

DOI: 10.35681/1560-9189.2023.25.2.300600

УДК 519.816; 004.056

М. М. Савченко, В. В. Циганок

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України
вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

Оптимізація обсягу інформації у частково децентралізованій системі підтримки прийняття рішень

Системи підтримки прийняття рішень, як і інші системи, можуть бути частково децентралізованими із використанням технології блокчейн, що надає їм нових корисних властивостей в області безпеки, перевірки результатів, публічного аудиту. Однак децентралізація підвищує номінальну вартість обслуговування системи, оскільки частина даних тепер зберігатиметься в децентралізованому публічному реєстрі. Проведено огляд підходів, за допомогою яких можна зменшити вартість зберігання інформації у децентралізованих реєстрах даних. Наведено чисельні приклади методу зберігання інформації у децентралізованому реєстрі Ethereum, який дозволяє зменшити вартість запису даних на більше ніж 80 % за допомогою зміни способу відправки транзакцій до децентралізованої мережі. Обґрунтовано можливість перенесення запропонованих способів збереження даних на інші Ethereum-сумісні (EVM) децентралізовані платформи даних задля подальшого зменшення собівартості збереження даних у децентралізованих реєстрах.

Ключові слова: децентралізовані платформи даних, блокчейн, Ethereum, EVM, системи підтримки прийняття рішень, оптимізація розміру даних.

Вступ: проблематика вартості при використанні часткової децентралізації систем

У сучасному світі інформаційних технологій і наявних програмних інструментів децентралізація за допомогою технології блокчейн відкриває нові горизонти для розвитку систем, зокрема, систем підтримки прийняття рішень [1]. Децентралізація у доречних випадках надає існуючій системі нові властивості в плані безпеки, прозорості та незалежної верифікації результатів її роботи [2].

Однак важливо усвідомлювати, що децентралізація не є безкоштовною, навіть якщо існуюча система має або готова придбати власні обчислювальні можливості (класичні сервери, в тому числі СУБД) — вона вимагає певних інвестицій у контексті зберігання даних у глобально доступному публічному децентралізовано-

© М. М. Савченко, В. В. Циганок

му реєстрі. Наприклад, щоб зберігати дані в децентралізованій платформі даних (ДПД) Ethereum, необхідно придбати її «власну» валюту, Ether, якою оплачуються транзакції у цій мережі. Таким чином, оптимізація вартості зберігання даних, зокрема шляхом мінімізації обсягу інформації, що записується до децентралізованого реєстру, є ключовою задачею, яка також визначає доцільність децентралізації [3].

У даній статті представлено модель частково децентралізованої системи підтримки прийняття рішень, на прикладі якої розглянуто способи зменшення обсягу даних у децентралізованих реєстрах. Окреслено підходи задля досягнення високої щільності запису даних у контексті Ethereum та інших Ethereum Virtual Machine-сумісних платформ (EVM), а також розглянуто та запропоновано системну архітектуру, що дозволяє записувати лише критично необхідну інформацію до децентралізованого реєстру.

Модель захищеної підсистеми експертного оцінювання на прикладі системи підтримки прийняття рішень

Системи підтримки прийняття рішень (СППР) — це системи, які перетворюють надані їм факти на рекомендації для осіб, що приймають рішення, спираючись на численні фактори. Ці рекомендації, як правило, використовуються лише в інформаційних цілях, однак вихід системи може вважатися основним висновком для багатьох складних операцій, з якими люди зазвичай не можуть впоратися самостійно (приклади: дослідження поведінки соціальних груп, складна мережа фактів і стосунків, стратегічне планування тощо) [4].

Однією із ключових особливостей СППР є робота з експертами, під час якої експерти надають усі необхідні для системи дані [5], на базі яких у подальшому формулюються висновки та рекомендації. Підсистема, що призначена для роботи з експертами, які здебільшого є звичайними користувачами, нерідко зберігає дані в незахищених або централізованих реєстрах, що підвищує ризик їхньої компрометації, підробки, несанкціонованого видалення тощо.

