ГІБРИДНА МОДЕЛЬ БАЗ ДАНИХ ІЗ ВЕРИФІКАЦІЄЮ ТРАНЗАКЦІЙ ЧЕРЕЗ БЛОКЧЕЙН

Соколов О.К., Штангей С.В.

Кафедра інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
Україна

E-mail: oleksandr.sokolov1@nure.ua,
svitlana.shtanhei@nure.ua

Abstract

This paper presents a hybrid data management model that integrates a traditional relational database with a blockchain-based verification layer. The proposed approach preserves the high performance and transactional capabilities of SQL systems while providing immutable, cryptographically verifiable proofs of data modifications through blockchain. Only hashed or Merkle-aggregated evidence of changes is recorded in the distributed ledger, minimizing overhead and ensuring scalability. The hybrid architecture enables independent auditability, strengthens data integrity, and offers a practical balance between efficiency and trust, making it suitable for high-load information systems that require reliable verification of critical records.

Вступ

Збільшення обсягів даних та підвищення вимог до їх достовірності створюють значні виклики для сучасних інформаційних систем. Традиційні централізовані бази даних забезпечують високу продуктивність, оптимізацію запитів і повноцінну транзакційну модель, проте залишаються вразливими до несанкціонованих змін, внутрішніх маніпуляцій та відсутності механізму незалежної перевірки історії транзакцій. Аналіз сучасних архітектур систем зберігання даних демонструє, що централізація створює критичну залежність від довіри до оператора системи та ускладнює гарантування цілісності в умовах багатосторонньої взаємодії [1].

Децентралізовані технології блокчейну, навпаки, забезпечують незмінність, прозору фіксацію подій та криптографічні докази виконаних операцій. Проте блокчейн-системи мають істотні обмеження щодо пропускної здатності, масштабованості та вартості обчислень, особливо у публічних мережах, де механізми консенсусу потребують значних ресурсів і збільшують затримки транзакцій. Сучасні структури оптимізованої перевірки, включаючи гетерогенні Merkle-дерева, прискорюють підтвердження даних, але не усувають фундаментальних обмежень децентралізованих реєстрів при роботі з великими наборами транзакцій [2].

Таким чином, виникає суперечність між двома підходами: централізовані БД забезпечують високу ефективність, але не гарантують прозорості та стійкості до фальсифікацій, тоді як блокчейн гарантує незмінність, але значно поступається у продуктивності. Аналіз сучасних гібридних систем інтеграції блокчейну та баз даних підтверджує перспективність моделі, у якій дані зберігаються у традиційній СУБД, тоді як блокчейн використовується як незалежний механізм підтвердження транзакцій за допомогою хешів або кореневих значень Merkle-дерев.

У цьому контексті актуальною стає розробка гібридної моделі, що поєднує швидкодію реляційної СУБД із децентралізованим підтвердженням змін, мінімізує обсяг інформації, переданої на блокчейн, та забезпечує криптографічно захищений аудит транзакцій у системах, де достовірність даних є критично важливою.

Аналіз існуючих підходів до зберігання даних

Сучасні системи зберігання даних умовно поділяються на два домінуючих підходи, централізовані реляційні бази даних та децентралізовані реєстри блокчейн. Кожен із цих підходів вирішує різні класи задач та характеризується специфічними обмеженнями, що визначають їх застосовність у високонавантажених інформаційних системах.

Централізовані реляційні бази даних орієнтовані на забезпечення максимальної продуктивності, оптимізованого доступу до даних та транзакційної узгодженості. Завдяки ACID-властивостям, розвинутим механізмам індексації та зрілій інфраструктурі оптимізації, такі системи здатні стабільно обробляти значні обсяги транзакцій у режимі реального часу. Проте централізованість архітектури призводить до залежності від одного оператора та відсутності незалежного механізму аудиту. Маніпуляції з даними, зміни журналу транзакцій або відкат операцій можуть залишатися непоміченими зовнішніми учасниками, що створює ризики для багатосторонніх систем взаємодії [1].

