENUM), Description (TEXT)	–	П'ятирівнева шкала: Beginner, Intermediate, Advanced, Expert, Master

Таблиця 4

Персона (розроблено авторами)

№	Таблиця	Первинний ключ	Основні атрибути	FOREIGN KEY	Призначення
6	skill_category	CategoryID (INT)	CategoryName (VARCHAR 100), Description (TEXT), ParentCategoryID	ParentCategoryID → skill_category	Ієрархічна класифікація навичок із рекурсивним зв'язком
7	Skill	SkillID (INT)	SkillName (VARCHAR 100), Description (TEXT), CategoryID, skill_hash (VARCHAR 64)	CategoryID → skill_category	Реєстр навичок із SHA-256 хешем для blockchain верифікації
8	Person	PersonID (INT)	FirstName (VARCHAR 100), LastName (VARCHAR 100), DateOfBirth (DATE), Gender (ENUM), organization_id, blockchain_address (VARCHAR 42), public_key (TEXT)	organization_id → organization	Центральна сутність системи – реєстр фізичних осіб
9	person_contact	ContactID (INT)	PersonID, Email (VARCHAR 100), Phone (VARCHAR 20), Address (TEXT), EmergencyContact, EmergencyPhone	PersonID → person	Контактні дані та інформація для екстрених випадків
10	person_skill	PersonSkillID (INT)	PersonID, SkillID, ProficiencyLevelID, AcquiredDate, YearsOfExperience, blockchain_certificate_hash (VARCHAR 64)	PersonID → person, SkillID → skill, ProficiencyLevelID → proficiency_level	Зв'язок осіб із навичками та рівнем володіння
11	person_language	PersonLanguageID (INT)	PersonID, LanguageID, ProficiencyLevel (ENUM A1–C2), CertificationDate, CertificateHash (VARCHAR 64)	PersonID → person, LanguageID → language	Мовні компетентності осіб за шкалою CEFR
12	Experience	ExperienceID (INT)	PersonID, StartDate, EndDate, Description (TEXT), ExperienceType (ENUM), blockchain_experience_hash (VARCHAR 64)	PersonID → person	Досвід роботи: Employment, Internship, Freelance, Volunteering, Project
13	person_organization_experience_position	POEPID (INT)	PersonID, OrganizationID, ExperienceID, PositionID, StartDate, EndDate, IsCurrentPosition (BOOLEAN), ResponsibilitiesJSON (TEXT), AchievementsJSON (TEXT)	PersonID → person, OrganizationID → organization, ExperienceID → experience, PositionID → job_position	Комплексна фіксація повної професійної траєкторії особи

Таблиця 5

Навчальний заклад (розроблено авторами)

№	Таблиця	Первинний ключ	Основні атрибути	FOREIGN KEY	Призначення
14	education_form	FormID (INT)	FormName (ENUM), Description (TEXT)	–	Форми здобуття освіти: Full-time, Part-time, Distance, Evening
15	education_year	YearID (INT)	AcademicYear (VARCHAR 9), StartDate (DATE), EndDate (DATE)	–	Навчальні роки з датами початку та завершення
16	education_semester	SemesterID (INT)	YearID, SemesterNumber (TINYINT), StartDate, EndDate	YearID → education_year	Семестри навчального року
17	educational_organization	EducationalOrganizationID (INT)	OrganizationID, EducationType (ENUM), AccreditationLevel (1–4), LicenseNumber, RectorName, Website	OrganizationID → organization	Розширені дані освітніх закладів: університети, коледжі, школи, академії
18	Faculty	FacultyID (INT)	FacultyName (VARCHAR 200), EducationalOrganizationID, DeanPersonID, EstablishedDate	EducationalOrganizationID → educational_organization, DeanPersonID → person	Факультети освітніх закладів
19	educational_department	DepartmentID (INT)	DepartmentName (VARCHAR 200), FacultyID, HeadPersonID	FacultyID → faculty, HeadPersonID → person	Кафедри із зазначенням завідувача
20	education_specialty	SpecialtyID (INT)	SpecialtyCode (VARCHAR 10), SpecialtyName (VARCHAR 200), EducationalOrganizationID, QualificationLevel (ENUM)	EducationalOrganizationID → educational_organization	Освітні спеціальності: Bachelor, Master, PhD
21	student_group	GroupID (INT)	GroupName (VARCHAR 20), SpecialtyID, FormID, YearID, CuratorPersonID	SpecialtyID → education_specialty, FormID → education_form, YearID → education_year	Академічні групи студентів
22	Student	StudentID (INT)	PersonID, StudentNumber (VARCHAR 20), GroupID, EnrollmentDate, ExpectedGraduationDate, CurrentStatus (ENUM), blockchain_student_id (VARCHAR 64)	PersonID → person, GroupID → student_group	Реєстр студентів-здобувачів освіти
23	education_discipline	DisciplineID (INT)	DisciplineName (VARCHAR 200), DisciplineCode (VARCHAR 20), DepartmentID, CreditsECTS (DECIMAL 3,1)	DepartmentID → educational_department	Каталог навчальних дисциплін із кредитами ECTS
24	education_teacher	TeacherID (INT)	PersonID, DepartmentID, PositionTitle (VARCHAR 100), AcademicDegree (ENUM), AcademicTitle (ENUM), HireDate	PersonID → person, DepartmentID → educational_department	Педагогічний персонал: None, PhD, Doctor of Sciences
25	education_teaching_load	LoadID (INT)	TeacherID, DisciplineID, GroupID, SemesterID, LectureHours, PracticeHours, LabHours	TeacherID → education_teacher, DisciplineID → education_discipline, GroupID → student_group, SemesterID → education_semester	Розподіл навантаження між викладачами, дисциплінами та групами
26	education_document	DocumentID (INT)	StudentID, DocumentType (ENUM), DocumentSeries, DocumentNumber, IssueDate, blockchain_document_hash (VARCHAR 64), ipfs_cid (VARCHAR 100)	StudentID → student, SpecialtyID → education_specialty	Дипломи та сертифікати з blockchain верифікацією та IPFS