У першу чергу, важливо переконатися, що в обробку системою поступають достовірні вхідні дані. Достовірність вхідних даних складає основу довіри до всієї СППР, так само як і до організації, що її підтримує. Тому одним із актуальних і необхідних векторів використання розробленої системи делегування транзакцій, як і самозахисних децентралізованих платформ у цілому, є підсистема експертного оцінювання в СППР.

Часткова децентралізація систем експертного оцінювання

Розглянемо задачу децентралізації системи експертного оцінювання у типовій СППР на основі публічних децентралізованої платформ даних [6]. Використання саме публічної децентралізованої платформи даних надає цінних характеристик усій системі, виходячи з можливості проводити публічний аудит і гарантій автентичності інформації.

Оскільки сучасні публічні децентралізовані платформи даних мають обмеження щодо зберігання даних, розглянемо ряд методів оптимізації запису вхідних даних у децентралізовану мережу та можливих альтернатив. Як децентралізована платформа даних для прикладу використовується Ethereum — де-факто найбільш

використовувана децентралізована мережа станом на 2020 рік, проте описані принципи можуть бути застосовані до будь-якої децентралізованої платформи даних з підтримкою децентралізованих програм користувача.

На рис. 1 наведено спрощену структуру СППР, в якій використовується децентралізована підсистема роботи з експертами. Дані, що вносяться до системи експертами, зберігаються в децентралізованому реєстрі, який, у свою чергу, може бути відкритий для зовнішнього аудиту.

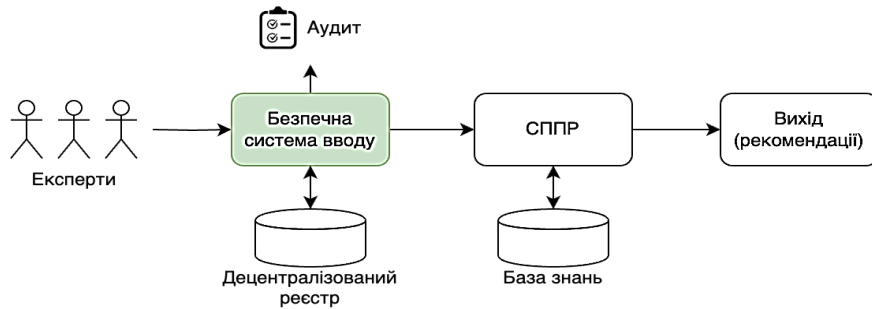


Рис. 1. Модель СППР з відокремленою децентралізованою підсистемою роботи з експертними оцінками

Цикл роботи з СППР складатиметься з наступних етапів.

1. Одноразовий підготовчий етап — отримання (або генерація) експертами децентралізованого акаунту (децентралізованої особистості, криптогаманця). Даний крок повністю замінює кроки отримання доступу до традиційних програмних систем, де аналогом виступає отримання пари логін/пароль або ключа для електронно-цифрових підписів.

2. Етап, який можна спростити з точки зору користувача-експерта — забезпечення децентралізованих акаунтів коштами для функціонування децентралізованої програми. Цей крок передбачає виконання описаних у попередньому розділі кроків по роботі з криптовалютою, які необхідні для сплати комісії за проведення транзакцій у децентралізованій мережі. В наступному розділі описано застосування делегованих транзакцій для ліквідації даного етапу, однак це передбачає виконання додаткових кроків для адміністратора систем.

3. Наступним етапом є авторизація експертів у системі та виконання корисної роботи. Будь-які вхідні, агреговані або обчисленні дані, що мають безпосередньо потрапити до СППР для подальшої обробки спершу зберігаються в захищеному реєстрі децентралізованої мережі даних (рис. 1). Дані, що передаються в мережу мають зменшений обсяг настільки, наскільки це можливо, оскільки від цього залежить кінцева вартість проведення експертизи (оцінювання). Всі необхідні обчислення можна виконати безпосередньо або в підсистемі експертного оцінювання, або в СППР після їхнього зчитування.

4. По закінченні роботи експерт підписує свої дані ключем децентралізованого акаунту, і відправляє підписані ним дані до децентралізованої мережі (рис. 2). У подальшому, якщо це передбачено системою, можна перевірити достовірність і походження відправлених вихідних даних.