Децентралізовані системи блокчейн, навпаки, фокусуються на забезпеченні прозорості та незмінності даних за рахунок криптографічних механізмів фіксації подій та консенсусних алгоритмів. Кожна транзакція підтверджується розподіленою мережею вузлів, що унеможливлює несанкціоноване редагування. Проте ці властивості досягаються ціною зниження пропускної здатності та збільшення затримок. У публічних мережах продуктивність обмежується складністю консенсусу, а вартість обробки транзакцій зростає разом із навантаженням на мережу. Навіть удосконалені структури перевірки, включаючи гетерогенну Merkle-дерево-побудову та скорочення обсягу підтверджуваних даних, лише частково зменшують затримки, не досягаючи рівня продуктивності SQL-систем [3].

Порівняння існуючих рішень показує, що жоден із підходів у чистому вигляді не здатен задовольнити комплексні вимоги критичних інформаційних платформ. У реляційних БД обмежена можливість доведення незмінності, тоді як блокчейн втрачає ефективність у сценаріях з високою частотою транзакцій. Аналіз архітектур, запропонованих у сучасних системах інтеграції, підтверджує, що об’єднання цих технологій у гібридну модель дозволяє поєднати сильні сторони обох підходів. Існуючі приклади побудови таких систем демонструють використання блокчейну як окремого шару підтвердження транзакцій, у той час як основна логіка зберігання залишається в традиційній СУБД [4, 5].

Таким чином, централізовані та децентралізовані системи вирішують різні задачі й мають доповнюючі властивості. Це формує підґрунтя для створення гібридної моделі, у якій ефективне зберігання поєднується з незалежним підтвердженням достовірності транзакцій.

Архітектура гібридної бази даних

Архітектура гібридної бази даних поєднує традиційну СУБД як основний механізм зберігання та обробки даних із блокчейном, який виконує функцію незалежного верифікаційного шару. Такий підхід дозволяє зберегти переваги високої продуктивності реляційних систем і водночас забезпечити незмінність та прозору фіксацію критично важливих транзакцій.

Базовою структурною ідеєю є розділення функцій (рис. 1), де СУБД відповідає за повний життєвий цикл даних, а саме створення, оновлення, видалення, індексацію, оптимізацію запитів, а блокчейн зберігає лише криптографічні докази виконаних операцій у вигляді хешів, Merkle-коренів або агрегованих підтверджень. Це знижує навантаження на децентралізований реєстр та усуває необхідність дублювання великих обсягів даних, характерну для повністю блокчейн-орієнтованих систем [4].

Центральним компонентом такої архітектури є validation layer – проміжний шар, який перехоплює транзакції СУБД, формує хеші змін та передає їх у блокчейн. Цей шар може працювати як окремий сервіс або як вбудований компонент у логіку застосунку. Його функції включають:

- обчислення криптографічних хешів;
- агрегування транзакцій у Merkle-структури;
- формування повідомлень для блокчейну;
- ведення локального журналу відповідності між транзакціями БД та записами в реєстрі.

Такий підхід дозволяє створити надійний механізм підтвердження, який не впливає на модель даних і не потребує зміни основної архітектури СУБД.

Гібридні блокчейн-структури, що поєднують приватні та публічні ланцюги, дають змогу балансувати між продуктивністю та рівнем довіри. Розподіл операцій між приватним сегментом (з низькою затримкою та високою пропускною здатністю) і публічним реєстром (з підвищеним рівнем захисту та стійкістю до фальсифікацій) дозволяє адаптувати систему до вимог конкретних сценаріїв. Подібні моделі, що використовують багаторівневий консенсус і комбінують різні типи

валідаторів, описані як ефективні для систем з нерівномірним навантаженням і високими вимогами до безпеки [3].