Продовження таблиці 5

№	Таблиця	Первинний ключ	Основні атрибути	FOREIGN KEY	Призначення
27	education_contract	ContractID (INT)	StudentID, ContractNumber (VARCHAR 30), SignDate, StartDate, EndDate, TuitionFee (DECIMAL 10,2), ContractType (ENUM)	StudentID → student	Договори на здобуття освіти
28	education_payments	PaymentID (INT)	ContractID, PaymentDate, Amount (DECIMAL 10,2), PaymentMethod (ENUM), TransactionHash (VARCHAR 66)	ContractID → education_contract	Оплати за навчання з хешем транзакції
29	education_grades	GradeID (INT)	StudentID, DisciplineID, SemesterID, Grade (INT 0-100), ECTSGrade (ENUM A-F), ExamDate, TeacherID, grade_blockchain_hash (VARCHAR 64)	StudentID → student, DisciplineID → education_discipline, TeacherID → education_teacher	Академічна успішність із blockchain захистом від фальсифікації
30	education_license	LicenseID (INT)	EducationalOrganizationID, LicenseNumber (VARCHAR 50), IssueDate, ExpiryDate, IssuedByOrganizationID, Status (ENUM), blockchain_license_hash (VARCHAR 64)	EducationalOrganizationID → educational_organization, IssuedByOrganizationID → organization	Ліцензії на освітню діяльність: Active, Suspended, Revoked, Expired
31	international_visa_information	VisaID (INT)	StudentID, VisaNumber (VARCHAR 50), VisaType, IssueDate, ExpiryDate, IssuingCountryID	StudentID → student, IssuingCountryID → country	Візові дані іноземних студентів
32	international_insurance	InsuranceID (INT)	StudentID, PolicyNumber (VARCHAR 50), InsuranceCompany, StartDate, EndDate, CoverageAmount (DECIMAL 12,2)	StudentID → student	Страхові поліси іноземних студентів
33	international_student_accommodation	AccommodationID (INT)	StudentID, AccommodationType (ENUM), Address (TEXT), StartDate, EndDate, MonthlyRent (DECIMAL 10,2)	StudentID → student	Проживання іноземних студентів
34	international_language_training	TrainingID (INT)	StudentID, LanguageID, CourseLevel (VARCHAR 10), StartDate, EndDate, CompletionStatus (ENUM)	StudentID → student, LanguageID → language	Мовна підготовка іноземних студентів

Таблиця 6

Бізнес організації (розроблено авторами)

№	Таблиця	Первинний ключ	Основні атрибути	FOREIGN KEY	Призначення
35	organization_category	CategoryID (INT)	CategoryName (VARCHAR 50), ParentCategoryID	ParentCategoryID → organization_category	Ієрархічна класифікація організацій із рекурсивним зв'язком
36	Organization	OrganizationID (INT)	OrganizationName (VARCHAR 200), node_type (ENUM), CategoryID, EDRPOU (VARCHAR 10), blockchain_node_address (VARCHAR 42), shard_id (INT), region (ENUM), is_active (BOOLEAN)	CategoryID → organization_category	Центральний реєстр усіх організацій із типізацією Quadruple Helix
37	department	DepartmentID (INT)	DepartmentName (VARCHAR 100), OrganizationID, ParentDepartmentID, HeadPersonID	OrganizationID → organization, ParentDepartmentID → department	Структурні підрозділи з ієрархічним рекурсивним зв'язком
38	job_position	PositionID (INT)	PositionName (VARCHAR 100), DepartmentID, SeniorityLevel (ENUM), RequiredSkills (TEXT JSON)	DepartmentID → department	Посади: Junior, Middle, Senior, Lead, Manager, Director
39	Branch	BranchID (INT)	BranchName (VARCHAR 100), BranchAddress, OrganizationID, CityID, HeadPersonID	OrganizationID → organization, CityID → city	Географічні філії бізнес організації
40	organization_location	LocationID (INT)	OrganizationID, CityID, Address (TEXT), IsHeadquarters (BOOLEAN)	OrganizationID → organization, CityID → city	Географічна прив'язка організацій до міст
41	salary_rate	SalaryRateID (INT)	PositionID, MinSalary (DECIMAL 10,2), MaxSalary (DECIMAL 10,2), Currency (ENUM), EffectiveDate	PositionID → job_position	Ставки зарплат у валютах UAH, USD, EUR
42	job_vacancy	VacancyID (INT)	OrganizationID, PositionID, VacancyTitle (VARCHAR 200), RequiredSkillsJSON (TEXT), SalaryMin, SalaryMax, PostedDate, ClosingDate, Status (ENUM)	OrganizationID → organization, PositionID → job_position	Відкриті вакансії зі статусами Open, Closed, Filled
43	skill_endorsement	EndorsementID (INT)	PersonSkillID, EndorserOrganizationID, EndorserPersonID, EndorsementDate, blockchain_endorsement_hash (VARCHAR 64), VerificationStatus (ENUM)	PersonSkillID → person_skill, EndorserOrganizationID → organization	Верифікація навичок зовнішніми організаціями: Pending, Verified, Rejected