5. На останньому етапі проводиться зчитування і обробка інформації, які отримані від експертів у СППР.

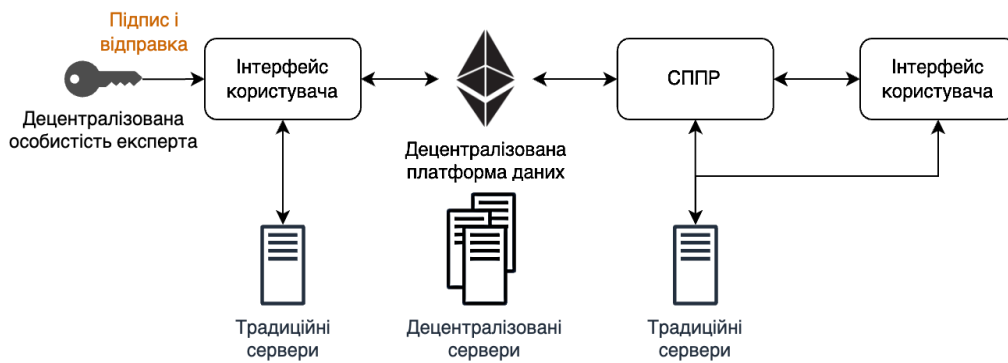


Рис. 2. Модель традиційної децентралізації системи експертного оцінювання

Застосування делегації транзакцій для підсистеми роботи з експертами

Задля того, щоб отримання децентралізованого акаунту було єдиним підготовчим етапом, необхідним для виконання експертами окрім безпосередньо самої роботи з системою, потрібно «приховати» складність роботи з децентралізованою платформою за допомогою делегування транзакцій [7]. На рис. 3 показано модель децентралізованої системи, яка використовує делегування транзакцій.

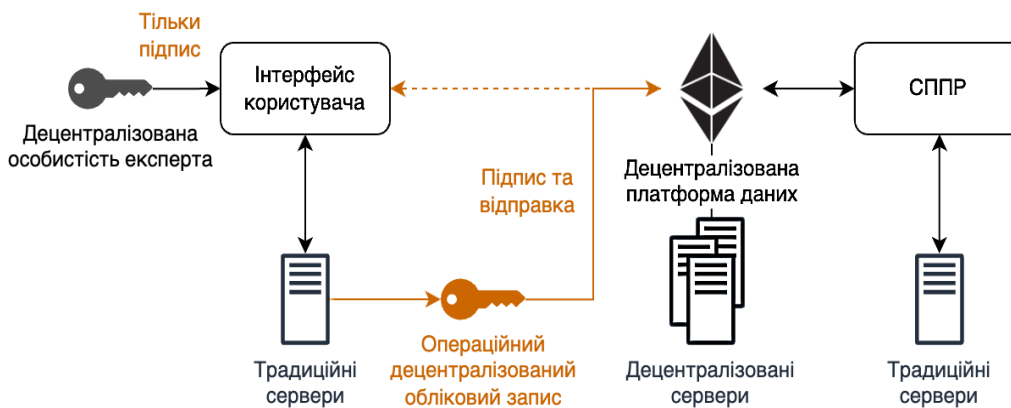


Рис. 3. Модель децентралізованої системи експертного оцінювання із використанням делегованих транзакцій

У даній моделі користувачі (експерти) не є тими, хто записує дані до децентралізованої мережі, а, отже, вони і не сплачують за це комісій і не мають необхідності в придбанні валюти децентралізованої платформи даних. Усе операційне навантаження зі сплати комісій зводиться до поповнення лише одного децентралізованого акаунту адміністратором, який виконує делеговані йому транзакції від експертів завдяки автоматизованій системі. Таким чином, адміністратор (організатор експертизи/інженер зі знань) поповнює баланс децентралізованого акаунту лише один раз, наприклад, на еквівалент \$50 (мінімальна сума необхідна для купівлі криптовалюти на більшості обмінників) або менше. Після цього експерти можуть безперервно працювати з системою до тих пір поки не знадобиться наступне поповнення.