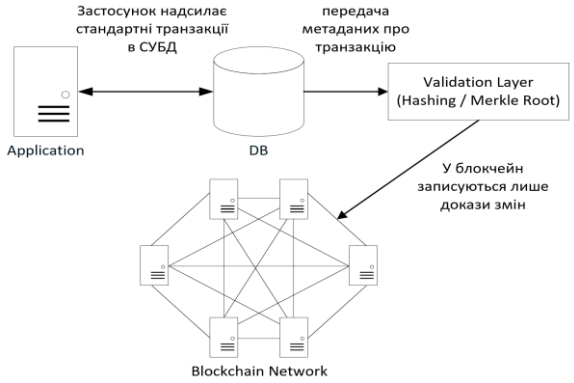

Рис. 1. Схема архітектури гібридної бази даних

Важливим елементом архітектури є використання структурованих дерев перевірки, таких як гетерогенні Merkle-дерева, які дозволяють об'єднувати великі набори транзакцій у компактні представлення та значно зменшують кількість операцій підтвердження в блокчейні. Така модель знижує обсяг переданих даних і скорочує затримки, забезпечуючи ефективність навіть у сценаріях з високою частотою оновлень записів.

У сучасних реалізаціях гібридних систем спостерігається використання різних комбінацій протоколів консенсусу, наприклад, поєднання високопродуктивних механізмів, таких як Kafka, із блокчейнами на основі BFT-алгоритмів (Tendermint або PBFT). Це дозволяє розділити відповідальність: швидка локальна узгодженість забезпечується традиційними інструментами, тоді як глобальна незмінність гарантується блокчейн-підтвердженням. Подібні архітектурні рішення продемонстровано в системах BlockchainDB та BigchainDB, де блокчейн використовується як додатковий рівень перевірки транзакцій, а не як основний механізм зберігання даних [5].

Так, гібридна архітектура бази даних поєднує продуктивність централізованих систем із довірою децентралізованих реєстрів. Вона мінімізує обсяг даних, що потрапляють у блокчейн, забезпечує гнучкий рівень верифікації та здатність адаптуватися до різних навантажень, що робить її придатною для фінансових, промислових і державних інформаційних систем.

Механізм верифікації транзакцій

Механізм верифікації транзакцій у гібридній базі даних ґрунтується на формуванні криптографічних доказів змін, які передаються у блокчейн у компактному вигляді.

Після виконання транзакції у СУБД формується набір атрибутів, який описує зміну: ідентифікатор запису, попередній і новий стан, часову мітку та інформацію про джерело операції. Validation Layer отримує ці дані та обчислює криптографічний хеш. Використання стійких хеш-функцій забезпечує неможливість відновлення вихідних даних і водночас дає змогу однозначно підтвердити їх незмінність при подальшій перевірці [4].

Для підвищення ефективності та зменшення навантаження на блокчейн хеші окремих транзакцій можуть об'єднуватися у Merkle-дерево. Агрегування транзакцій у кореневе значення зменшує кількість записів у блокчейні, дозволяє підтверджувати великі набори змін через один елемент та скорочує час верифікації. Використання гетерогенних Merkle-структур забезпечує додаткові переваги у сценаріях із нерівномірним розподілом навантаження, підвищуючи ефективність підтвердження та скорочуючи глибину дерева [2].

Кореневе значення Merkle-структури або окремий хеш транзакції передається у блокчейн і зберігається як незмінний запис. Блокчейн виконує функцію незалежного джерела істини: будь-яка подальша спроба верифікації полягає у повторному формуванні хешу з даних, що зберігаються у СУБД, та порівнянні з доказом, зафіксованим у розподіленому реєстрі. Якщо значення збігаються, транзакція підтверджена, а у разі розбіжності виявляється факт модифікації або пошкодження даних.