Таблиця 7

Регуляторний орган (розроблено авторами)

№	Таблиця	Первинний ключ	Основні атрибути	FOREIGN KEY	Призначення
44	regulatory_document	DocumentID (INT)	RegulatorOrganizationID, DocumentType (ENUM), DocumentNumber, DocumentTitle, IssueDate, EffectiveDate, blockchain_document_hash (VARCHAR 64), ipfs_cid (VARCHAR 100)	RegulatorOrganizationID → organization	Нормативно-правові акти: Law, Regulation, License, Accreditation, Standard
45	accreditation	AccreditationID (INT)	EducationalOrganizationID, SpecialityID, AccreditationLevel, CertificateNumber (VARCHAR 50), IssueDate, ExpiryDate, blockchain_accreditation_hash (VARCHAR 64)	EducationalOrganizationID → educational_organization, SpecialityID → education_speciality	Акредитації освітніх програм із blockchain верифікацією
46	audit_inspection	InspectionID (INT)	InspectedOrganizationID, InspectorOrganizationID, InspectionType (ENUM), InspectionDate, Findings (TEXT), ComplianceStatus (ENUM), blockchain_audit_hash (VARCHAR 64)	InspectedOrganizationID → organization, InspectorOrganizationID → organization	Аудити: Planned, Unscheduled, Follow-up; статуси Compliant – Non-compliant
47	Complaint	ComplaintID (INT)	ComplainantPersonID, TargetOrganizationID, ReceivedByOrganizationID, ComplaintDate, ComplaintType (ENUM), Description (TEXT), Status (ENUM), ResolutionDate	ComplainantPersonID → person, TargetOrganizationID → organization	Скарги та звернення: Quality, Discrimination, Financial, Safety, Other

Таблиця 8

Блокчейн (розроблено авторами)

№	Таблиця	Первинний ключ	Основні атрибути	FOREIGN KEY	Призначення
48	Product	ProductID (INT)	ProductName (VARCHAR 200), OrganizationID, ProductType (ENUM), TechnologyStack (TEXT JSON), TeamSize, Budget (DECIMAL 15,2), Status (ENUM)	OrganizationID → organization	Продукти та проекти: Software, Hardware, Service, Research, Educational
49	product_participant	ParticipantID (INT)	ProductID, PersonID, Role (VARCHAR 100), StartDate, EndDate, ContributionDescription (TEXT), tokens_earned (INT)	ProductID → product, PersonID → person	Участь осіб у продуктах і проєктах із нарахуванням токенів
50	blockchain_token	TokenID (INT)	PersonID, TokenBalance (INT), TokensEarned (INT), TokensSpent (INT), LastTransactionDate (TIMESTAMP), wallet_address (VARCHAR 42)	PersonID → person	Баланс ERC-20 токенів користувача (\$0,01 за токен)
51	token_transaction	TransactionID (INT)	FromPersonID, ToPersonID, Amount (INT), TransactionType (ENUM), RelatedEntityType (ENUM), TransactionDate (TIMESTAMP), blockchain_tx_hash (VARCHAR 66)	FromPersonID → person, ToPersonID → person	Повна хронологія токенних транзакцій: Reward, Payment, Transfer, Fee, Burn
52	nft_certificate	NFTID (INT)	PersonID, CertificateType (ENUM), TokenID (VARCHAR 100), ContractAddress (VARCHAR 64), ipfs_metadata_cid (VARCHAR 100), ipfs_image_cid (VARCHAR 100), MintDate (TIMESTAMP), blockchain_mint_hash (VARCHAR 66)	PersonID → person	ERC-721 NFT сертифікати: Diploma, Skill, Achievement, License, Accreditation

(student) із blockchain-ідентифікатором кожного здобувача. Дисципліни (education_discipline) зберігаються з кількістю кредитів ECTS, викладачі (education_teacher) – з науковими ступеннями та вченими званнями, а навчальне навантаження (education_teaching_load) розподіляє дисципліни між викладачами, групами та семестрами.

Документаційний блок включає дипломи та сертифікати (education_document) з blockchain-хешем і IPFS-посиланням, договори на навчання (education_contract), оплати (education_payments) з хешем фінансової транзакції та академічну успішність (education_grades) зі стобальною шкалою, оцінками ECTS від A до F та blockchain-захистом від фальсифікації. Окремий міжнародний блок охоплює візову інформацію (international_visa_information), страхові поліси (international_insurance), дані про проживання (international_student_accommodation) та мовну підготовку іноземних студентів (international_language_training). Видача ліцензій на освітню діяльність фіксується в таблиці education_license зі статусами Active, Suspended, Revoked, Expired та blockchain-хешем кожного документа.

Ієрархічна класифікація організацій визначається таблицею organization_category з рекурсивним зв'язком для побудови довільно глибокого дерева типів. Центральний реєстр organization є базовою сутністю для всіх чотирьох типів вузлів Quadruple Helix – EDUCATION, BUSINESS, REGULATOR, USER – та зберігає код ЄДРПОУ, blockchain-адресу вузла, ідентифікатор шарду від 0 до 119 та географічний регіон для горизонтального масштабування системи.