Способи мінімізації інформації для зберігання в децентралізованих реєстрах

На відміну від безкоштовного зчитування інформації, за кожний байт, що записується до публічного децентралізованого реєстру (окрім тестових мереж) сплачується комісія [8]. Тому виникає необхідність мінімізувати кількість інформації, що записується до децентралізованого реєстру.

Вартість транзакції у мережі Ethereum в доларовому еквіваленті розраховується на основі витраченої на транзакцію цілої величини G , відомої як «gas». Вона дорівнює сумі вартості всіх виконаних програмних інструкцій g_i , кожна з яких має чітко визначену табличну вартість. Важливо зазначити, що такі інструкції як, наприклад, видалення даних з децентралізованого реєстру мають від'ємну вартість g_i , однак сума від'ємних величин не може перевищувати половину від позитивної суми. Також, кожна окрема транзакція за замовчуванням має базову вартість $g_0 = 21000$. Необхідно також врахувати, що в Ethereum одна транзакція обмежена розміром блоку $G_{\max} = 30,000,000$ (станом на кінець 2023 року). Враховуючи все вищезазначене, маємо:

$$G = g_0 + \sum_{i=1}^N g_i [g_i > 0] - \min\{-\sum_{i=1}^N g_i [g_i < 0], (g_0 + \sum_{i=1}^N g_i [g_i > 0]) \div 2\}, \quad G \leq G_{\max} \quad (1)$$

Кінцева вартість транзакції E в криптовалюти Ξ (Ether) визначається як $E = G \times P$, де P — ціла величина «gas price», що вимірюється в Wei і самостійно встановлюється тим, хто підписує транзакцію. Теоретично P можна визначити і нульовою величиною, але в такому випадку у майнерів не буде фінансової мотивації включити транзакцію до блоку [9]. Тому, для проведення транзакції необхідно визначити таку величину P , яка би відповідала теперішнім умовам у децентралізованій мережі.

Найбільш «коштовними» операціями в Ethereum (а також в інших EVM-сумісних децентралізованих мережах) є операції збереження до децентралізованого реєстру. Одна така операція коштує $g = 20000$ у випадку створення нового значення word (256 біт), або $g = 5000$ у випадку модифікації уже існуючого значення. Також, варто врахувати, що для більш складних структур даних, ніж фіксований масив бітів, можуть знадобитися додаткові слоти пам'яті, які тарифікуються аналогічним чином [10].

Очевидно, що для зменшення кінцевої вартості транзакції у мережі можна мінімізувати як величину G (зменшуючи кількість операцій та збільшуючи кількість даних, що видаляються), так і P (проводячи транзакції тоді, коли мережа найменше завантажена). Нижче розглянемо способи компактифікації даних і на їхній основі, в наступному розділі, проведемо кінцеву оцінку вартості впровадження системи на реальній публічній мережі.

Компактний запис експертних даних у децентралізовану мережу

Припустимо, що оцінки експертів записуються до децентралізованої мережі в максимально можливому компактному відкритому вигляді, в режимі реального часу і окремо для кожного експерта. Наприклад, бінарні експертні оцінки (ординальні порівняння) a_1, a_2, \dots, a_n , отримані методом попарних порівнянь в алгоритміч-

но визначеному порядку, записуються до децентралізованого реєстру у вигляді масиву бітів b_1, b_2, \dots, b_n , де кожний біт (1 або 0) відповідає бінарній оцінці експертом певної пари об'єктів за визначеним критерієм. Кількість таких попарних порівнянь становить $n = k \times (k - 1) \div 2$ (елементи вище головної діагоналі матриці попарних порівнянь), де k — кількість об'єктів, що порівнюються [11].