Архітектури сучасних гібридних систем демонструють різні підходи до підвищення надійності верифікації. У ряді рішень застосовується поєднання локальних механізмів узгодженості (наприклад, Kafka або інші журналаційні системи) із децентралізованими BFT-алгоритмами, такими

як Tendermint або PBFT, де блокчейн використовується як фінальний рівень підтвердження. Це дозволяє розподіляти навантаження між внутрішніми сервісами та мережею валідаторів і забезпечувати масштабованість без втрати незмінності.

Такий механізм верифікації забезпечує подвійний рівень контролю: локальну транзакційну узгодженість у СУБД та глобальну криптографічну незмінність, підтверджену блокчейном. У результаті система отримує захищений журнал змін, який може бути використаний для аудиту, виявлення аномалій, забезпечення нормативної відповідності та взаємодії зі сторонніми учасниками, для яких важливо мати незалежне підтвердження достовірності даних.

Переваги та обмеження гібридної моделі

Гібридна модель поєднує продуктивність реляційних СУБД із незмінністю та прозорістю блокчейну, забезпечуючи підвищений рівень довіри до даних без суттєвого впливу на швидкодію. Використання блокчейну виключно для зберігання доказів змін зменшує обсяг операцій у розподіленому реєстрі та дозволяє підтримувати високу пропускну здатність системи. Merkle-агрегація додатково скорочує кількість транзакцій у блокчейні, забезпечує компактність даних і спрощує аудит.

Переваги такої моделі проявляються у незалежному підтвердженні достовірності записів, підвищеній стійкості до модифікацій, можливості зовнішнього контролю та відповідності вимогам регуляторів. Водночас система зберігає властивості ACID та ефективність реляційної обробки, що робить її придатною для високонавантажених платформ.

Обмеження гібридного підходу пов’язані з додатковою складністю архітектури, потребою у синхронізації між СУБД та блокчейном, затримками, зумовленими консенсусом у розподіленій мережі, а також необхідністю підтримання окремого верифікаційного шару. У публічних блокчейн-мережах можуть виникати затрати на виконання транзакцій і залежність від їх пропускної здатності [3, 5].

Висновки

Таким чином, гібридна модель зберігання даних поєднує сильні сторони реляційних СУБД та блокчейн-технологій, забезпечуючи високу продуктивність і водночас незалежне підтвердження достовірності транзакцій. Передача у блокчейн лише криптографічних доказів змін дозволяє мінімізувати навантаження на розподілену мережу та підтримувати масштабованість системи. Застосування хешування та Merkle-агрегації створює компактний, стійкий до модифікацій журнал, придатний для аудиту й взаємодії зі сторонніми учасниками. Такий підхід є перспективним для систем, де важливо поєднати швидкодію класичних баз даних із можливістю перевірки цілісності на основі децентралізованих механізмів.

*Л*ітература

1. Islam S., Apu K. U. Decentralized vs. centralized database solutions in blockchain: advantages, challenges, and use cases. Global mainstream journal of innovation, engineering & emerging technology. 2024. Т. 3, № 4. С. 58–68. URL: https://doi.org/10.62304/jieet.v3i04.
2. A novel high-efficiency transaction verification scheme for blockchain systems / J. Zhang та ін. Computer modeling in engineering & sciences. 2024. Т. 139, № 2. С. 1613–1633. URL: https://doi.org/10.32604/cmes.2023.044418
3. Hybrid blockchain for iot–energy analysis and reward plan / J. Hu та ін. Sensors. 2021. Т. 21, № 1. С. 305. URL: https://doi.org/10.3390/s21010305
4. Saha S. Blockchain-Integrated databases: a framework for immutable and secure data management. The american journal of engineering and technology. 2025. Т. 7, № 07. С. 159–166. URL: https://doi.org/10.37547/tajet/volume07issue07-15
5. Hybrid blockchain database systems / Z. Ge та ін. Proceedings of the VLDB Endowment. 2022. Т. 15, № 5. С. 1092–1104. URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Hybrid-Blockchain-Database-Systems:-Design-and-Ge-Loghin/73f972f488b154f3788364de76adfb9ff25ee436?utm_source=direct_link