Внутрішня структура бізнес організацій описується через department з ієрархічним зв'язком ParentDepartmentID для відображення вкладеності підрозділів. Таблиця job_position визначає посади з рівнями від Junior до Director та JSON-переліком необхідних навичок. Географічна присутність організацій фіксується через branch для філій та organization_location для точної прив'язки до міста з позначкою головного офісу. Фінансові умови праці зберігаються в salary_rate із діапазоном мінімальної та максимальної зарплати у трьох валютах – UAH, USD, EUR.

Відкриті вакансії описуються в таблиці job_vacancy з JSON-переліком необхідних навичок, діапазоном заробітної плати та статусами Open, Closed, Filled. Верифікація компетентностей працівників реалізована через skill_endorsement, де зовнішні організації

підтверджують навички конкретної особи з проставленням статусу Pending, Verified або Rejected та збереженням blockchain-хешу підтвердження.

Нормативно-правова база системи формується таблицею regulatory_document, яка охоплює документи типів Law, Regulation, License, Accreditation та Standard із датами набрання чинності, blockchain-хешем та IPFS-посиланням на повний текст. Акредитації освітніх програм фіксуються в таблиці accreditation на рівні конкретної спеціальності конкретного закладу з номером сертифіката та blockchain-хешем для підтвердження автентичності.

Контрольна функція регуляторного органу реалізована через дві таблиці. Таблиця audit_inspection зберігає результати перевірок трьох типів – Planned, Unscheduled, Follow-up – із висновками та статусом відповідності від Compliant до Non-compliant. Таблиця complaint фіксує скарги та звернення від фізичних осіб із класифікацією за типом – Quality, Discrimination, Financial, Safety, Other – та повним циклом розгляду від дати подання до дати вирішення.

Продуктовий блок системи описується таблицею product, що реєструє проекти та продукти організацій із класифікацією за типом – Software, Hardware, Service, Research, Educational – та зберіганням технологічного стеку у форматі JSON. Участь конкретних осіб у продуктах фіксується через таблицю product_participant із зазначенням ролі, часових рамок та кількості нарахованих токенів за внесок.

Токеномічний блок складається з трьох взаємопов'язаних таблиць. Таблиця blockchain_token зберігає поточний баланс ERC-20 токенів кожного користувача за курсом \$0,01 за токен разом із загальною сумою зароблених та витрачених токенів і адресою Ethereum-гаманця. Повна хронологія всіх токенних операцій фіксується в таблиці token_transaction із класифікацією за типами Reward, Payment, Transfer, Fee, Burn та blockchain-хешем кожної транзакції – саме ця таблиця прогнозовано займає 65,98 % від загального обсягу бази даних у 180,69 ГБ. Таблиця nft_certificate реалізує стандарт ERC-721 для видачі унікальних NFT-сертифікатів п'яти типів – Diploma, Skill, Achievement, License, Accreditation – із посиланнями на метадані та зображення в мережі IPFS через поля ipfs_metadata_cid та ipfs_image_cid.

Формалізацію освітньої гілки виконано апаратом теорії множин, яка визначає базові операції: об'єднання ($A \cup B$) – усі елементи, що належать хоча б одній множині; перетин

$(A \cap B)$ – лише спільні елементи; доповнення (A') – елементи універсальної множини U , що не входять до A ; декартовий добуток $(A \times B)$ – множина всіх упорядкованих пар (a, b) (Britannica, 2024).

Відношення між множинами класифікуються за властивостями рефлексивності, симетричності та транзитивності. Відношення, що має всі три властивості, називається відношенням еквівалентності та утворює клас еквівалентності (Britannica, 2024). Для доведення логічної бездоганності бізнес-правил використовується математичний апарат теорії множин. Розглянувши групи об'єктів як множини, можна за допомогою операцій об'єднання, перетину та різниці формально довести, що правила системи є істинними та несуперечними. Множина спеціальностей для одного студента не може містити більше одного елемента. Науковий ступінь викладача є елементом наперед визначеної множини ступенів.

Вибір теорії множин простіший, ніж логіка предикатів, коли йдеться про відносини між групами. На відміну від скінченних автоматів, які описують процеси, теорія множин найкраще підходить для аналізу статичних правил, що стосуються груп об'єктів, таких як студенти, курси чи спеціальності.

Наступний рівень формалізації – це реляційна алгебра. Реляційна алгебра (TutorialsPoint, 2024): Реляційна алгебра – процедурна мова запитів, що приймає відношення як вхід і повертає відношення як вихід. Базові операції: вибірка (σ), проекція (Π), об'єднання ($\cup$), різниця множин ($-$), декартовий добуток ($\times$), перейменування (ρ). Це – строга мова для опису даних та правил. Вона дозволяє математично визначити кожну з 13 освітніх сутностей та встановити для них обмеження за допомогою кванторів існування та загальності. Наприклад, для кожного факультету повинен існувати унікальний ідентифікатор, а в одному університеті кожен факультет повинен мати унікальну назву.

Формалізація виявляє чіткий ієрархічний зв'язок залежностей між освітніми сутностями: від установи – до факультетів, кафедр, спеціальностей, окремих дисциплін і до рівня навчального навантаження конкретного викладача.