У такому випадку, виключивши менш коштовні програмні операції (такі як зчитування розміру уже записаних даних) і вартість оновлення довжини записаних даних (яку ми позначимо через g_0 , оскільки вона виконується лише один раз за транзакцію), суто зберігання $b = 256$ бітів інформації буде коштувати $G = g_0 + g_{sstore}$, де $g_{sstore} = 20000$ — коштовність операції запису 256 біт до децентралізованого реєстру. Зробивши припущення, що один експерт за сесію в середньому генерує $b_{tx} = 1 \times 10^3$ біт даних, отримуємо наступне відношення вартості G (за вищезазначених умов) до кількості безпосередньо записуваних бінарних даних:

$$f(b) = g_0 + [b \div 256] \times g_{sstore} + [b \div b_{tx}] \times (g_0 + g_{sstore}). \quad (2)$$

З графіка (рис. 4) видно, що залежність між кількістю інформації, що зберігається та вартістю транзакції майже лінійна. Виключення становлять ті ділянки графіка, на яких дані розподіляються на різні транзакції через те, що дані, які отримані від декількох експертів, не групуються.

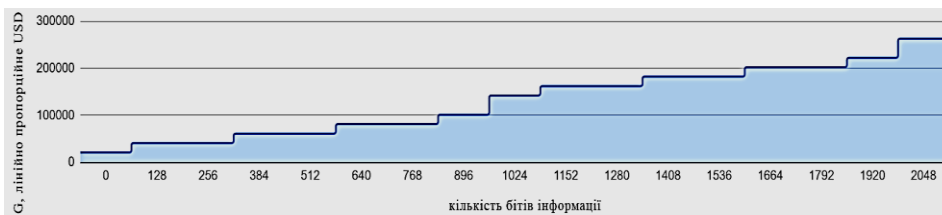


Рис. 4. Залежність вартості «газу» G від кількості біт записаної інформації

Використання перезапису застарілих даних

На зберіганні даних можна значно зекономити, якщо запрограмувати децентралізовану програму на перезапис уже існуючих, не актуальних даних. Наприклад, це можуть бути дані попередньої експертизи чи попередні оцінки експерта.

У випадку з Ethereum, окрема транзакція, що перезаписує 256 бітів уже існуючих даних у децентралізованому реєстрі коштуватиме $g_{sstore} = 5000$ (в 4 рази менше, ніж запис нових бітів інформації), що значно здешевшує кінцеву ціну транзакцій — до 61,3 %, на відміну від запису нових даних.

Варто зазначити, що дана оптимізація накладає певні обмеження на отримання, у разі потреби, застарілих даних з децентралізованого реєстру. Доступні програмні інтерфейси розподілених вузлів не надають прямого доступу до відновлення історичної інформації з причин ефективності їхньої роботи, але якщо користувачеві або аудиторіві відомий ідентифікатор транзакцій запису або блоку, в якому вона знаходилась, то дану інформацію все ще можна легко отримати, наприклад, використовуючи веб-сервіси які індексують дані до блокчейну. Наприклад для Ethereum, одним із таких відомих сервісів є ресурс etherscan.io, який дозволяє переглядати раніше виконані транзакції, навіть якщо їх немає в індексі безпосередньо децентралізованої платформи даних [12].

У будь-якому випадку, оскільки технологія блокчейн передбачає можливість відновлення історичної інформації від початку, історичні дані все ще можна отримати через нестандартні інтерфейси. Зазвичай, такі методи відтворення даних не використовуються, оскільки методи індексування даних у режимі реального часу або під час процесу синхронізації є більш доступними, гнучкими та відповідно загальноживаними [13].

Групування транзакцій

Групування декількох транзакцій експертів можливо за умови, що надані експертом дані не використовуються в реальному часі, і їхній запис до децентралізованого реєстру може бути відкладено. Відкладений запис викликає необхідність в імplementації додаткових модулів децентралізованої програми та запобіжних заходів для того, щоб упевнитися, що робота експерта дійсно потрапить до децентралізованого реєстру.

Фактично, використання делегованих транзакцій (рис. 3) разом із групуванням даних дозволяє запобігти майже всіх ризиків, якщо дотримуватися рекомендацій методу делегування транзакцій, описаного в даній статті. В результаті імplementації групування без використання делегованих транзакцій, наприклад, за допомогою традиційного електронного підпису інформації про експертні оцінки з подальшим відправленням їх до децентралізованого реєстру адміністратором, це може принести додаткових 16,54 % (в сумі 77,84 %), за рахунок того, що $g_{store} = 0$ для всіх експертів. Варто зазначити, що при групуванні транзакцій з'являється також і обмеження кількості транзакцій, які можуть бути згрупованими, оскільки в Ethereum блок має обмеження $G = 30,000,000$ (станом на 2023 рік). У такому випадку, велику кількість згрупованих транзакцій (у нашому прикладі, для більше ніж 31,5 кілобайт інформації) доведеться розбивати на окремі групи.

Вплив делегованих транзакцій на кінцеву вартість роботи системи

Делеговані транзакції додають лише незначну додаткову вартість до кожної із транзакцій без делегування. Однак, ця відмінність стає значною у випадку, коли транзакції відправляються в мережу без групування. Експериментально досліджено, що виконання мінімально необхідної делегованої транзакції запису даних за допомогою методу, описаного в даній статті, коштує не менше ніж $g_{0 \text{ extra min}} \approx 51000$ додаткової вартості в EVM-сумісній децентралізованій платформі даних Ethereum. На щастя, логіка валідації підпису в децентралізованій програмі найменшим чином залежить від обсягу даних, тому при підрахунках цим можна знехтувати.

На рис. 5 показано залежність вартості G від кількості записуваних у децентралізований реєстр бітів b для всіх можливих оптимізацій, що були розглянуті:

- 1) запис експертних даних у децентралізовану мережу в режимі реального часу (синій графік);
- 2) спосіб (1) із перезаписом застарілої інформації (червоний графік);
- 3) спосіб (2) із відкладеним групуванням транзакцій (фіолетовий графік);
- 4) спосіб (2) із використанням делегованих транзакцій (зелений графік);
- 5) спосіб (3) із використанням делегованих транзакцій (жовтий графік).

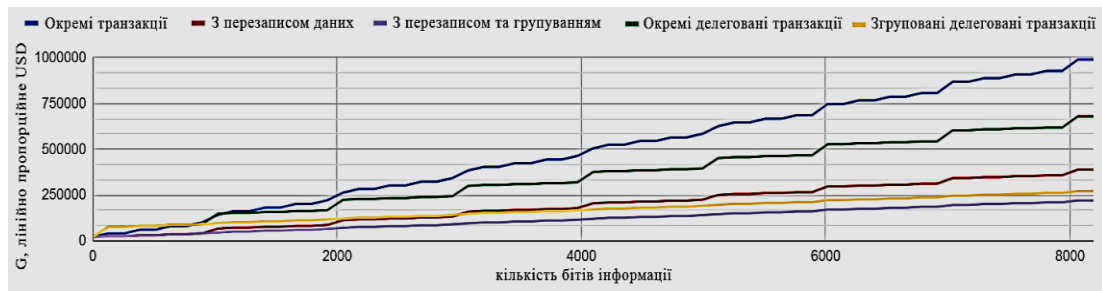


Рис. 5. Залежність вартості G від кількості біт записаної інформації для всіх способів компактифікації даних

З графіка на рис. 5 можна зробити висновок, що при використанні делегованих транзакцій, для здешевлення вартості системи на більше ніж 80 % необхідне групування транзакцій, а отже і їхнє відкладене виконання.

Важливо також відмітити те, що найбільш значною оптимізацією є саме перевикористання вже виділених секцій сховища децентралізованого реєстру, тобто перезапис уже існуючих даних. Це дозволяє зробити транзакції якнайменш на 250 % дешевшими. Наступним за ефективністю підходом є відкладене групування транзакцій, що дозволяє знехтувати початковою ціною транзакції на великому обсязі даних і може принести до 80 % здешевлення порівняно із записом даних без групування.

Варто підкреслити, що впровадження делегованих транзакцій збільшує мінімальну вартість системи лише на 18,75 %, в порівнянні з найбільш оптимізованим способом без використання делегованих транзакцій. Це відносно малий кошт за значне покращення архітектури і кінцевої простоти використання децентралізованої системи.