Реляційна алгебра має практичне застосування у підборі кандидатів. Спочатку за допомогою декартового добутку система створює множину всіх можливих пар «студент–вакансія». Потім операція вибірки залишає у цій множині лише ті пари, де навички студента відповідають вимогам вакансії. Для перевірки моделі

на наявність логічних колізій застосовується метод доведення від супротивного. Наприклад, припущення про існування двох факультетів з однаковою назвою в одному закладі призводить до прямої суперечності з обмеженням унікальності, що доводить неможливість такої аномалії.

Глибока математична формалізація перетворює систему з набору функцій на логічно цілісну, внутрішньо несуперечливу і математично доведену коректну структуру. Це є запорукою її надійності.

Апарат теорії множин у системі спирається на три фундаментальні групи інструментів. Перша – базові операції: об'єднання ($\cup$), перетин ($\cap$), різниця ($\setminus$) та декартів добуток ($\times$), що дозволяють конструювати складні множини з простих. Друга – квантори: квантор загальності ($\forall$) для формулювання обмежень, що охоплюють усі елементи множини, та квантор існування ($\exists$) для підтвердження наявності хоча б одного елемента із заданою властивістю. Третя – поняття відображення та функції, через які описуються однозначні зв'язки між сутностями: наприклад, кожна особа відображається рівно в один запис `blockchain_token`.

Несуперечність моделі доводиться методом від супротивного. Припустимо, існують два факультети f_1 та f_2 з однаковою назвою в межах одного університету: $f_1.orgId = f_2.orgId \wedge f_1.name = f_2.name$. Обмеження унікальності стверджує, що рівність цих атрибутів тягне за собою $f_1 = f_2$. Отримана суперечність $f_1 \neq f_2 \wedge f_1 = f_2$ доводить неможливість такої аномалії в коректно побудованій моделі.

Практичний акцент формалізації зосереджено на накопиченому досвіді особи. Будь-яка підтверджена навичка – незалежно від того, здобута вона в академічному середовищі, на виробництві чи через самостійний проєкт – фіксується в таблиці `person_skill` із записом `blockchain_certificate_hash` у розподілений реєстр. Це забезпечує незмінюваність та верифікованість кожного компетентнісного запису. Сукупність таких записів формує основу для обчислення потенціалу особи (рейтингу) – агрегованого показника, що відображає глибину та `breadth` підтверджених компетентностей:

$$P(person) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot pl_i \cdot v_i, \quad (1)$$

де $P(person)$ – потенціал (рейтинг) особи;

n – загальна кількість верифікованих навичок особи;

w_i – ваговий коефіцієнт навички i , що відображає її затребуваність на ринку праці;

p_i – числовий еквівалент рівня володіння навичкою i (Beginner = 1, Intermediate = 2, Advanced = 3, Expert = 4, Master = 5);

v_i – бінарний коефіцієнт верифікації: 1, якщо blockchain_certificate_hash присутній та підтверджений, 0 – якщо ні;

Σ – операція сумування по всіх навичках особи.

Наприклад, особа має три верифіковані навички: Python ($w = 0,9$; $p_i = 4$; $v = 1$), управління проектами ($w = 0,7$; $p_i = 3$; $v = 1$) та Docker ($w = 0,6$; $p_i = 2$; $v = 1$). За формулою (1):

$$P = 0,9 \cdot 4 \cdot 1 + 0,7 \cdot 3 \cdot 1 + 0,6 \cdot 2 \cdot 1 = 3,6 + 2,1 + 1,2 = 6,9.$$

Неверифікована навичка з $v = 0$ не впливає на рейтинг незалежно від заявленого рівня, що унеможливорює маніпуляцію показником. Значення 6,9 є безрозмірним показником – умовними балами рейтингу. Теоретичний максимум для однієї навички становить $w \cdot p_i \cdot v = 1,0 \cdot 5 \cdot 1 = 5,0$ балів (навичка з максимальною ринковою вагою, рівнем Master та blockchain-підтвердженням). Відповідно загальний потенціал особи з n верифікованих навичок не перевищує $5n$ балів, що дозволяє нормувати показник для порівняння осіб із різною кількістю навичок:

$$P_{\text{norm}}(\text{person}) = \frac{P(\text{person})}{5 \cdot n} \cdot 100\%, \quad (2)$$

Для наведеного прикладу: $P_{\text{norm}} = 6,9 / (5 \cdot 3) \cdot 100\% = 46\%$. Даний показник означає, що особа реалізувала менше половини свого теоретичного максимуму за наявними навичками. Практична інтерпретація залежить від контексту порівняння.

По-перше, порівняння з вимогами вакансії. Роботодавець формує мінімальний поріг P_{norm} для конкретної посади, наприклад 60 % для Junior-розробника. Якщо P_{norm} особи нижче порогу – кандидат автоматично виключається з вибірки, якщо вище – потрапляє до короткого списку. Це усуває суб'єктивність первинного відбору.

По-друге, динаміка розвитку. Один і той самий показник 46 % має різний сенс для особи з 3 навичками та для особи з 20 навичками. Тому практичнішим є відстеження приросту P_{norm} у часі – наскільки відсотків зріс рейтинг за квартал чи рік.

По-третє, галузевий бенчмарк. Медіанне значення P_{norm} по всіх особах у системі з аналогічним набором навичок формує галузевий орієнтир. Відхилення від нього вказує на конкурентну позицію кандидата на ринку праці.

Таким чином, абсолютне значення 46% саме по собі малоінформативне – воно набуває змісту лише у порівнянні: з вимогами посади, з динамікою власного розвитку або з медіаною галузі.

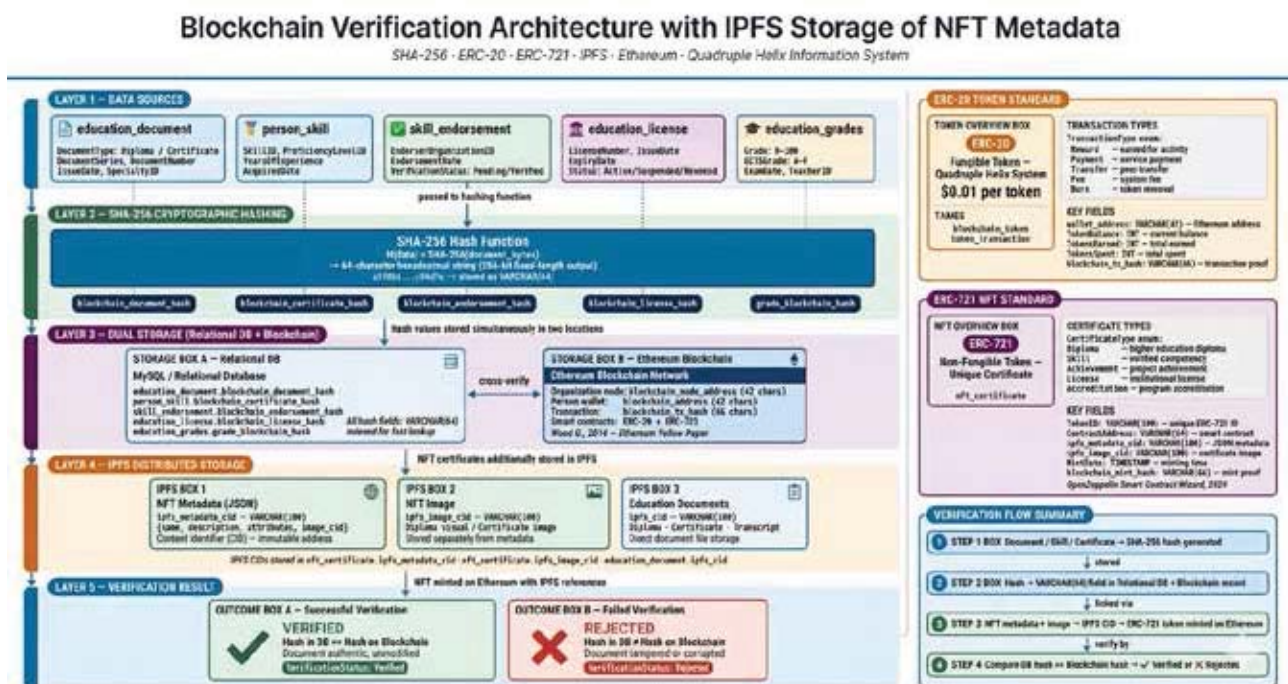


Рис. 2. Схема blockchain-верифікації з IPFS-зберіганням метаданих NFT

Джерело: розроблено автором

Таблиця 9

Механізми blockchain-верифікації (розроблено авторами)

Блок верифікації	Таблиці бази даних	Поле хешу / адреси	Стандарт
Документи про освіту	education_document	blockchain_document_hash	SHA-256
Навички осіб	person_skill	blockchain_certificate_hash	SHA-256
Підтвердження навичок	skill_endorsement	blockchain_endorsement_hash	SHA-256
Ліцензії / акредитації	education_license, accreditation	blockchain_license_hash	SHA-256
Токени ERC-20	blockchain_token	wallet_address	ERC-20
Токенні транзакції	token_transaction	blockchain_tx_hash	ERC-20
NFT-сертифікати	nft_certificate	blockchain_mint_hash	ERC-721

Ключовим об'єктом верифікації в освітній гільці є зв'язок студента з групою та спеціальністю: кожна особа має належати рівно до однієї навчальної групи та навчатися на одній спеціальності. Формально предикат однозначності зв'язку студент–група–спеціальність записується так:

$$\forall st1, st2 \in Student : st1.persId = st2.persId \Rightarrow (st1.groupId = st2.groupId \wedge st1.specId = st2.specId), \quad (3)$$

де *Student* – множина всіх студентів-здобувачів освіти у системі;

persId – ідентифікатор особи у таблиці *person*;

groupId – ідентифікатор навчальної групи;

specId – ідентифікатор освітньої спеціальності;

$\Rightarrow$ – імплікація (логічне слідування);

$\wedge$ – кон'юнкція.

Blockchain-верифікація охоплює всі критичні типи даних системи. Зміст верифікаційного шару наведено в таблиці 9.

Кожен документ про освіту, підтвердження навички та акредитаційний акт отримує SHA-256 хеш, що зберігається одночасно у реляційній базі та в blockchain-мережі (Narayanan et al., 2016). Ethereum-адреси (Wood, 2014)

прив'язані до кожної організації та особи. NFT-сертифікати стандарту ERC-721 (OpenZeppelin, 2024) містять метадані та зображення, розміщені в мережі IPFS, що забезпечує їхню незалежність від централізованого сховища.