Приклад реальної вартості підтримки децентралізованих систем різних EVM-сумісних платформ даних

Децентралізована платформа даних Ethereum наразі (2020–2023) є дорогою для використання її як в цілях зберігання інформації так і для транзакцій. Але вона є основою для багатьох сумісних із нею незалежних децентралізованих платформ даних, таких як Optimism, Arbitrum, Matic, zkSync та інших. Усі вони побудовані або безпосередньо з використанням EVM (Ethereum Virtual Machine — віртуальної машини Ethereum для виконання програмних інструкцій), або вони є EVM-сумісними, що дозволяє екстраполювати результати досліджень і на них з точно такими ж показниками для розрахунку вартості G .

Для наочності, наведемо приклад (див. таблицю), в якому покажемо якою є реальна вартість виконання транзакції у різних децентралізованих платформах даних станом на 11.12.2023. Варто зазначити що хоч ціна криптовалюти, яка забезпечує працездатність ДПД і є досить волатильною, її волатильність у 2021–2023 роках не є значним ризиком для систем, так як планова закупівля криптовалюти для функціонування децентралізованої системи відбувається лише один раз при розгортанні системи. Крім цього, волатильність Ethereum у 2021–2023 роках не перевищувала 300 %, тобто ціна монети що обслуговує ДПД змінювалася максимум втричі.

Порівняння реальної мінімальної ціни виконання однієї транзакції у різних ДПД у моменті 11.12.2023

Назва ДПД	Ціна газу, G	Ринкова ціна монети	G за транзакцію	Ціна транзакції
Ethereum	30	\$2,222.00	21000	\$1,39986000
BNB chain	3	\$242,00	21000	\$0,01524600
Polygon	620	\$0,84	21000	\$0,01093680
Chronos	4600	\$0,10	21000	\$0,00966000
Arbitrum	0,2	\$2,222,00	21000	\$0,00933240
Optimism	0,03	\$2,222,00	21000	\$0,00139986
Fantom	74	\$0,36	21000	\$0,00055944
Arbitrum Nova	0,01	\$2,222,00	21000	\$0,00046662

Оскільки ДПД Ethereum очевидно є найбільш дорогою у використанні, виключимо її з порівняння та наведемо порівняння реальної мінімальної ціни транзакції на діаграмі рис. 6.

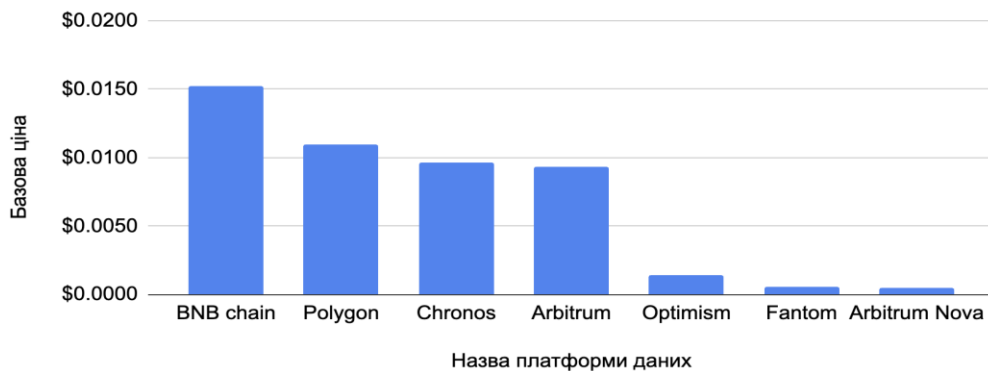


Рис. 6. Реальна мінімальна ціна транзакції у різних ДПД у моменті 11.12.2023

З наведених даних видно, що, наприклад, ДПД Optimism та Fantom є найбільш дешевими для проведення транзакцій, оскільки в них ціна однієї транзакції є меншою за один пенні (USD 0.01). У випадку із СППР, це означає що проведення децентралізованої експертизи, в якій необхідно внести 2048 біт інформації до блокчейну, найбільш вигідно буде обрати, наприклад, ПДП Fantom, що матиме номінальну вартість близько декількох центів за 2048 біт інформації.

Варто підкреслити що на момент проведення експертизи і за необхідності можна обрати будь-яку найбільш вигідну для проведення транзакцій ДПД, звертаючи увагу на її завантаженість та вартість проведення транзакцій.