Зв'язуючі таблиці *country_city*, *person_skill* та *product_participant* реалізують відносини типу багато-до-багатьох. Внутрішня архітектура таблиці *person_organization_experience_position* фіксує повну професійну траєкторію особи через комбінацію ідентифікаторів особи, організації, досвіду та посади разом із JSON-полями обов'язків та досягнень. Загальна кількість прогнозованих записів системи становить 768 550 000 при обсязі 180,69 ГБ, що відповідає масштабу enterprise-рівня.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Розроблена реляційна база даних на 52 таблиці за архітектурою Quadruple Helix забезпечує комплексне зберігання та blockchain-верифікацію даних освітньо-бізнесового середовища при прогнозованому обсязі 180,69 ГБ. Формалізація обмежень цілісності засобами теорії множин підвищує коректність архітектурних рішень і створює підґрунтя для автоматизованого тестування. Перспективами подальших досліджень є проектування графової нейромережі, яка оцінює потенціал шукачів роботи.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Etzkowitz H. The dynamics of innovation: from National Systems and "Mode 2" to a Triple Helix of university–industry–government relations / H. Etzkowitz, L. Leydesdorff. *Research Policy*. 2000. Vol. 29, No. 2. P. 109–123. DOI: 10.1016/S0048-7333(99)00055-4.
2. Carayannis E. G. 'Mode 3' and 'Quadruple Helix': toward a 21st century fractal innovation ecosystem / E. G. Carayannis, D. F. J. Campbell. *International Journal of Technology Management*. 2009. Vol. 46, No. 3/4. P. 201–234. DOI: 10.1504/IJTM.2009.023374.
3. Cai Y. Triple Helix or Quadruple Helix: Which Model of Innovation to Choose for Empirical Studies? / Y. Cai, A. Lattu // *Minerva*. 2022. Vol. 60. P. 257–280. DOI: 10.1007/s11024-021-09453-6.
4. Simões P. C. The 'Endless Perspective' to University – Industry – Government Relations / P. C. Simões, A. C. Moreira, C. M. Dias. *Triple Helix*. 2022. Vol. 9. P. 247–274. DOI: 10.1163/21971927-bja10034.
5. Exploring blockchain technology and its potential applications for education / G. Chen, B. Xu, M. Lu [et al.]. *Smart Learning Environments*. 2018. Vol. 5, No. 1. P. 1–10. DOI: 10.1186/s40561-017-0050-x.

6. Grech A. Education and blockchain / A. Grech, F. Miao, V. Balaji. – UNESCO / Commonwealth of Learning, 2022. DOI: 10.56059/11599/4131.
7. A systematic literature review on blockchain-based systems for academic certificate verification / A. Rustemi, F. Dalipi, V. Atanasovski [et al.]. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 64679–64696. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3289598.
8. Berrios Moya J. A. A Zero-Knowledge Proof-Enabled Blockchain-Based Academic Record Verification System / J. A. Berrios Moya, J. Ayoade, M. A. Uddin. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 11. P. 3450. DOI: 10.3390/s25113450.
9. Wu C.-H. Educational Applications of Non-Fungible Token (NFT) / C.-H. Wu, C.-Y. Liu. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 1. P. 7. DOI: 10.3390/su15010007.
10. Khrypko S. L. Using the LTO Network Level 1 Blockchain to Automate Inter-Organizational Business Processes / S. L. Khrypko, S. S. Shcherbakov. *The Problems of Economy*. 2024. DOI: 10.32983/2222-0712-2024-2-205-212.
11. Towards a comprehensive understanding of blockchain technology adoption in various industries in developing and emerging economies: A systematic review / Z. A. Al-Sulami, N. Ali, R. Ramli [et al.]. *Cogent Business & Management*. 2024. Vol. 11, No. 1. P. 2294875. DOI: 10.1080/23311975.2023.2294875.
12. Bitcoin and Cryptocurrency Technologies / A. Narayanan, J. Bonneau, E. Felten [et al.]. Princeton : Princeton University Press, 2016. URL: <https://press.princeton.edu/books/hardcover/9780691171692/bitcoin-and-cryptocurrency-technologies>
13. Wood G. Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger / G. Wood. Ethereum Project Yellow Paper, 2014. URL: <https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf>
14. Smart Contract Wizard / OpenZeppelin. 2024. URL: <https://wizard.openzeppelin.com/>
15. Основні освітні статистичні дані (2023/2024 н.р.) / Інститут освітньої аналітики. 2024. URL: <https://iea.gov.ua/diyalnist/naukovo-analitichna-diyalnist/osnovni-czyfry-osvity/>
16. Ukraine: Population drops by 10 million since Russia invaded in 2014, UNFPA reports / UN News. 2024. URL: <https://news.un.org/en/story/2024/10/1155976>
17. Normalization in DBMS – 1NF, 2NF, 3NF, BCNF, 4NF and 5NF / Studytonight. 2024. URL: <https://www.studytonight.com/dbms/database-normalization.php>
18. Understanding Relational Algebra in DBMS / TutorialsPoint. 2024. URL: https://www.tutorialspoint.com/dbms/relational_algebra.htm
19. Set theory – Operations, Elements, Relations. Encyclopedia Britannica. 2024. URL: <https://www.britannica.com/science/set-theory/Operations-on-sets>
20. Navigating the Three Levels of Database Design: Conceptual, Logical, and Physical / Visual Paradigm. 2024. URL: <https://guides.visual-paradigm.com/navigating-the-three-levels-of-database-design-conceptual-logical-and-physical/>
21. Enterprise Data Modeling – Techniques and Best Practices / LeanIX // SAP LeanIX. 2024. URL: <https://www.leanix.net/en/wiki/it-architecture/enterprise-data-model>

REFERENCES:

1. Etzkowitz, H., & Leydesdorff, L. (2000). The dynamics of innovation: from National Systems and “Mode 2” to a Triple Helix of university–industry–government relations. *Research Policy*, 29(2), 109–123. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(99\)00055-4](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(99)00055-4)
2. Carayannis, E. G., & Campbell, D. F. J. (2009). ‘Mode 3’ and ‘Quadruple Helix’: toward a 21st century fractal innovation ecosystem. *International Journal of Technology Management*, 46(3/4), 201–234. <https://doi.org/10.1504/IJTM.2009.023374>
3. Cai, Y., & Lattu, A. (2022). Triple Helix or Quadruple Helix: Which Model of Innovation to Choose for Empirical Studies? *Minerva*, 60, 257–280. <https://doi.org/10.1007/s11024-021-09453-6>
4. Simões, P. C., Moreira, A. C., & Dias, C. M. (2022). The ‘Endless Perspective’ to University – Industry – Government Relations. *Triple Helix*, 9, 247–274. <https://doi.org/10.1163/21971927-bja10034>
5. Chen, G., Xu, B., Lu, M., et al. (2018). Exploring blockchain technology and its potential applications for education. *Smart Learning Environments*, 5(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s40561-017-0050-x>
6. Grech, A., Miao, F., & Balaji, V. (2022). *Education and blockchain*. UNESCO / Commonwealth of Learning. <https://doi.org/10.56059/11599/4131>
7. Rustemi, A., Dalipi, F., Atanasovski, V., et al. (2023). A systematic literature review on blockchain-based systems for academic certificate verification. *IEEE Access*, 11, 64679–64696. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3289598>

8. Berrios Moya, J. A., Ayoade, J., & Uddin, M. A. (2025). A Zero-Knowledge Proof-Enabled Blockchain-Based Academic Record Verification System. *Sensors*, 25(11), 3450. <https://doi.org/10.3390/s25113450>
9. Wu, C.-H., & Liu, C.-Y. (2023). Educational Applications of Non-Fungible Token (NFT). *Sustainability*, 15(1), 7. <https://doi.org/10.3390/su15010007>
10. Khrypko, S. L., & Shcherbakov, S. S. (2024). Using the LTO Network Level 1 Blockchain to Automate Inter-Organizational Business Processes. *The Problems of Economy*. <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2024-2-205-212>
11. Al-Sulami, Z. A., Ali, N., Ramli, R., et al. (2024). Towards a comprehensive understanding of blockchain technology adoption in various industries in developing and emerging economies: A systematic review. *Cogent Business & Management*, 11(1), 2294875. <https://doi.org/10.1080/23311975.2023.2294875>
12. Narayanan, A., Bonneau, J., Felten, E., et al. (2016). *Bitcoin and Cryptocurrency Technologies*. Princeton University Press. Retrieved from: <https://press.princeton.edu/books/hardcover/9780691171692/bitcoin-and-cryptocurrency-technologies>
13. Wood, G. (2014). *Ethereum: A secure decentralised generalised transaction ledger*. Ethereum Project Yellow Paper. Retrieved from: <https://ethereum.github.io/yellowpaper/paper.pdf>
14. OpenZeppelin. (2024). *Smart Contract Wizard*. Retrieved from: <https://wizard.openzeppelin.com/>
15. Instytut osvitnoi analityky. (2024). Osnovni osvichni statystychni dani (2023/2024 n.r.) [Basic educational statistical data (2023/2024 academic year)]. Retrieved from: <https://iea.gov.ua/diyalnist/naukovo-analitichna-diyalnist/osnovni-cyfyry-osvity/> [in Ukrainian].
16. UN News. (2024). *Ukraine: Population drops by 10 million since Russia invaded in 2014, UNFPA reports*. Retrieved from: <https://news.un.org/en/story/2024/10/1155976>
17. Studytonight. (2024). *Normalization in DBMS – 1NF, 2NF, 3NF, BCNF, 4NF and 5NF*. Retrieved from: <https://www.studytonight.com/dbms/database-normalization.php>
18. TutorialsPoint. (2024). *Understanding Relational Algebra in DBMS*. Retrieved from https://www.tutorialspoint.com/dbms/relational_algebra.htm
19. Encyclopedia Britannica. (2024). *Set theory – Operations, Elements, Relations*. Retrieved from: <https://www.britannica.com/science/set-theory/Operations-on-sets>
20. Visual Paradigm. (2024). *Navigating the Three Levels of Database Design: Conceptual, Logical, and Physical*. Retrieved from: <https://guides.visual-paradigm.com/navigating-the-three-levels-of-database-design-conceptual-logical-and-physical/>
21. LeanIX. (2024). *Enterprise Data Modeling – Techniques and Best Practices*. SAP LeanIX. Retrieved from: <https://www.leanix.net/en/wiki/it-architecture/enterprise-data-model>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

Дата першого надходження статті до видання: 16.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026