Висновки

Представлені архітектурні рішення та підходи до мінімізації інформації, що зберігається в децентралізованому реєстрі, дозволяють заощадити до 80 % на комісіях при використанні децентралізованих платформ даних порівняно зі звичайними методами виконання транзакцій. У поєднанні із запропонованою архітектурою для

систем підтримки прийняття рішень дані підходи забезпечують максимально ефективне функціонування системи в реальному часі, а також демонструють, що часткова децентралізація централізованих систем з метою забезпечення прозорості та спроможності до аудиту не несе значний операційний кошт, відповідно до задач що вирішує СППР.

Оскільки в більшості систем відсутня необхідність безпосереднього збирання великих обсягів даних у захищених децентралізованих реєстрах, дані підходи можна екстраполювати також і на інші системи, не обов'язково СППР.

1. Savchenko M., Tsyganok V., Andriichuk O. Decision Support Systems' Security Model Based on Decentralized Data Platforms (reprint) CEUR Workshop Proceedings. Selected Papers of the XVIII International Scientific and Practical Conference on Information Technologies and Security (ITS 2018); Kyiv, Ukraine, November 27, 2018. Vol. 2318. P. 209–221.

2. Abou Jaoude J., and Saade R.G. Blockchain applications–usage in different domains. *IEEE Access*. 2019. 7. P. 45360–45381.

3. Scriber, B.A., A framework for determining blockchain applicability. *IEEE Software*. 2018. 35(4). P. 70–77.

4. Tsyganok V.V., Borokhvostov I.V., Roik P.D. Problem-oriented knowledge transfer platform for decision making support in socio-technical systems / CEUR Workshop Proceedings, Vol. 2067 Selected Papers of the XVII International Scientific and Practical Conference on Information Technologies and Security (ITS 2017); Kyiv, Ukraine, November 30, 2017. P. 112–117.

5. Tsyganok V.V., Kadenko S.V., & Andriichuk O.V. Significance of Expert Competence Consideration in Group Decision Making using AHP. *International Journal of Production Research*. 2012. Vol. 50, Issue 17. P. 4785-4792.

6. Tsyganok V., Savchenko M., Kadenko S., Andriichuk O. Decentralization of the issue-based knowledge transfer platform Selected Papers of the XX International Scientific and Practical Conference «Information Technologies and Security» (ITS 2020), Kyiv, Ukraine, December 10, 2020. CEUR Workshop Proceedings 2859, CEUR-WS.org. 2021. P. 36–45.

7. Savchenko M., Tsyganok V., Andriichuk O. An Approach to Transaction Delegation in Self-protected Decentralized Data Platforms CEUR Workshop Proceeding. Selected Papers of the 19th International Scientific and Practical Conference «Information Technologies and Security» (ITS 2019). 2019. Vol. 2577. P. 169–188.

8. Buterin V. Ethereum: platform review. Opportunities and Challenges for Private and Consortium Blockchains. 45. 2016.

9. Aldweesh A. Analysis, evaluation and benchmark the Ethereum incentive mechanism. In 2021 IEEE 11th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC). 2021, June. P. 1–4.

10. Manoj P.R. Ethereum Cookbook: Over 100 Recipes Covering Ethereum-Based Tokens, Games, Wallets, Smart Contracts, Protocols, and Dapps. Packt Publishing Ltd., 2018. P. 67–69.

11. Totsenko V.G., Tsyganok V.V., Method of paired comparisons using feedback with expert. *Journal of Automation and Information Sciences*. 1999. Vol. 31, Issue 7–9. P. 86–96.

12. Bragagnolo S., Marra M., Polito G. and Boix E.G., 2019, May. Towards scalable blockchain analysis. In 2019 IEEE/ACM 2nd International Workshop on Emerging Trends in Software Engineering for Blockchain (WETSEB) (P. 1–7). IEEE.

13. Third A., and Domingue J. Linked data indexing of distributed ledgers. In Proceedings of the 26th International Conference on World Wide Web Companion. April 2017. P. 1431–1436.

Надійшла до редакції 15.12.2023